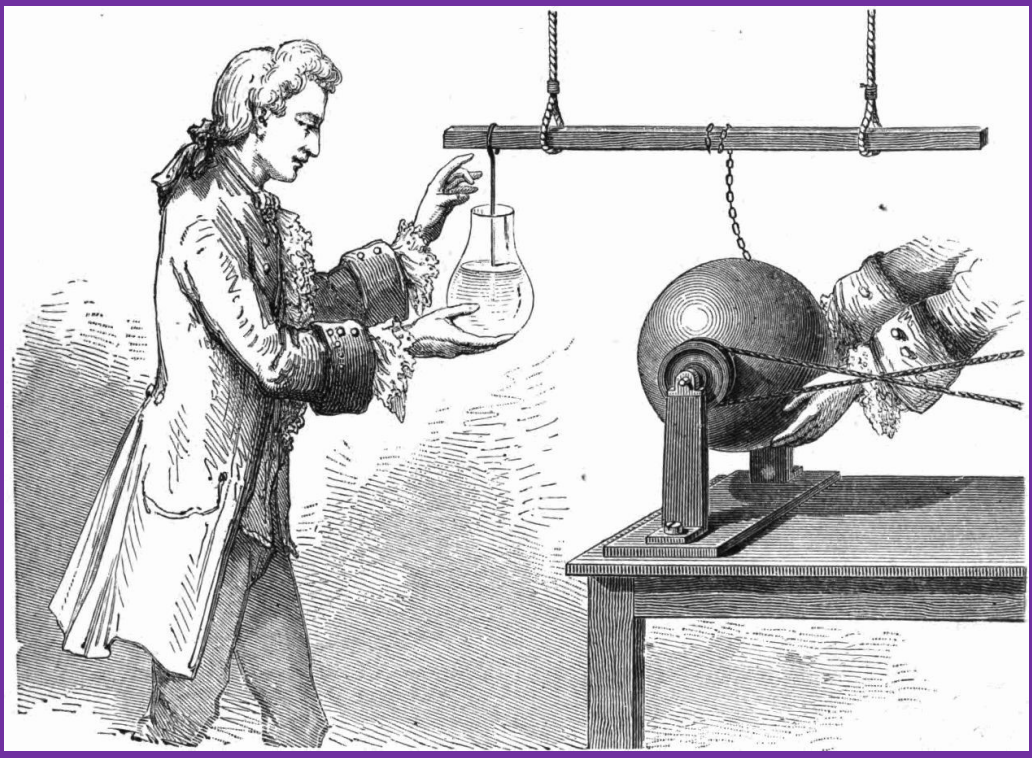
Andre Koch Torres Assis



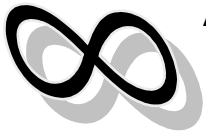
Los fundamentos experimentales e históricos de la electricidad

Volume II

Los fundamentos experimentales e históricos de la electricidad

Volumen II

Andre Koch Torres Assis



Apeiron
Montreal

C. Roy Keys Inc.
4405, rue St-Dominique
Montreal, Quebec H2W 2B2 Canada

© André Koch Torres Assis 2026
Traducido por John Plaice

P ublicado por primera vez en 2026

Library and Archives Canada Cataloguing in Publication

Title: Los fundamentos experimentales e históricos de la electricidad / Andre Koch Torres Assis.
Other titles: Experimental and historical foundations of electricity. Spanish
Names: Assis, André Koch Torres, 1962- author.
Description: Translation of: The experimental and historical foundations of electricity. | Translated by John Plaice. | Includes bibliographical references. | Contents: volumen II. In Spanish, translated from the English.
Identifiers: Canadiana (print) 20260256242 | Canadiana (ebook) 20260259381 | ISBN 9781987980530 (softcover ; v. 2) | ISBN 9781987980547 (PDF; v. 2)
Subjects: LCSH: Electricity—History. | LCSH: Electricity—Experiments. | LCGFT: Textbooks.
Classification: LCC QC533 .A8818 2026 | DDC 537.078—dc23

Ilustración de portada: Una de las primeras representaciones del experimento de la botella de Leyde (1745). Fuente: A. P. Deschanel, Elementary Treatise on Natural Philosophy, D. Appleton and Co., Nueva York, 1876. Parte 3, p. 570, Figura 382. Traducido por J. D. Everett.

Ilustraciones de la contraportada: Fotos de algunos de los instrumentos descritos en este libro. Un versorio de metal. Un versorio de Du Fay de plástico, cuyo extremo de una de las patas está envuelto en papel de aluminio. Un péndulo eléctrico provisto de un disco de papel fijado a un hilo de seda atado a una pajita de plástico. Un electroscopio cargado cuya tira levantada es de papel de seda. El cartón delgado del electroscopio está sujeto a una pajita de plástico.

LOS FUNDAMENTOS EXPERIMENTALES E HISTÓRICOS DE LA ELECTRICIDAD

Volumen 2

ANDRE KOCH TORRES ASSIS

Traducido por JOHN PLAICE

© Andre Koch Torres Assis

Índice general

Prefacio del traductor **ix**

Presentación y agradecimientos **xi**

1 Introducción **1**
1.1 El efecto del ámbar . . . 1
1.2 La serie triboeléctrica . . . 3
1.2.1 La posición del agua en la serie triboeléctrica . . . 3
1.3 Datos sencillos y básicos sobre la electricidad . . . 5
1.3.1 No explicamos estos hechos, simplemente los enumeramos . 9
1.3.2 Significado de algunas expresiones . . . 10

2 Instrumentos eléctricos **11**
2.1 Lista del material necesario para los experimentos . . . 11
2.2 El electroscopio: el instrumento más importante de la electrostática . 12
2.2.1 Componentes principales de un electroscopio . . . 14
2.2.2 Comparación entre el electroscopio de hojas de oro y el electroscopio fabricado con materiales económicos . . . 14
2.2.3 El electroscopio y el descubrimiento de los rayos cósmicos . . 15
2.3 El versorio . . . 16
2.3.1 El versorio metálico sostenido por un alfiler . . . 17
2.3.2 El versorio metálico sostenido por un trozo de plástico puntiagudo . . . 17
2.3.3 El versorio de plástico . . . 17
2.3.4 El versorio de Du Fay . . . 18
2.3.5 Componentes principales de estos versorios . . . 18
2.4 El péndulo eléctrico . . . 19
2.4.1 El péndulo eléctrico clásico . . . 19
2.4.2 El péndulo con flecha . . . 20
2.4.3 El péndulo de plástico . . . 20
2.4.4 Componentes principales de estos péndulos . . . 21
2.5 El hilo pendular de Gray . . . 21
2.6 Colectores de carga . . . 22
2.7 El comprobador de circuitos . . . 24

3 Conductores y aislantes **27**
3.1 Clasificación de sustancias en conductoras o aislantes mediante el electroscopio . . . 27
3.1.1 Definición de los términos conductor y aislante cuando se aplica alta tensión entre los extremos del cuerpo . . . 30
3.1.2 Cuerpos que se comportan como conductores o aislantes en los experimentos habituales de electrostática . . . 31
3.2 Clasificación de sustancias como conductoras o aislantes mediante el comprobador de circuitos . . . 36
3.2.1 Definición de los términos conductor y aislante cuando se aplica una pequeña diferencia de potencial entre los extremos del cuerpo . . . 38
3.2.2 Cuerpos que se comportan como conductores o aislantes en los experimentos habituales con corriente constante . . . 38
3.3 Factores que influyen en las propiedades conductoras y aislantes de una sustancia . . . 40
3.3.1 La naturaleza o la composición química de la sustancia . . . 40
3.3.2 La diferencia potencial entre los extremos del cuerpo . . . 40
3.3.3 El tiempo necesario para descargar un cuerpo electrizado . . . 41
3.3.4 La longitud del cuerpo . . . 41
3.3.5 La sección transversal del cuerpo . . . 46
3.3.6 La humedad . . . 52
3.3.7 La orientación del cuerpo con respecto a la tensión aplicada . . . 54
3.3.8 La temperatura . . . 57
3.3.9 La iluminación . . . 58
3.3.10 Otros factores . . . 58
3.4 Leyes relativas a los circuitos eléctricos que transportan corrientes continuas . . . 58

4 Conductores y aislantes en algunos experimentos sencillos **61**
4.1 Conductores y aislantes en el efecto del ámbar . . . 61
4.1.1 Explicación del efecto del ámbar en los manuales escolares . . . 61
4.1.2 Nuestra explicación del efecto del ámbar . . . 63
4.1.3 Es importante presentar una explicación detallada del efecto del ámbar . . . 66
4.2 Conductores y aislantes en el experimento sobre la atracción de un chorro de agua . . . 67
4.2.1 Explicación de la atracción de un chorro de agua en los manuales escolares . . . 67
4.2.2 Nuestra explicación de la atracción de un chorro de agua . . . 68
4.2.3 Es importante presentar una explicación detallada del atractivo de un curso de agua . . . 70
4.3 Diferencias entre los vidrios antiguos y los modernos . . . 71
4.3.1 El comportamiento conductor o aislante . . . 72
4.3.2 La densidad de las cargas superficiales adquiridas por fricción 73
4.3.3 El signo de las cargas adquiridas por el vidrio frotado . . . 74

4.3.4 El vidrio en los manuales modernos y la importancia de corregir lo que dicen . . . 76
4.4 El mecanismo *ACR* . . . 77
4.4.1 Explicación del mecanismo *ACR* . . . 80
4.4.2 Situaciones en las que no se aplica el mecanismo *ACR* . . . 81
4.5 La importancia del descubrimiento de los conductores y aislantes por Stephen Gray . . . 83

5 La electrización de cintas adhesivas 85
5.1 El comportamiento aislante o conductor de la cinta . . . 85
5.2 La electrización de la cinta . . . 89
5.3 La neutralización de la cinta . . . 92
5.4 La electrización de cintas con cargas opuestas . . . 94
5.5 Dipolos eléctricos . . . 97
5.6 Aspectos generales relacionados con las cintas adhesivas . . . 100

6 El electroforo 103
6.1 El instrumento . . . 103
6.2 El funcionamiento del electroforo . . . 104
6.3 Un testimonio personal . . . 109

7 La distribución de cargas en un conductor 111
7.1 La distribución de cargas en los conductores . . . 111
7.1.1 Experimentos con electroscopios . . . 111
7.1.2 La recogida de cargas situadas en las paredes internas y externas de un conductor electrizado . . . 115
7.1.3 Gray, Franklin y la distribución de cargas en conductores electrizados . . . 118
7.1.4 Conductores electrizados que tocan las paredes internas y externas de otro conductor . . . 121
7.1.5 La distribución de cargas en conductores abiertos y cerrados . 125
7.2 Cargas inducidas en las paredes internas y externas de un conductor hueco . . . 126
7.3 Acciones ejercidas por un conductor hueco electrizado sobre cuerpos internos y externos . . . 128
7.4 El experimento del balde de hielo de Faraday . . . 130

8 Blindaje eléctrico 133
8.1 Colocar un conductor o un aislante entre un cuerpo electrizado y un cuerpo ligero . . . 133
8.1.1 Algunas investigaciones anteriores sobre el tamiz . . . 136
8.2 Experimentos con conductores huecos . . . 138
8.3 Condiciones suficientes para un blindaje eficaz . . . 142
8.4 La jaula de Faraday . . . 147

9 El efecto punta **149**
9.1 Ilustrar el efecto punta con ayuda de electroscopios . . . 149
9.2 La recogida y la comparación de densidades de carga superficial . . . 152
9.3 Gray y el efecto punta . . . 155
9.4 La intensificación del efecto del ámbar . . . 159

10 El equilibrio eléctrico y el instrumento que indica la diferencia de potencial **161**
10.1 El conductor en equilibrio eléctrico . . . 161
10.2 El potencial eléctrico de un conductor . . . 163
10.3 Electroscopio con caja conductora . . . 164
10.4 Experimentos con el electroscopio con caja conductora . . . 170
10.4.1 El electroscopio muestra que todas las partes de un conductor en equilibrio tienen el mismo potencial . . . 170
10.4.2 Procesos que permiten modificar el potencial de un conductor con respecto al potencial de otro conductor . . . 174
10.5 Kelvin y el electrómetro para medir la diferencia de potencial . . . 178

11 Descargas eléctricas en el aire **183**
11.1 Chispas . . . 183
11.2 Comentarios sobre estas experiencias . . . 188
11.3 Pararrayos . . . 189
11.4 Pararrayos aislado del suelo . . . 191
11.5 Chispas en el mecanismo *ACR* . . . 192
11.6 La lámpara de neón . . . 193
11.7 Gray, Franklin, el efecto punta y la naturaleza eléctrica de los rayos . . . 195
11.8 Aplicaciones del efecto punta . . . 204

12 La botella de Leiden y los condensadores **205**
12.1 La fabricación de un condensador . . . 205
12.1.1 No utilice botellas de vidrio para aislar el conductor interno del conductor externo . . . 207
12.2 Experimentos con el condensador . . . 208
12.3 El mecanismo de funcionamiento del condensador . . . 214
12.4 Gray, Du Fay y la electrización del agua . . . 215
12.5 Los primeros condensadores . . . 222

13 La preservación temporal de la electrización de los cuerpos **229**
13.1 La descarga en el aire . . . 229
13.2 Preservar la electrización de los aislantes . . . 230
13.2.1 Algunos comentarios sobre estas experiencias . . . 232
13.3 Preservar la electrización de los conductores . . . 233
13.4 Electretos . . . 234
13.4.1 Definiciones . . . 234
13.5 La producción de electretos . . . 237
13.5.1 Materiales . . . 237

13.5.2 La fabricación de electretos 238
13.6 El electroforo con un electreto como base 241
13.7 Stephen Gray, los electretos y la preservación temporal de la electrización de los cuerpos 241
13.8 El desarrollo y aplicaciones de los electretos 248

14 Las misteriosas fuerzas no electrostáticas **251**
14.1 La fuerza electrostática o la fuerza de Coulomb 251
14.2 Fuerzas no electrostáticas en configuraciones de equilibrio estable . . 253
14.3 Fuerzas no electrostáticas en el efecto del ámbar 258
14.3.1 Otros misterios en el efecto del ámbar 260
14.4 Fuerzas no electrostáticas que actúan en el interior de una batería . . 262
14.5 Fuerzas no electrostáticas en circuitos que transportan corrientes continuas 263
14.6 Fuerzas no electrostáticas en otras situaciones 264
14.7 Orígenes de las fuerzas no electrostáticas 265
14.7.1 La teoría de Faraday y Maxwell basada en los campos electromagnéticos 267
14.7.2 La electrodinámica de Weber basada en la interacción entre partículas electrizadas 268

Bibliografía **273**

Prefacio del traductor

Reproducimos aquí un ajuste del prefacio incluido en el primer volumen.

Esta obra es la traducción al castellano del segundo volumen del libro *The Experimental and Historical Foundations of Electricity.*[1] Es el resultado de un encuentro entre el autor André Assis y yo mismo en Portugal en junio de 2025. En Sesimbra, en la conferencia *DemystifySci* organizada por Anastasia Bendebury y Michael Shilo DeLay, André hizo una presentación de las ideas de Charles-Édouard Guillaume y otros, que ya en 1896 preveían una radiación en el cosmos entre 2K y 5K, décadas antes del descubrimiento de Arno Penzias y Robert Wilson de la radiación cósmica fósil.[2]

Sigo el trabajo de André desde hace muchos años, ya que es una de las personas que más ha contribuido a la comprensión de la historia de la investigación científica en el campo de la electricidad. Organizó la traducción al inglés y al portugués de las obras sobre la electricidad de Charles-Augustin de Coulomb, André-Marie Ampère y Wilhelm Eduard Weber.[3] En los dos volúmenes de esta obra específica, André profundiza en los pasos seguidos por los primeros investigadores del siglo XVIII, con sus descubrimientos de principios básicos, que pueden demostrarse mediante sencillos experimentos realizados en casa.

Cuando nos conocimos en Portugal, André me propuso, en honor al 250.º aniversario del nacimiento de Ampère, traducir esta obra al francés. Acepté inmediatamente y añadí que también podía traducirla al castellano. Espero, por tanto, que esta traducción al idioma de Cervantes pueda ser de utilidad para los jóvenes científicos del mundo hispanohablante.

Me gustaría dedicar la traducción de este volumen a mi esposa y a mis dos hijas, para quienes el castellano es una de nuestras lenguas comunes.

John Plaice, Bogotá, julio de 2026

https://johnplaice.substack.com

[1] El primer volumen se publicó en inglés, francés, portugués, italiano y ruso: [Ass10a], [Ass10b], [Ass15b], [Ass17] y [Ass26a]. El segundo volumen se publicó en inglés, francés, portugués y ruso: [Ass18a], [Ass18b], [Ass19] y [Ass26b].

[2] Why the CMB Is Evidence Against the Big Bang. https://youtu.be/bboKmG0uUuU.

[3] [Ass22], [AB23]; [AC11], [AC15]; [Ass21a], [Ass21b], [Ass21c], [Ass21d], [Ass24], [Ass25a], [Ass25b], [Ass25c] y [Ass25d].

Presentación y agradecimientos

Reproducimos aquí, con algunas modificaciones, la presentación incluida en el volumen 1 de esta obra.[4]

A principios de la década de 1990, descubrí los trabajos de Norberto Cardoso Ferreira, del Instituto de Física de la Universidad de São Paulo (USP), en Brasil. Uno de sus campos de investigación consistía en demostrar experimentalmente los aspectos más importantes de la electricidad utilizando materiales muy sencillos y fácilmente disponibles. Tuve la oportunidad de visitarlo en la USP en 1993. Durante esa visita, me regaló un pequeño conjunto de material experimental compuesto por cartón fino, pajitas de plástico, papel de seda, tensores de papel, etc. Me enseñó a realizar los principales experimentos y también me presentó su libro *Plus et Moins : Les Charges Électriques* («Más y menos: las cargas eléctricas»).[5] Me fascinó lo que aprendí, al darme cuenta de que era posible visualizar experimentalmente fenómenos físicos muy profundos utilizando materiales fáciles de encontrar. Guardé ese material como un tesoro durante 10 años, pero no lo utilicé ni desarrollé durante ese tiempo. Estoy muy agradecido a Norberto Ferreira por lo que me enseñó. Recientemente, descubrí otros trabajos de Ferreira, siempre tan ricos y creativos.[6] También aprendí mucho en conversaciones con sus alumnos, como Rui Manoel de Bastos Vieira y Emerson Izidoro dos Santos.

En 2005, conocí a Alberto Gaspar y descubrí su libro *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*.[7] También aprendí mucho de este libro y de otras obras suyas.[8]

Entre 2004 y 2007, impartí cursos a profesores de ciencias de secundaria en el marco del proyecto «Teia do Saber» del Ministerio de Educación del Estado de São Paulo en Brasil. Fue un gran privilegio que me invitaran a participar en este proyecto. El apoyo que recibí del Ministerio de Educación y del grupo de coordinación de proyectos educativos de la Universidad de Campinas (GGPE-UNICAMP), así como los enriquecedores contactos con los profesores de ciencias de secundaria que asistieron a nuestros cursos, fueron extremadamente productivos y estimulantes para mí.

[4] [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[5] [FM91].
[6] [Fer78], [Fersda], [Fersdb], [Fersdc], [Fersdd], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] y [Fer01a].
[7] [Gas03].
[8] [Gas91] y [Gas96].

También me beneficié mucho de los numerosos intercambios de ideas con los profesores de la Universidad de Campinas que participaron en este proyecto. En el marco de mis actividades, decidí enseñar a los profesores de ciencias de secundaria lo que había aprendido con Norberto Ferreira. Así que retomé los experimentos con el objetivo adicional de escribir este libro, para compartir todo este fascinante material con un público más amplio.

La mayoría de los experimentos descritos en este libro se inspiran en los trabajos originales de los científicos aquí mencionados, así como en los libros y artículos de Norberto Ferreira y Alberto Gaspar. Desde 2004, descubrí otras obras impresas y sitios web interesantes que me fueron de gran utilidad en mi aprendizaje en este campo, como el sitio *Feira de Ciências*, organizado por Luiz Ferraz Netto.[9]

John L. Heilbron sugirió mejoras pertinentes en la primera versión del volumen 1 de esta obra. Su excelente libro, *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics*,[10] fue mi principal fuente de información histórica sobre electrostática. Arthur Baraov, Sérgio Luiz Bragatto Boss, Juliano Camillo, Daniel Gardelli, Robert W. Gray, John B. Eichler, Steve Hutcheon, C. Roy Keys, Breno Arsioli Moura, Anabel Cardoso Raicik, Fabio Miguel de Matos Ravanelli, João Ricardo Neves da Silva y Bertrand Wolff.

Agradezco a Arthur Baraov por las traducciones al ruso de los dos volúmenes de esta obra,[11] así como a Pietro Cerreta, Andrea Cerreta, Raffaele Cerreta, Rita Serafini y Riccardo Urigu por la traducción y publicación de este libro en italiano.[12] Pietro Cerreta, Derk Frerichs y Stephan Pfeiler realizaron varios vídeos basados en los experimentos presentados en este libro.[13] También agradezco a Fernando Lang da Silveira y Jenaro Guisasola sus críticas de esta obra.[14]

Las ilustraciones del volumen 1 de esta obra fueron realizadas por Daniel Robson Pinto, gracias a una beca concedida por SAE-UNICAMP, a quien agradecemos su apoyo. Daniel también contribuyó a la obtención de ilustraciones y referencias antiguas.

También quiero dar las gracias a otras personas por sus sugerencias, debates y referencias: Dayane de Souza Bancoff, Christine Blondel, Paolo Brenni, Thiago Augusto de Lima Burgo, João José Caluzi, Hugo Bonette de Carvalho, Danylo do Amaral Cavalcanti, João Paulo Martins de Castro Chaib, Asit Choudhuri, Roberto Clemente (in memoriam), Silvio Dahmen, Charbel El-Hani, Henrique Ennes, Moacir Pereira de Souza Filho, Junichiro Fukai, Cláudio H. Furukawa, Hans Gaab, Fernando Galembeck, Robert Harry van Gent, Harald Goldbeck-Löwe, Jürgen Gottschalk, Jenaro Guisasola, Hermann Härtel, Peter Heering, Elizabeth Ihrig, Antonio Iovane, John Jenkins, Basilio José Augusto José, Kostas Kampourakis, Siegfried Kett, Martin Kostal, Ellen Kuhfeld, Wolfgang Lange, Fabio Menezes de Souza Lima, Lin Liu, José Joaquín Lunazzi, Ceno Pietro Magnaghi, Francisco das Chagas Marques, Thiago Marques, Michael Matthews, Alexandre Medeiros, Eduardo Meirelles, Manoel Guilherme da Silva Mello, Mahmoud Melehy (in memoriam), Paulo Henrique Dias Menezes, Dennis Nawrath,

[9] [Netsd].
[10] [Hei99].
[11] [Ass15b] y [Ass19].
[12] [Ass17].
[13] [Cer14a], [Cer14b], [Cer17] y [FPsd].
[14] [Sil10c] y [Gui12].

Marcos Cesar Danhoni Neves, Horst Nowacki, Ronaldo Furtado de Oliveira, Martin Panusch, Sônia Peduzzi, Luiz O. Q. Peduzzi, José Rafael Boesso Perez, Gerald H. Pollack, Eugênio Maria de França Ramos, Karin Reich, Edson Eduardo Reinehr, Ricardo Rodrigues, Waldyr Alves Rodrigues Jr. (in memoriam), Torsten Rüting, Dirceu Tadeu do Espírito Santo, Emely Giron dos Santos, Wayne M. Saslow, Daniel dos Anjos Silva, Carlos Augusto Silva, Valter Aparecido da Silva Junior, Leandro Herculano da Silva, Fernando Lang da Silveira, Moacir Pereira de Souza Filho, Julian David Medina Tamayo, Milton G. Tarazona, Christian Ucke, Alvaro Vannucci, Geraldo Magela Severino Vasconcelos, Haroldo Fraga Campos Velho, Greg Volk, Karl-Heinrich Wiederkehr (in memoriam), Bernd Wolfram y Gudrun Wolfschmidt.

Quiero expresar mi agradecimiento a los institutos de física y matemáticas, al grupo de coordinación de proyectos educativos y al Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAEPEX) de la Universidad de Campinas (UNICAMP), que me brindaron apoyo necesario para la realización de este trabajo. También agradezco al Instituto de Historia de las Ciencias Naturales de la Universidad de Hamburgo y a la Fundación Alexander von Humboldt de Alemania por concederme una beca de investigación en 2009, durante la cual recopilé una cantidad considerable de documentación bibliográfica para este libro.

Roy Keys, editor jefe de Apeiron, me ha prestado su apoyo durante muchos años. Sin su aliento, algunos de mis libros quizá nunca hubieran visto la luz. Ha realizado un excelente trabajo editorial en esta obra.

Andre Koch Torres Assis
Institute of Physics
University of Campinas—UNICAMP
Rua Sergio Buarque de Holanda 777
13083–970 Campinas - SP, Brazil
https://www.ifi.unicamp.br/~assis

Capítulo 1

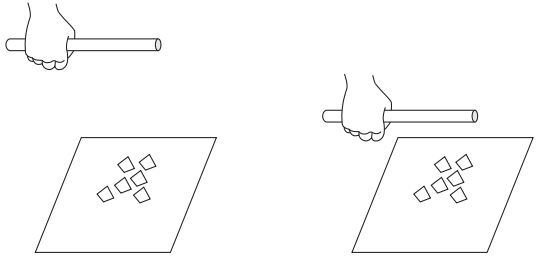
Introducción

1.1 El efecto del ámbar

Experimento 1.1 — *Electrizar un cuerpo por fricción*

El experimento más sencillo y antiguo sobre la electricidad, que dio origen a este campo de investigación, se denomina «efecto del ámbar».[1] Inicialmente se realizó con ámbar («electrón» en griego), que es una resina fósil dura. Aquí se reproducirá con una pajita de plástico o una regla acrílica. Este comportamiento también se denomina «efecto triboeléctrico» o «triboelectricidad». El prefijo «tribo» también tiene origen griego y significa fricción o roce. Este efecto está relacionado con la electrización de los cuerpos que se obtiene mediante la fricción.

Coloque unos trozos de papel sobre una mesa. Acerque una regla acrílica o una pajita de plástico a los trozos de papel, sin tocarlos. No ocurre nada con estos trozos, figura 1.1.



(a) (b)

Figura 1.1: (a) La pajita de plástico se aleja de los trozos de papel. (b) Cuando la pajita de plástico se acerca a estos trozos, estos no sufren ningún efecto.

Ahora frote la regla o la pajita con el cabello, una hoja de papel o un paño de

[1] Experimento 2.1 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

algodón, moviéndolo rápidamente de arriba abajo. Representamos la parte de la pajita que fue frotada con la letra F, tomada de la palabra «fricción», figura 1.2.

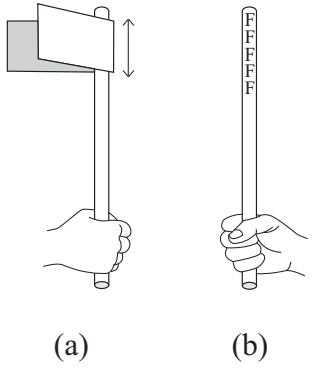


Figura 1.2: (a) Pajita de plástico frotada con papel. (b) La letra F representa la zona frotada de la pajita.

Acérquese la pajita frotada a los trozos de papel, sin tocarlos, manteniéndose muy cerca. Observe que, a cierta distancia, saltan sobre la pajita frotada y se quedan adheridos a ella, figura 1.3. Cuando la pajita se aleja de la mesa, los trozos permanecen adheridos a ella.

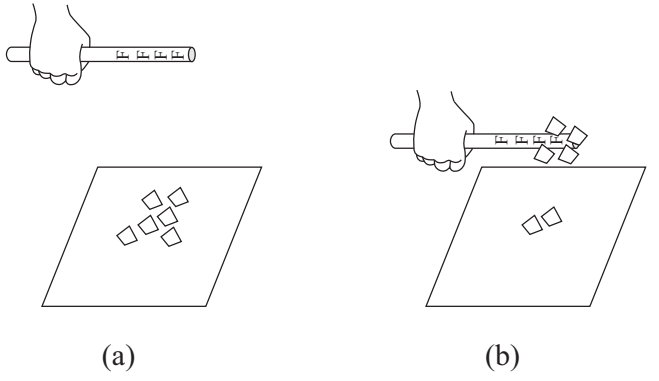


Figura 1.3: (a) Una pajita frotada con pequeños trozos de papel. (b) La pajita frotada atrae los trozos cuando se acerca a ellos.

No todos los trozos de papel permanecen adheridos a la pajita frotada. Algunos de ellos tocan la pajita y caen. Otros son emitidos o reflejados hacia la mesa. Este tema se trata con más detalle en la sección 4.4.

El comportamiento diferente de los trozos de papel cuando están cerca de estas pajitas conduce a una definición importante.

Definición 1.1

Decimos que el plástico que no fue frotado y que no atrae los trozos de papel es «eléctricamente neutro», «neutro» o que tiene «carga nula». Cuando se frotó y adquirió la capacidad de atraer trozos de papel, decimos que «adquirió una carga eléctrica», que «se electrizó», que está «cargado eléctricamente» o, simplemente, «cargado». El proceso de fricción se denomina «efecto triboeléctrico», «triboelectrización», «carga obtenida por fricción», «carga por fricción», «electrización por fricción» o «electrización por roce». Esta atracción se denomina a veces «atracción eléctrica» o «atracción electrostática».

1.2 La serie triboeléctrica

Como se indica en el volumen 1 de esta obra,[2], existen dos tipos de cuerpos electrizados, generalmente denominados cuerpos positivos y negativos. Cuando dos cuerpos neutros diferentes se frotan entre sí, uno de ellos se carga positivamente y el otro negativamente. Si uno de estos cuerpos es conductor, solo permanecerá cargado si está aislado del suelo. Después de realizar numerosos experimentos, llegamos a la tabla 1.1.

Esta tabla debe interpretarse de la siguiente manera: cuando el cuerpo *I* se frota contra el cuerpo *II*, el que se carga positivamente es el que se encuentra encima del otro. Es decir, el cuerpo más cercano al símbolo «+» se cargará positivamente, mientras que el otro cuerpo se cargará negativamente. Por ejemplo, cuando se frota una pajita de plástico contra seda, la seda se carga positivamente y el plástico negativamente.

Definición 1.2

Una lista como la tabla 1.1 se denomina «serie triboeléctrica». El prefijo «tribo» proviene del griego y significa «fricción» o «acto de frotar». Una serie triboeléctrica indica los tipos de electrización que se obtienen mediante la fricción.

Una pajita de plástico y una regla acrílica se cargan negativamente cuando se frotan con el cabello o una hoja de papel. Por lo tanto, a partir de ahora, una pajita de plástico y una regla acrílica se representarán como si tuvieran cargas negativas (o se cargaran negativamente) cuando se frotan contra estos materiales.

1.2.1 La posición del agua en la serie triboeléctrica

Los líquidos también se cargan cuando fluyen por canales sólidos.[3] Desde 1675 se sabía que, al agitar un barómetro de mercurio en la oscuridad, aparecían destellos de luz en el espacio evacuado en la parte superior del mismo. Más tarde se descubrió que estas luces procedían de la carga estática que se desarrollaba en el mercurio cuando se desplazaba contra las paredes de cristal del barómetro. En 1840, el conductor de una

[2] Capítulo 5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[3] [Gre94].

Tabla 1.1: Serie triboeléctrica

+
cabello
vidrio liso
piel humana
poliamida sintética
algodón
seda
papel o cartón fino
cuero
porcelana
papel de aluminio
madera
corcho
tejido acrílico
poliestireno
bolsa de plástico
pajita de plástico
acrílico rígido
tubo de PVC
goma dura
−

locomotora de vapor recibió una descarga eléctrica cuando acercó la mano al chorro de vapor a alta presión que salía de la caldera, mientras tocaba la caldera con la otra mano. William Armstrong (1810–1900) estudió este fenómeno. Aisló eléctricamente la caldera del suelo y dirigió el chorro hacia un conductor metálico aislado. El conductor se cargó positivamente, mientras que la caldera se cargó negativamente. En 1843, construyó un generador hidroeléctrico basado en este principio. Michael Faraday (1791–1867) también estudió este fenómeno alrededor de 1843. Demostró que la electrización se debía a la fricción entre el vapor y las gotas de agua expulsadas por la caldera que rozaban las paredes de la tobera. Un chorro de aire seco no producía ningún efecto, pero se generaba electricidad cuando se utilizaba aire húmedo. El signo de la carga producida en el agua podía modificarse eligiendo un material adecuado para la boquilla. También concluyó que la excitación de la electricidad era claramente independiente de la evaporación o del cambio de estado del agua (de líquido a vapor). Además, para recoger una buena cantidad de electricidad, era necesario utilizar agua pura o destilada. El agua corriente suministrada en Londres era incapaz de producir electricidad, al igual que la adición de sustancias conductoras al agua pura. Explicó este hecho diciendo que cuando el agua se convertía en un buen conductor, la electricidad producida por su fricción contra el metal u otro cuerpo podía descargarse inmediatamente de nuevo. Cuanto más aislante era el agua, mayor era la electricidad

recogida por fricción. Al comparar la posición del agua en la serie triboeléctrica con la de otras sustancias, llegó a la conclusión de que el agua se situaba cerca de la cima de la lista. Cuando fluía contra superficies sólidas, normalmente se electrizaba de forma positiva, mientras que el material sólido se volvía negativo. Presentó una de sus conclusiones de la siguiente manera:[4,5]

> 2107. Tras haber presentado así el resultado de la fricción del vapor y el agua contra tantos cuerpos, puedo destacar aquí la circunstancia notable de que el agua es *positiva* para todos. Es muy probable que ocupe un lugar por encima de todas las demás sustancias, incluso del pelo de gato y del oxalato de calcio (2131).

Las investigaciones modernas confirman estos resultados. Recientemente, Burgo, Galembeck y Pollack utilizaron agua que fluía por tubos de diferentes materiales y concluyeron que la carga del agua siempre es positiva, excepto cuando cae al aire.[6]

Robert Andrews Millikan (1868–1953) utilizó la electrización por flujo en sus famosos experimentos con gotas de aceite para determinar la carga del electrón. Las gotas se electrizaron cuando se pulverizaron en la cámara experimental. En su libro de 1917, *The Electron*, menciona lo siguiente:[7,8]

> Las gotas [...] resultaron estar muy cargadas por el proceso de fricción al soplar el chorro [de aceite] [a través de un pequeño orificio] [...]

En muchas series triboeléctricas que se encuentran en la literatura y en Internet, el aire aparece en primer lugar en el lado positivo de la lista, incluso por delante del agua y otros materiales.

1.3 Datos sencillos y básicos sobre la electricidad

El volumen 1 de esta obra presentó los fundamentos experimentales y conceptuales de la electricidad. Cada tema se introdujo con algunos experimentos sencillos. Los conceptos básicos se formularon a partir de los resultados de estos experimentos. La sección 8.2 del volumen 1 enumeró los hechos o principios simples y primitivos relacionados con la electricidad.[9] Esta sección vuelve a presentar estos hechos fundamentales, sin explicarlos, sino describiendo únicamente los principios observados en el comportamiento de los cuerpos. Aquí se tratan como conceptos primitivos. Pueden utilizarse para explicar otros fenómenos y experimentos más complejos, aunque estos hechos fundamentales no se expliquen. Nunca es posible explicarlo todo. Siempre debemos partir de algunos conceptos fundamentales y fenómenos inexplicables

[4] [Far43a, article 2107].

[5] 2107. Having thus given the result of the friction of the steam and water against so many bodies, I may here point out the remarkable circumstance of water being *positive* to them all. It very probably will find its place above all other substances, even cat's hair and oxalate of lime (2131).

[6] [BGP16] y [GB17, section 6.5].

[7] [Gre94] y [Mil17, p. 66].

[8] The droplets [...] were found in general to have been strongly charged by the frictional process in blowing the [oil] spray [through a small orifice] [...]

[9] Sección 8.2 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

que deben considerarse hechos reales de la naturaleza. Estos principios fundamentales pueden utilizarse posteriormente para explicar fenómenos más complejos y otras observaciones de la naturaleza. Siempre debemos partir de algunos principios o postulados fundamentales. Estos principios pueden utilizarse para deducir otros resultados. Estos son los hechos o principios simples y primitivos relacionados con la electricidad:

1. Los cuerpos naturales pueden encontrarse en tres estados diferentes, a saber: (a) eléctricamente neutros, no electrizados, descargados o sin carga eléctrica; (b) cargados positivamente o electrizados positivamente; y (c) cargados negativamente o electrizados negativamente. Tienen respectivamente una carga nula, una carga positiva y una carga negativa. Por «carga eléctrica», ya sea positiva o negativa, se entiende un «cuerpo electrizado» o una «partícula electrizada». Los cuerpos en estos tres estados diferentes tienen, respectivamente: (a) una carga neta nula, una carga resultante nula o una carga total nula; (b) una carga neta positiva, una carga resultante positiva o una carga total positiva; y (c) una carga neta negativa, una carga resultante negativa o una carga total negativa.

2. Estos estados se caracterizan por el comportamiento observado de los cuerpos. Dos cuerpos neutros no se atraen ni se repelen, excepto cuando están polarizados (esta condición de polarización se aclarará en otro punto). Existe una atracción entre un cuerpo positivo y un cuerpo inicialmente neutro. También existe una atracción entre un cuerpo negativo y un cuerpo inicialmente neutro.

3. Los cuerpos con cargas de signo opuesto se atraen mutuamente. Los cuerpos con cargas del mismo signo normalmente se repelen, pero en algunas situaciones también pueden atraerse mutuamente.[10]

4. Estas fuerzas de atracción y repulsión aumentan en intensidad cuando disminuye la distancia entre los cuerpos que interactúan. La intensidad de estas fuerzas también aumenta cuando aumenta la fuerza de la carga en los cuerpos (o cuando hay un aumento de la electrización de estos cuerpos). Estas fuerzas son mutuas, actuando con la misma intensidad sobre los dos cuerpos en interacción. Se dirigen a lo largo de la línea recta que une los cuerpos, aunque actúan en direcciones opuestas en cada cuerpo. Se denominan fuerzas electrostáticas o coulómbicas.

5. Los cuerpos se pueden dividir en dos grupos denominados conductores y aislantes. La principal diferencia entre estos dos grupos es que los conductores tienen partículas electrizadas móviles que pueden desplazarse por todo el volumen del conductor. Los conductores permiten el paso o el flujo de cargas eléctricas a través de su cuerpo y a lo largo de su superficie. Los aislantes, por el contrario, no tienen partículas electrizadas móviles que puedan desplazarse a lo largo del cuerpo del aislante. Las partículas electrizadas que pertenecen a los aislantes solo pueden desplazarse dentro de sus moléculas. Los aislantes no permiten el paso o el flujo de cargas a través de su cuerpo ni a lo largo de su superficie.

6. Los conductores y los aislantes pueden ser eléctricamente neutros, positivos o negativos.

[10] Como muestran los experimentos de la sección 7.10 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

7. Los cuerpos se pueden clasificar en conductores y aislantes utilizando un electroscopio cargado, como se describirá en la sección 3.1. Un extremo del cuerpo debe tocar el cartón del electroscopio, mientras que el otro extremo del cuerpo debe estar en contacto con el suelo. Los cuerpos que descargan el electroscopio se denominan conductores, mientras que los cuerpos que no descargan el electroscopio se denominan aislantes.

8. Cuando un conductor cargado toca el suelo, se descarga. Este proceso se denomina puesta a tierra. La misma descarga no se produce en el caso de un aislante cargado que toca el suelo.

9. La mayoría de los cuerpos sólidos y líquidos se comportan como conductores en los experimentos habituales de electrostática, solo unos pocos son aislantes. Lista de algunos aislantes: aire seco, ámbar, seda, aceite vegetal, la mayoría de los plásticos y resinas.

10. Los cuerpos también se pueden clasificar en conductores y aislantes utilizando un comprobador de circuitos, tal y como se describe en la sección 3.2. Montamos un circuito que contiene un trozo de alambre A, una batería, un trozo de alambre intermedio, una bombilla y otro trozo de alambre B. Conecta los alambres A y B al cuerpo sometido a prueba. Cuando la bombilla se enciende, el cuerpo sometido a prueba se denomina conductor. Cuando la bombilla no se enciende, el cuerpo sometido a prueba se denomina aislante.

11. Un cuerpo que se comporta como aislante cuando se somete a una pequeña diferencia de potencial eléctrico (generalmente hasta unos pocos cientos de voltios) puede comportarse como conductor cuando esta diferencia de potencial supera un determinado valor. En los experimentos habituales de electrostática, tratamos con diferencias de potencial elevadas, que suelen oscilar entre 1000 y 10 000 voltios. En estos casos, la mayoría de los cuerpos sólidos y líquidos se comportan como conductores, mientras que solo algunos de ellos se comportan como aislantes.

12. El comportamiento de un cuerpo como conductor o aislante también depende de otros factores. Supongamos que un extremo del cuerpo toca el cartón de un electroscopio cargado, mientras que el otro extremo del cuerpo toca el suelo. Los factores que influyen en las propiedades de este cuerpo son los siguientes: (a) El intervalo de tiempo necesario para descargar el electroscopio (cuanto más largo sea el tiempo de contacto, mayor será la cantidad de descarga). (b) La longitud del cuerpo (cuanto mayor sea esta longitud, más lenta será la descarga). (c) La sección transversal del cuerpo (cuanto mayor sea esta sección, más rápida será la descarga). El capítulo 3 de esta obra presenta un estudio detallado de estos factores.

13. Los cuerpos neutros pueden cargarse mediante varios mecanismos. El procedimiento más habitual es el roce de dos cuerpos neutros. Estos dos cuerpos pueden ser dos aislantes, dos conductores o un aislante y un conductor. Tras el roce, uno de los cuerpos rozados se vuelve positivo y el otro negativo. Cuál se

volverá positivo o negativo dependerá de su ubicación en la serie denominada triboeléctrica. Esta serie se establece empíricamente. Además, para recoger las cargas del conductor que se frota, este debe estar completamente aislado del suelo. Por ejemplo, se puede sujetar con un mango aislante.

14. Los aislantes solo se cargan en la parte frotada de su superficie. Por el contrario, las cargas adquiridas por los conductores frotados se distribuyen por su superficie exterior cuando los conductores están completamente rodeados de aislantes. Si el conductor frotado está conectado a tierra (directamente o a través de otro cuerpo conductor), la carga que adquirió por fricción es neutralizada inmediatamente por la tierra.

15. Un conductor neutro también puede adquirir una carga de un aislante electrizado cuando entran en contacto entre sí, sin ningún tipo de fricción. Un ejemplo de este proceso es el uso de un disco de papel suspendido de un hilo de seda en un péndulo eléctrico. El disco de papel es atraído por un plástico electrizado cercano, toca este plástico y luego es repelido por él. Este mecanismo se denomina *ACR*, es decir, atracción, comunicación de electricidad y repulsión. La sección 4.4 analiza este mecanismo. La carga adquirida por el conductor tiene el mismo signo que la carga del aislante electrizado. En este proceso, la cantidad de carga perdida por el aislante es igual a la ganada por el conductor. Por otra parte, la cantidad de carga adquirida por un aislante neutro cuando toca otro aislante electrizado es insignificante cuando no hay fricción entre ellos, siempre que no se froten entre sí.

16. Los conductores aislados del suelo se polarizan eléctricamente en presencia de un cuerpo cargado cercano. La parte del conductor más cercana al cuerpo cargado se carga con un signo opuesto al del cuerpo cargado cercano. La parte más alejada del conductor se carga con el mismo signo que el cuerpo cercano cuando el conductor está aislado eléctricamente. Si el conductor está aislado y las dos partes están separadas en presencia del cuerpo cargado cercano, las dos partes se cargan eléctricamente con cargas de signo opuesto.

17. Si el conductor está conectado a tierra eléctricamente en presencia del cuerpo cargado cercano, la parte del conductor más cercana al cuerpo cargado se carga eléctricamente con una carga de signo opuesto al del cuerpo cargado cercano. La parte del conductor más alejada del cuerpo cargado será neutralizada por la Tierra. Si a continuación eliminamos la conexión a tierra mientras el cuerpo cargado permanece cerca del conductor, el conductor se cargará con una carga de signo opuesto al del cuerpo cercano.

18. Las moléculas de un aislante se polarizan en presencia de un cuerpo cargado cercano. La parte de cualquier molécula que está más cerca (más lejos) del cuerpo cargado se carga con un signo opuesto (idéntico) al del cuerpo cargado. Estas cargas polarizadas se limitan a las moléculas y no se desplazan a lo largo del aislante. Además, no pasan a otro conductor que entre en contacto con el aislante.

19. El número de partículas positivas y negativas en los conductores polarizados cercanos a un cuerpo cargado aumenta a medida que disminuye la distancia entre el conductor y el cuerpo cargado. Lo mismo ocurre con las cargas polarizadas efectivas de los aislantes cercanos a un cuerpo cargado.

20. La polarización de los conductores y aislantes es mayor cuando aumenta el grado de electrización del cuerpo cargado cercano.

21. Una fuerza de origen no electrostático mantiene las partículas electrizadas en la superficie de los conductores y aislantes en reposo cuando estos cuerpos están electrizados o polarizados.

22. Una fuerza de origen no electrostático también es responsable de la generación de cargas opuestas cuando dos cuerpos se frotan entre sí. El capítulo 14 presenta ejemplos de varias situaciones que requieren la existencia de estas fuerzas de origen no electrostático.

Cuando describimos estos hechos sencillos, hay que tener en cuenta que hablamos en términos generales, refiriéndonos implícitamente a los experimentos descritos en el volumen 1 de esta obra. Todos estos efectos dependen del orden de magnitud implicado en los experimentos, siempre hay excepciones en todas las descripciones experimentales. Por ejemplo, cuando decimos que dos cuerpos neutros no interactúan entre sí, no tenemos en cuenta las atracciones gravitacionales entre ellos. La razón es que esta interacción gravitacional no es observable por nuestros sentidos ni puede detectarse en experimentos ordinarios con cuerpos pequeños y ligeros. La gravedad solo muestra su efecto cuando al menos uno de los cuerpos tiene dimensiones astronómicas, como el planeta Tierra. Cuando decimos que un cuerpo cargado atrae a un cuerpo inicialmente neutro, suponemos que los cuerpos son ligeros o están sostenidos por hilos, de modo que solo hay una pequeña resistencia al movimiento lateral de estos cuerpos. Si este es el caso, estos cuerpos inicialmente neutros podrán desplazarse hacia el cuerpo cargado cuando exista una atracción entre ellos. Además, para que esta atracción sea observable, la distancia entre los cuerpos en interacción no debe ser muy grande y la carga del cuerpo frotado no debe ser muy débil, de lo contrario estos efectos no son perceptibles. Se aplican condiciones similares a los demás principios.

1.3.1 No explicamos estos hechos, simplemente los enumeramos

Estos hechos simples y primitivos relacionados con la electricidad no fueron explicados. Del mismo modo, hay varios elementos que no fueron justificados:

- La existencia de dos tipos de electricidad (positiva y negativa) en lugar de uno, tres, cuatro… o incluso un número infinito de tipos diferentes de electricidad.
- Las razones por las que las cargas de signo opuesto se atraen, mientras que las cargas del mismo signo se repelen.
- La razón por la que la fuerza electrostática depende de la distancia entre los cuerpos en interacción.

- Los mecanismos responsables de la electrización por fricción.
- El orden de la serie triboeléctrica. En otras palabras, no explicamos por qué un determinado cuerpo se electriza positivamente y otro negativamente cuando se frotan entre sí.
- El origen de la fuerza no electrostática responsable de la separación de cargas opuestas en el efecto del ámbar.
- La razón por la que algunos cuerpos se comportan como conductores mientras que otros se comportan como aislantes.
- La razón por la que la conductividad de un cuerpo depende de varios factores, tales como: la diferencia de potencial que actúa entre sus extremos, la longitud y la sección transversal del cuerpo, su temperatura, etc.
- El origen de la fuerza no electrostática responsable de mantener en reposo las partículas electrizadas en los conductores y aislantes que están cargados o electrizados.
- Etc.

1.3.2 Significado de algunas expresiones

Cabe mencionar aquí una distinción pertinente presentada por Gaspar en relación con ciertas expresiones sencillas que se utilizan habitualmente en los manuales de física, a saber:[11]

Algunos autores mencionan que «una masa m ejerce una fuerza» o que «una carga q ejerce una fuerza». Ambas expresiones son físicamente incorrectas. La masa y la carga son propiedades de la materia, pero no son cosas en sí mismas. Un cuerpo, una partícula, un punto material o un concepto similar es la entidad que puede ejercer una fuerza sobre otro cuerpo. Un cuerpo tiene masa y puede tener carga eléctrica. Pero no hay masa sin cuerpo. Del mismo modo, no hay carga sin cuerpo. Por lo tanto, si queremos hablar correctamente, es incorrecto mencionar una «masa m» o una «carga q» sin hacer referencia al cuerpo que lleva esa masa o carga eléctrica. Normalmente, el cuerpo que lleva la masa o la carga se sobreentiende implícitamente en estas expresiones. En cualquier caso, la omisión del cuerpo cuando se hace referencia a una masa m o a una carga q no contribuye a la comprensión del concepto. Por eso debemos evitar estas expresiones.

Estamos de acuerdo con estos puntos de vista presentados por Gaspar.

Este libro solo presenta una descripción macroscópica de los fenómenos. No presentaremos en detalle el modelo atómico. A continuación, hablaremos de cuerpos electrizados o partículas electrizadas.

[11] [Gas00, p. 22] y [Gas13, p. 25].

Capítulo 2

Instrumentos eléctricos

Este capítulo presenta algunos de los principales instrumentos eléctricos utilizados en esta obra.

2.1 Lista del material necesario para los experimentos

A continuación enumeramos algunos de los principales materiales utilizados en los siguientes experimentos. Puede ser útil reunir estos elementos con antelación.

- Pajitas de plástico, una regla acrílica y un tubo de PVC.
- Servilletas de papel y bolsas de plástico.
- Cartón fino o cartulina.
- Papel (formato A4 o carta) y papel de aluminio.
- Papel de seda (utilizado para fabricar cometas o para envolver regalos frágiles).
- Bobina de hilo de seda (o bobina de hilo sintético de poliamida, como el nailon, o de poliéster).
- Bobina de hilo de algodón y cordón.
- Tensores de papel, alfileres, agujas y clavos.
- Tapones de corcho.
- Aceite vegetal de cocina.
- Brochetas de madera e hilos metálicos.
- Los soportes para los péndulos eléctricos y los electroscopios se fabrican con vasos de plástico finos, tensores de papel y pasta de yeso.

- Alambre de cobre aislado, pilas y bombillas de linterna.
- Lámpara de neón y LED (diodo electroluminiscente). Estos dos elementos no son imprescindibles.
- Cintas adhesivas (como cinta de oficina PSA, cinta mágica, cinta invisible, cinta adhesiva, cinta de celofán, cinta quirúrgica o médica, cinta eléctrica o aislante).
- Latas de bebida.
- Botellas de plástico (200 o 300 ml).
- Vasos de vidrio, metal y plástico.
- Molde para pizza, moldes para tartas de metal, cucharones de aluminio o hierro.
- Los electretos se fabrican a partir de parafina obtenida de velas o comprada en barras o pastillas. Algunos electretos se fabrican a partir de cera de carnauba, pero no es imprescindible adquirir este material si es difícil de encontrar.
- Otros materiales específicos descritos en las secciones correspondientes.

2.2 El electroscopio: el instrumento más importante de la electrostática

En el volumen 1 de esta obra, construimos varios aparatos eléctricos, a saber, el perpendiculo, el versorio metálico, el versorio de Du Fay, el péndulo eléctrico, el hilo pendular, el electroscopio y el colector de carga. El electroscopio es sin duda el instrumento más importante, ya que permite distinguir de forma práctica los conductores de los aislantes. Antes de comenzar cualquier experimento eléctrico o la construcción de cualquier aparato, pruebe los materiales que va a utilizar para saber si conducen la electricidad o no. Esta prueba es muy importante. Muchos experimentos no funcionan o no funcionan correctamente porque la gente no tiene en cuenta este aspecto crucial. Se podría pensar, por ejemplo, que un trozo de caucho será un aislante simplemente porque está hecho de caucho. Sin embargo, en realidad, muchos tipos de caucho se comportan como conductores en los experimentos electrostáticos. Si el cuerpo o el instrumento estudiado o utilizado está conectado a tierra a través de uno de estos trozos de caucho, no se acumulará carga eléctrica en el cuerpo o el instrumento debido a la conexión a tierra. Por lo tanto, los efectos eléctricos deseados no estarán presentes. La persona que realice este experimento, sin conocer este importante dato, se sentirá frustrada. No entenderá por qué el experimento falló ni por qué su instrumento no funciona correctamente.

El soporte que se utilizará en la mayoría de los experimentos con el electroscopio y el péndulo eléctrico es una taza para café de plástico fina. Haga un pequeño agujero en el fondo de la taza y pase las dos patas de un tensor de papel a través de él. La taza se coloca con la abertura hacia arriba. Llénela con pasta de yeso húmeda o cemento blanco húmedo. Se secará en esta posición. Se utilizará con la abertura de la taza hacia abajo y el tensor de papel hacia arriba, figura 2.1.

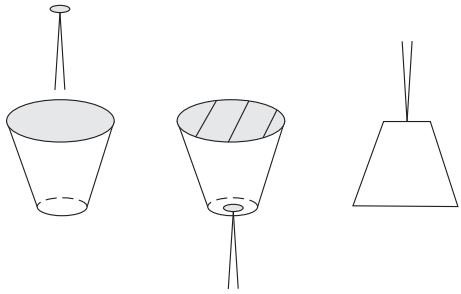


Figura 2.1: (a) Vaso de plástico fino y tensor de papel. (b) Vaso lleno de pasta de yeso húmeda. (c) Soporte para el péndulo eléctrico y el electroscopio.

También se pueden utilizar otros soportes. Por ejemplo, un trozo de plastilina en el que se clava un clavo (o un tensor de papel). El clavo se colocará dentro de la pajita para mantenerla en posición vertical. Por lo tanto, es conveniente elegir un clavo cuyo grosor y longitud sea adecuado.[1] Otro ejemplo es una tabla de madera, un plato o una taza de plástico o poliestireno con un agujero en el centro para fijar la pajita en posición vertical.[2]

Aquí presentamos el electroscopio simple utilizado en todos los experimentos del volumen 1 de esta obra, figura 2.2:[3]

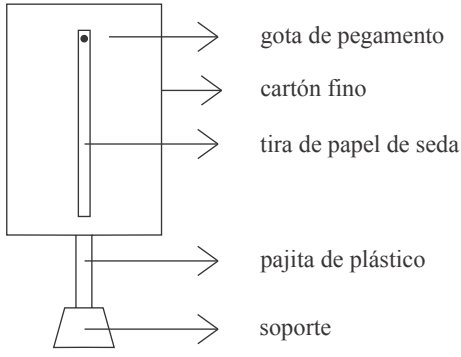


Figura 2.2: Electroscopio visto de frente.

El cartón fino puede tener, por ejemplo, lados de 7 cm por 10 cm, siendo el lado más largo el vertical. Fije el rectángulo a una pajita de plástico con dos trozos de cinta adhesiva. La cinta debe aplicarse en la parte posterior del rectángulo, sin sobresalir de los bordes. El extremo superior de la pajita debe quedar cerca del borde superior del

[1] [FM91, p. 10], [Fersdb, Material para experiências em eletrostática, pp. 1–2], sección 4.4 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[2] [Gas03, pp. 225–6].

[3] Secciones 6.1 y 6.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

rectángulo, sin sobrepasarlo. Corte una pequeña tira de papel de seda, de 1 a 3 mm de ancho y de 6 a 9 cm de largo. Los efectos descritos en este libro son más visibles cuando se utiliza una tira muy fina y ligera. El papel de seda puede ser el que se utiliza para fabricar cometas o para envolver regalos frágiles. Pegue el extremo superior de esta tira en el centro de la parte superior del rectángulo. La tira no debe estar doblada y no debe sobrepasar el borde inferior del rectángulo. En lugar de pegamento, la tira también se puede fijar con un pequeño trozo de cinta adhesiva, siempre que esta no sobrepase el borde del rectángulo, figura 2.3.

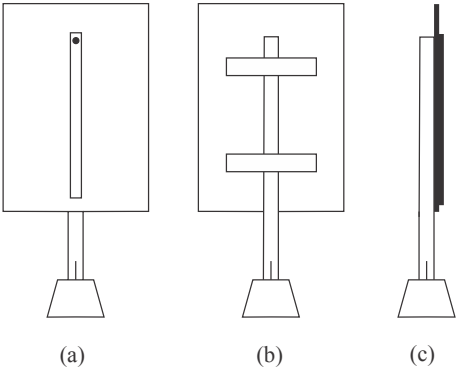


Figura 2.3: (a) Electroscopio clásico visto desde delante. (b) Vista trasera. (c) Vista de perfil.

2.2.1 Componentes principales de un electroscopio

El cartón fino y la tira de papel de seda se comportan como conductores en los experimentos habituales de electrostática. El aire seco alrededor del electroscopio actúa como aislante. La pajita de plástico que sostiene el rectángulo también actúa como aislante, lo que la convierte en el elemento más importante del electroscopio. Impide la descarga del electroscopio hacia el suelo. La figura 2.4 muestra los componentes principales de un electroscopio.

La pajita de plástico no puede sustituirse por un palito de madera o un alambre metálico. De hecho, estos dos materiales son conductores electrostáticos. Si un palito de madera sustituyera a la pajita de plástico, el electroscopio se descargará siempre al suelo en cuanto se raspe su cartón con una regla acrílica electrizada. Por lo tanto, sería imposible mantenerlo electrizado después de rasparlo.

2.2.2 Comparación entre el electroscopio de hojas de oro y el electroscopio fabricado con materiales económicos

Los manuales modernos presentan el electroscopio cuando tratan los conductores y aislantes, o cuando abordan la electrización por inducción o polarización. Por lo general, solo mencionan el electroscopio de hojas de oro. Este cuenta con dos hojas

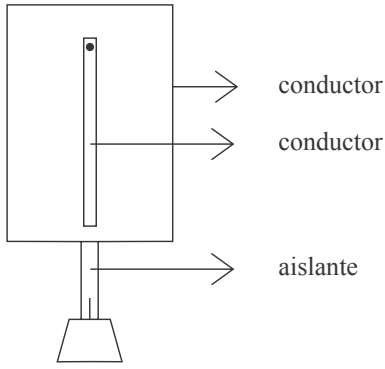


Figura 2.4: Componentes de un electroscopio.

de oro móviles que se abren cuando se electrizan. Estos manuales no suelen explicar cómo fabricar un electroscopio con materiales sencillos y baratos.

Sin embargo, el electroscopio que se presenta en esta sección funciona perfectamente, al igual que cualquier electroscopio de hojas de oro. Es extremadamente sensible. Su tira de papel de seda se levanta fácilmente, incluso cuando el instrumento está ligeramente electrizado. Esta tira es muy ligera. Solo está fijada al cartón por su extremo superior con una gota de pegamento. El resto de la tira puede separarse fácilmente del cartón, sin ningún obstáculo, tan pronto como el instrumento adquiere una pequeña cantidad de carga. La pajita de plástico es un excelente aislante, que evita la pérdida de carga hacia el suelo, especialmente en climas secos y fríos.

La principal ventaja de este sencillo instrumento frente al electroscopio de hojas de oro es que puede ser fabricado fácilmente por el profesor o por cada alumno. No cuesta casi nada. Es muy sensible y permite realizar innumerables experimentos. Esto ofrece una gran autonomía a los alumnos. Gracias a él, pueden adquirir fácilmente conocimientos de primera mano sobre la electricidad.

Un alumno normal no intentará construir un electroscopio de hojas de oro. Al fin y al cabo, este instrumento debe de ser extremadamente caro, ya que contiene oro. Este simple hecho sugiere que este aparato es difícil de construir y que debe de haber sido fabricado por especialistas. Muchos alumnos pueden incluso imaginar que hay un vacío dentro de la botella de vidrio que protege el electroscopio. La mayoría de los alumnos se muestran apáticos ante la descripción que se encuentra en los manuales. No estimula su creatividad ni sugiere que podrían construir un instrumento similar con materiales sencillos. Muchos de ellos nunca probarán estos sencillos experimentos con sus propias manos, limitándose a las descripciones que se encuentran en los manuales.

2.2.3 El electroscopio y el descubrimiento de los rayos cósmicos

Para ilustrar la importancia del electroscopio, mencionamos aquí el descubrimiento de los rayos cósmicos. Se sabía desde hacía mucho tiempo que un electroscopio cargado se descarga lentamente en el aire. Una de las razones de la conductividad del

aire es la presencia de iones cargados en la atmósfera, es decir, la existencia de partículas electrizadas móviles. En 1896, Henri Becquerel (1852–1908) comprobó que las sales de uranio emitían rayos ionizantes que aumentaban la conductividad del aire. Los rayos γ (radiación electromagnética de alta frecuencia), en particular, poseen esta propiedad ionizante. Penetran en el aire hasta una cierta distancia, hasta que interactúan con átomos neutros, ionizándolos. Para estudiar el origen de la ionización del aire, a principios del siglo XIX, los científicos comenzaron a estudiar la conductividad atmosférica a diferentes altitudes con respecto al suelo. La mayoría de los investigadores de la época pensaban que el origen de la radiación ionizante se encontraba en el interior de la Tierra, debido a la presencia de sustancias radiactivas. Las investigaciones fundamentales sobre este tema fueron realizadas por el científico Victor Franz Hess (1883–1964). Sus principales investigaciones sobre los rayos cósmicos se llevaron a cabo entre 1911 y 1913. Durante este periodo, realizó vuelos en globo equipados con electroscopios desarrollados por Theodor Wulf (1868–1946), en los que la electrización se indicaba mediante la distancia de separación entre dos alambres conductores. Hess electrizó sus electroscopios hasta una cierta distancia entre los alambres conductores y midió el intervalo de tiempo necesario para descargar los electroscopios en función de la altitud del globo. Realizó vuelos de hasta 5.3 km sobre el nivel del mar. Observó que el nivel de radiación disminuía hasta una altitud de aproximadamente 1 km y luego aumentaba considerablemente por encima de esa altura, alcanzando hasta el doble de la radiación a nivel del mar cuando se encontraba a una altitud de 5 km. Entonces concluyó que la principal radiación ionizante provenía del espacio y no tenía origen terrestre. También voló durante un eclipse solar y por la noche, y llegó a la conclusión de que el nivel de radiación era similar al observado durante el día y que el Sol no era la fuente de dicha radiación. Su conclusión final fue que la radiación que penetraba en la atmósfera, a la que denominó «ultrarradiación», procedía del espacio. El nombre actual, «radiación cósmica», fue introducido por Robert A. Millikan en 1925. Llevó a cabo investigaciones sobre los rayos cósmicos y el efecto fotoeléctrico, y recibió el Premio Nobel en 1923 por su medición de la carga del electrón, como se indica en la subsección 1.2.1. Hess recibió el Premio Nobel de Física en 1936 por su descubrimiento de la radiación cósmica, que compartió con Carl David Anderson (1905–1991), un físico estadounidense que descubrió el positrón en 1932.

El electroscopio fue esencial para crear un campo de investigación completamente nuevo en física: la radiación cósmica.

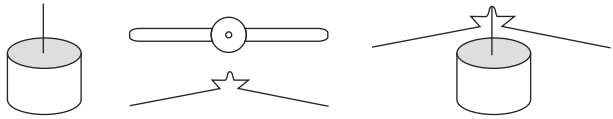
2.3 El versorio

Los instrumentos eléctricos más antiguos son el perpendiculo de Girolamo Fracastoro (1478–1553) y el versorio de William Gilbert (1544–1603).[4] A continuación presentamos los principales tipos de versorio.

[4] Capítulo 3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

2.3.1 El versorio metálico sostenido por un alfiler

Se puede fabricar un versorio sencillo a partir de un tensor de papel de latón o acero. El centro de la base circular del tensor debe estar ligeramente curvado. Se sostendrá por un alfiler fijado a una base rígida. Para doblar o deformar el centro del tensor, utilice un clavo y un martillo, pero con cuidado, sin perforar la parte superior del tensor, doblándolo ligeramente para crear una pequeña hendidura. El tensor se sostendrá mediante esta parte doblada colocada sobre la punta del alfiler, de modo que no se deslice. Una vez dobladas las patas del tensor hacia abajo, de modo que formen una V invertida, el tensor se puede colocar sobre el alfiler. Debe poder girar libremente alrededor del alfiler, figura 2.5.



(a) (b) (c)

Figura 2.5: Versorio metálico. (a) Base del versorio. (b) Tensor de papel de acero visto desde arriba y de lado. (c) El versorio montado.

2.3.2 El versorio metálico sostenido por un trozo de plástico puntiagudo

El versorio metálico de esta subsección está sostenido por una pieza de plástico puntiaguda. La principal diferencia con respecto al versorio de la subsección 2.3.1 es que el plástico actúa como aislante. De este modo, el tensor de papel quedará aislado del suelo, lo que le permitirá conservar su carga neta después de haber sido electrizado. Cuando un cuerpo electrizado se encuentra cerca, el versorio aislado se polariza.

Este versorio se fabrica en unos sencillos pasos. En primer lugar, corte un pequeño trozo de pajita de plástico de 5 cm de largo. Afile una de sus patas con unas tijeras y colóquelo sobre el soporte del electroscopio de la figura 2.1, como se muestra en la figura 2.6 (a). A continuación, monte el tensor de papel de la figura 2.5 (b) sobre este trozo de plástico afilado, tal y como se muestra en la figura 2.6 (c).

2.3.3 El versorio de plástico

La figura 2.7 representa el versorio de plástico. Su base, en este caso un clavo clavado en una tabla, aparece en la figura 2.7 (a). La figura 2.7 (b) muestra la parte móvil del versorio, en este caso una tira de plástico con un alfiler fijado en su centro, cuya punta está orientada hacia abajo. A esta parte móvil la llamaremos «sombrero» del versorio. Debe ser una tira de plástico. El alfiler está firmemente fijado en el centro del sombrero, con la punta orientada hacia abajo. El alfiler gira con el sombrero en relación con el suelo. Este sistema se sostiene mediante una pequeña superficie plana horizontal que está fija en relación con el suelo, como la cabeza de un clavo clavado

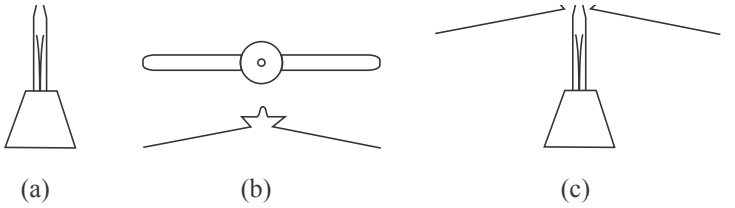


Figura 2.6: Versorio metálico sostenido por una pajita de plástico puntiaguda. (a) Soporte de la figura 2.1 con una pajita de plástico puntiaguda alrededor de las dos patas de un tensor de papel fijado en pasta de yeso. (b) Tensor de papel de acero visto desde arriba y de lado. (c) Versorio metálico montado sobre una pajita de plástico puntiaguda.

en una tabla o un tapón. El versorio completo aparece en la figura 2.7 (c), con la punta del alfiler apoyada en la cabeza horizontal del clavo clavado en una tabla.

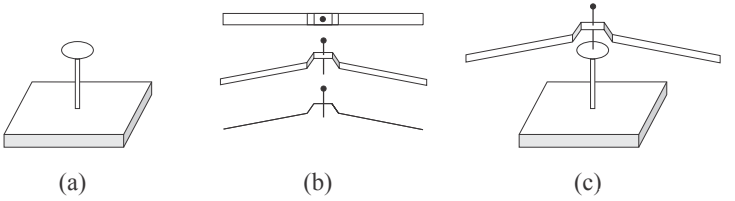


Figura 2.7: Versorio de plástico con el alfiler fijado en el centro de la tira aislante. (a) Base fija del versorio. (b) Tapa del versorio (tira de plástico) con el alfiler fijado en ella. (c) Versorio montado.

Importante: para evitar que el versorio se deslice, es esencial que el centro de gravedad del sombrero y del alfiler sea más bajo que la punta del alfiler.

2.3.4 El versorio de Du Fay

El versorio de Du Fay puede estar fabricado en plástico con un trozo de papel de aluminio en una de sus patas, figura 2.8.

2.3.5 Componentes principales de estos versorios

Los componentes principales de estos cuatro tipos de versorios se muestran en la figura 2.9.

En el caso de un versorio metálico sostenido por un alfiler metálico, figura 2.9 (a), hay una tira conductora horizontal (como el tensor de papel de acero) sostenida por un alfiler conductor vertical fijado a una tabla de madera o a un tapón. En otras palabras, todos los elementos de este versorio son conductores. El versorio metálico sostenido por una pajita de plástico puntiaguda, figura 2.9 (b), tiene una tira conductora sostenida por un material aislante puntiagudo. El versorio de plástico, figura 2.9 (c),

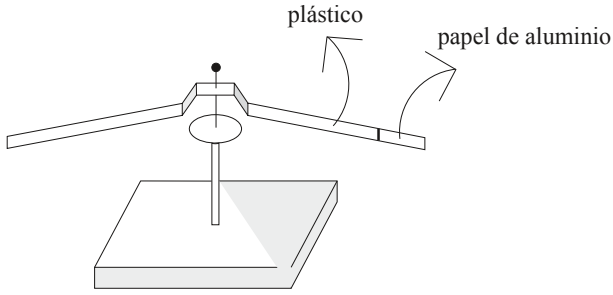


Figura 2.8: El versorio de Du Fay.

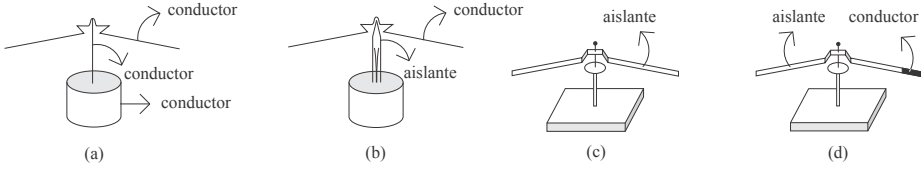


Figura 2.9: Componentes de los diferentes tipos de versorio. (a) Versorio metálico sostenido por un alfiler metálico. (b) Versorio metálico sostenido por una pajita de plástico puntiaguda. (c) Versorio de plástico. (d) Versorio de Du Fay.

tiene un sombrero aislante. El alfiler que atraviesa su centro es conductor, aunque su composición no es relevante para los experimentos. El versorio de Du Fay, por el contrario, figura 2.9 (d), está compuesto por un sombrero de plástico aislante provisto de un conductor en una de sus patas, concretamente el papel de aluminio. El hecho de que el alfiler que atraviesa su centro sea de material conductor o aislante no tiene importancia.

2.4 El péndulo eléctrico

Esta sección presenta los principales tipos de péndulos eléctricos.[5]

2.4.1 El péndulo eléctrico clásico

El péndulo eléctrico clásico se muestra en la figura 2.10.

Ata un disco de papel o papel de aluminio al extremo libre inferior de un hilo de seda, poliéster o poliamida (como el nailon). El extremo superior de este hilo se ata a una pajita de plástico. Esta pajita de plástico se conecta en ángulo recto a otra pajita de plástico mediante un tensor de papel. La pajita de plástico vertical se sostiene mediante un tensor de papel fijado en pasta de yeso dentro de una taza para café de plástico fina, figura 2.1.

[5] [FM91, p. 47], [Fersdb, Eletrização por contato: Pêndulo, p. 8; Eletrização por indução: Pêndulo, p. 14; e Campo elétrico: Vetor, p. 22], [Gas03, pp. 228–229], así como las secciones 4.4, 4.10 y 7.6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

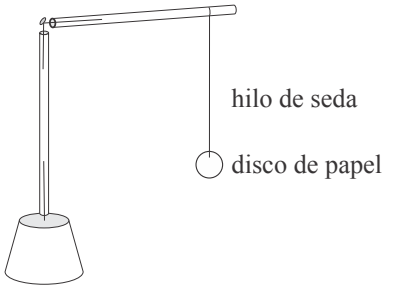


Figura 2.10: Péndulo eléctrico con soporte.

2.4.2 El péndulo con flecha

Una variante de este péndulo clásico sustituye el disco de papel de aluminio por una pequeña flecha de papel, papel de aluminio o cartón fino. Se le puede llamar «péndulo con flecha». La flecha debe apuntar horizontalmente y estar suspendida en su centro por un hilo de seda o nailon. Puede medir entre 2 y 5 cm de largo, con una anchura vertical de 0.2 a 0.5 cm, y una anchura máxima de la punta de 0.5 a 0.7 cm. Estas medidas son aproximadas y no son esenciales. La flecha puede fijarse directamente al extremo del hilo de seda, como se muestra en la figura 2.11 (a). También puede fijarse alrededor de un pequeño trozo de paja de plástico, como se muestra en la figura 2.11 (b).

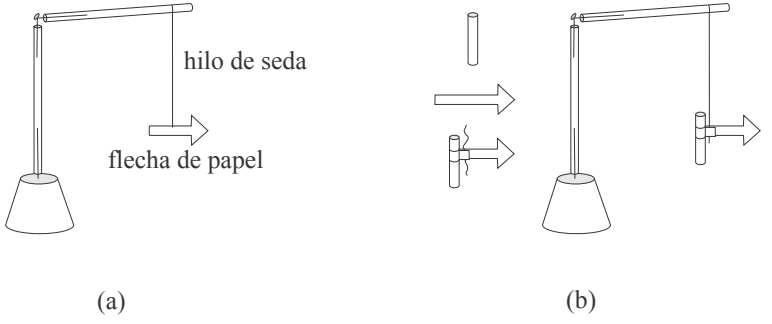


Figura 2.11: Péndulo eléctrico con una flecha suspendida.

2.4.3 El péndulo de plástico

Ahora construya un péndulo eléctrico de plástico, también llamado péndulo de plástico. Basta con sustituir el disco de papel del péndulo eléctrico clásico por un pequeño disco de plástico, figura 2.12. El plástico debe ser fino y ligero, como las bolsas de plástico que se utilizan en los supermercados.

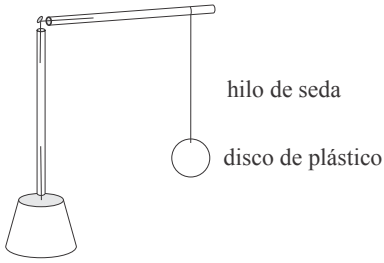


Figura 2.12: El péndulo de plástico.

2.4.4 Componentes principales de estos péndulos

Los componentes principales de estos péndulos se indican en la figura 2.13.

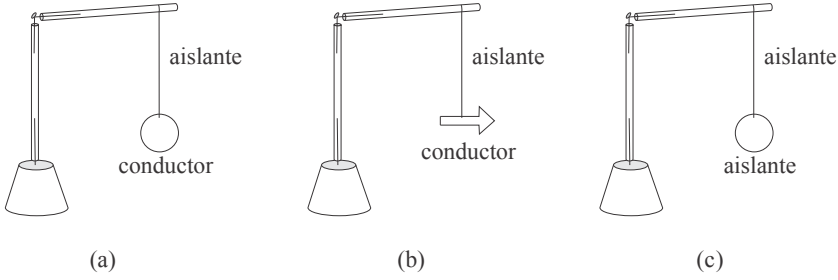


Figura 2.13: (a) Péndulo eléctrico clásico. (b) Péndulo con flecha. (c) Péndulo de plástico.

2.5 El hilo pendular de Gray

Presentamos el «hilo pendular» creado por Stephen Gray (1666–1736) en 1729.[6]

Se trata simplemente de un hilo de algodón o lino sostenido en la parte superior por un palito de madera, figura 2.14 (a). El péndulo eléctrico se fabricó con un hilo de seda o nailon. En este caso, es importante utilizar un hilo de algodón o lino. Sujete el palito con la mano o fíjela a otro soporte adecuado.

Los componentes principales del hilo pendular de Gray se muestran en la figura 2.14 (b), es decir, un hilo conductor sostenido por un conductor conectado a tierra.

Gray utilizaba su hilo pendular para comprobar si un cuerpo estaba cargado. Para ello, simplemente acercaba el hilo al cuerpo. Cuando el hilo era atraído por el cuerpo y se inclinaba hacia él, significaba que el objeto estaba cargado eléctricamente. Cuando el hilo permanecía vertical, significaba que el cuerpo cercano no estaba electrizado.

[6] [Gra32a], [Gra32b], [Gra36b] y sección 4.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

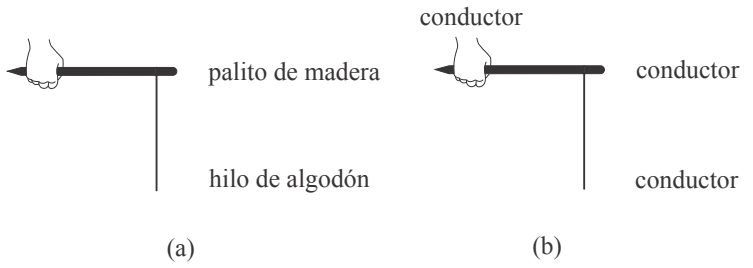


Figura 2.14: (a) Hilo pendular de Gray. (b) Componentes principales de este instrumento.

2.6 Colectores de carga

Los colectores de carga son instrumentos utilizados para obtener partículas electrizadas de cualquier región de un conductor electrizado o polarizado.[7] Una vez recogidas estas cargas, es posible determinar su signo (si son positivas o negativas) y su magnitud (es decir, conocer la densidad de carga superficial). También se pueden utilizar para transportar partículas electrizadas entre dos conductores separados entre sí.

La estructura básica de un colector de carga es un conductor (C) fijado a un mango aislante (I). Manipulamos el colector de carga únicamente por el mango aislante, sin tocar su parte conductora para evitar descargarlo. La parte conductora del colector se coloca en contacto con el cuerpo electrizado estudiado, con el fin de recoger una pequeña cantidad de sus cargas. Durante este contacto, algunas partículas electrizadas se transfieren entre el cuerpo electrizado y la parte conductora del colector, de modo que este recibe cargas del mismo signo que las del cuerpo electrizado. La figura 2.15 ilustra algunos colectores de carga.

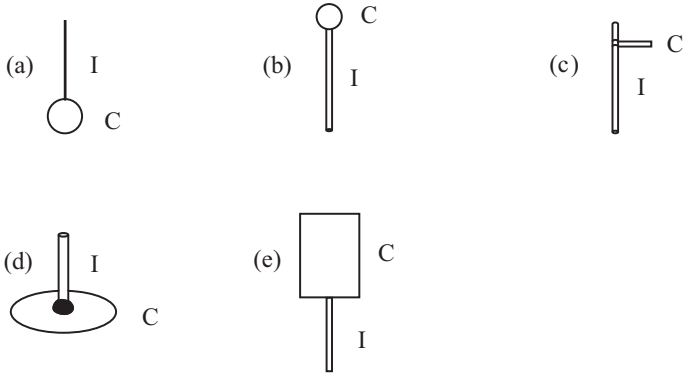


Figura 2.15: Colectores de carga compuestos por una parte conductora C y un mango aislante I.

[7] Sección 7.2 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

La figura 2.15 (a), por ejemplo, representa un péndulo eléctrico clásico. El aislante puede ser un hilo de seda, nailon o poliamida. El conductor puede ser un disco de papel o de papel de aluminio. Este péndulo también puede estar formado por una pequeña bola de médula o corcho, como los péndulos eléctricos construidos en los siglos XVII y XVIII. La figura 2.15 (b) puede representar una bola de papel de aluminio unida a una pajita de plástico. También puede ser una esfera metálica unida a un tubo de PVC. La figura 2.15 (c) representa una tira de papel de aluminio unida a una pajita de plástico. La figura 2.15 (d) representa un disco de papel o cartón fino unido a una pajita de plástico con plastilina. También puede representar la tapa circular de una caja metálica o de un molde para pizza fijada en su centro en ángulo recto a un mango de PVC, acrílico o plástico duro. La figura 2.15 (e) puede representar el electroscopio simple utilizado en este libro sin la tira de papel de seda. Se trata simplemente de un cartón rectangular fijado a una pajita de plástico.

El modelo de la figura 2.15 (d) fue inventado por Charles Augustin de Coulomb en 1787, figura 2.16. Hoy en día se conoce como «plano de prueba».[8]

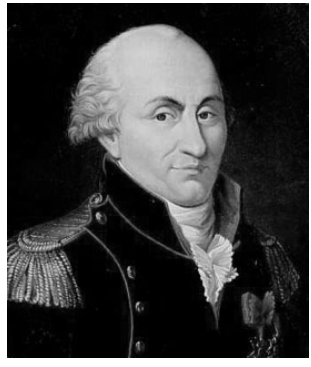


Figura 2.16: Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806).

El plano de prueba es un disco conductor fijado por su centro a un mango aislante. Coulomb lo utilizaba para determinar la distribución de la carga en las superficies de dos o tres conductores cargados por contacto. La cantidad de carga recogida por el plano de prueba es proporcional a la densidad local de carga en la superficie. El modelo utilizado aquí es un disco de cartón fino de 3 cm de diámetro. Se puede colocar una papel de aluminio en una de sus caras, pero no es imprescindible. Recorte un trozo de pajita de plástico de 5 cm de largo. Se fijará en ángulo recto en el centro del disco, como si se tratara del eje de simetría. Uno de los extremos del tubo se puede fijar al centro del disco con plastilina, figura 2.17. Cuando manipulamos el plano de prueba, solo debemos tocar el tubo, pero no la plastilina ni el disco.

[8] [Hei99, p. 495].

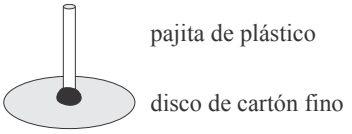


Figura 2.17: Plano de prueba de Coulomb. También se trata de un colector de carga, pero se denominará «plano de prueba» para mayor claridad al describir los siguientes experimentos.

2.7 El comprobador de circuitos

Para construir un comprobador de circuitos, utilice tres trozos de alambre de cobre aislado, sin aislar en sus extremos, figura 2.18 (a), una pila alcalina nueva de gran tamaño, de tamaño D, que genera una diferencia de potencial de 1.5 voltios entre sus polos, figura 2.18 (b), y una pequeña bombilla de 1.5 voltios con su soporte, figura 2.18 (c).

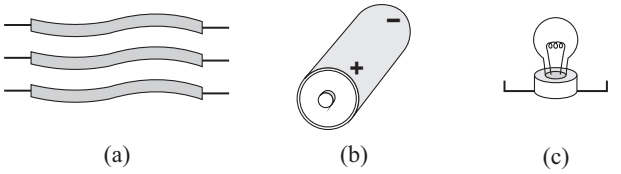


Figura 2.18: (a) Tres trozos de alambre de cobre aislado (pelar los extremos). (b) Una pila nueva de tamaño D. (c) Una bombilla de 1.5 voltios y un casquillo.

Para comprobar el comportamiento conductor o aislante de los cuerpos cuando se someten a una pequeña diferencia de potencial, montamos el comprobador de circuitos que se muestra en la figura 2.19.

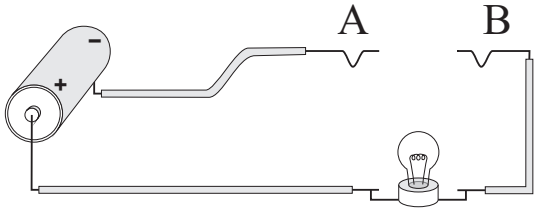


Figura 2.19: Probador de circuitos.

También es útil utilizar un soporte para la batería con el fin de facilitar las conexiones eléctricas con los alambres. Un extremo no aislado del primer alambre se conecta al terminal negativo de la batería con cinta adhesiva. El otro extremo de este primer alambre se dobla en forma de gancho, denominado A, figura 2.19. Un extremo no aislado del segundo alambre se conecta al terminal positivo de la batería, mientras que el otro extremo se conecta a uno de los terminales de la toma. Un extremo del tercer alambre se conecta al otro terminal de la toma. El otro extremo de este tercer

alambre formará otro gancho, denominado B. La distancia entre A y B debe ser de aproximadamente 10 cm.

Deberíamos poder colocar varias sustancias entre A y B para comprobar sus propiedades conductoras o aislantes. Cuando la bombilla se encienda, el cuerpo se clasificará como conductor. Cuando la bombilla no se encienda, la sustancia se clasificará como aislante. Estos experimentos se presentan en la sección 3.2.

Capítulo 3

Conductores y aislantes

La distinción entre conductores y aislantes es uno de los aspectos más importantes de toda la ciencia de la electricidad. Es esencial someter los cuerpos a pruebas para saber si se comportan como conductores o aislantes. Esta prueba debe realizarse antes de comenzar cualquier experimento. El electroscopio es el aparato indispensable para realizar esta clasificación.

3.1 Clasificación de sustancias en conductoras o aislantes mediante el electroscopio

Experimento 3.1 — *Cargar un electroscopio por contacto con un cuerpo electrizado*

Frote enérgicamente una pajita de plástico o una regla acrílica con el cabello o un trozo de papel. Raspe la pajita frotada sobre el borde superior del electroscopio. Repita este procedimiento varias veces. Una vez retirada la pajita frotada, la tira se desprende del electroscopio, lo que indica que se electrizó con este procedimiento, figura 3.1. El electroscopio se electriza con una carga del mismo signo que la de la pajita frotada.[1]

Definición 3.1

Decimos que el electroscopio «adquirió una carga eléctrica gracias al contacto con una pajita previamente cargada», que está «cargado por contacto» o «electrizado por contacto». Este proceso se denomina «carga por contacto», «transferencia de carga por contacto» o «electrización por contacto».

Experimento 3.2 — *Descargar un electroscopio tocándolo con la mano*

Mueva el dedo cerca del borde superior del electroscopio cargado y toque el cartón. La tira cae inmediatamente y permanece pegada al rectángulo. Cuando retira el dedo, la tira permanece vertical, figura 3.2.

[1] Experimento 6.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

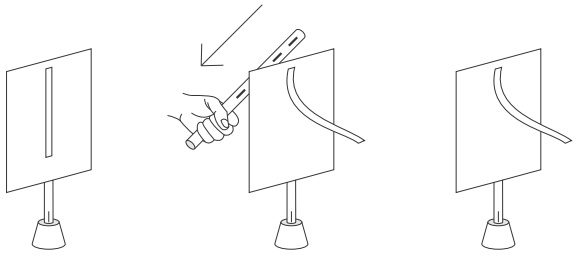


Figura 3.1: (a) Electroscopio con la tira orientada hacia abajo. (b) Raspe el borde superior del rectángulo con una pajita. (c) Cuando se retira la pajita, la tira se desprende del electroscopio.

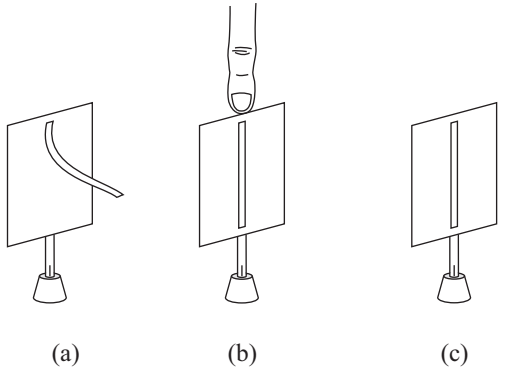


Figura 3.2: Descargar un electroscopio tocándolo. (a) Un electroscopio inicialmente cargado. (b) Cuando el dedo toca el borde superior del cartón, la tira cae. (c) La tira permanece vertical después de retirar el dedo.

El electroscopio se descargó mediante este proceso, que tiene un nombre específico:

Definición 3.2

Decimos que el electroscopio cargado «perdió su carga eléctrica por contacto» con el dedo, o que «se descargó por contacto», «se descargó eléctricamente» o, simplemente, «se descargó». Este proceso se denomina «descarga por contacto», «conexión a tierra» o «conexión a masa». También se denomina «conexión a tierra eléctrica», «conexión a masa eléctrica», «conectar a tierra» o «conectar a masa». El origen de estos nombres proviene del hecho de que el cuerpo cargado se descarga a través del cuerpo humano, que normalmente está en contacto eléctrico con el suelo.

En lugar de dibujar el dedo, es habitual utilizar un símbolo para representar un

contacto conductor entre la tierra y el sistema analizado, como se muestra en la figura 3.3 (b).

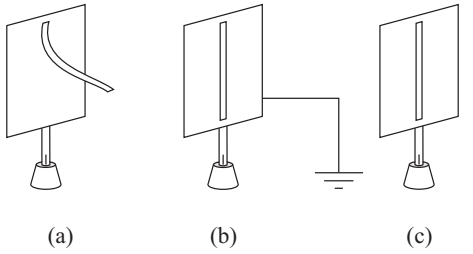


Figura 3.3: Símbolo que representa la conexión a tierra. Reemplaza al dedo de la figura 3.2.

Experimento 3.3 — *Tocar un electroscopio cargado con una pajita de plástico neutra*

A continuación, presentamos el experimento más importante que se puede realizar con un electroscopio cargado. Sujete un extremo de un cuerpo con la mano y toque el borde superior del electroscopio cargado con el otro extremo del cuerpo. La figura 3.4 muestra que no ocurre nada con el electroscopio cuando una pajita de plástico neutra toca el cartón. En otras palabras, el electroscopio permanece electrizado después de retirar la pajita.

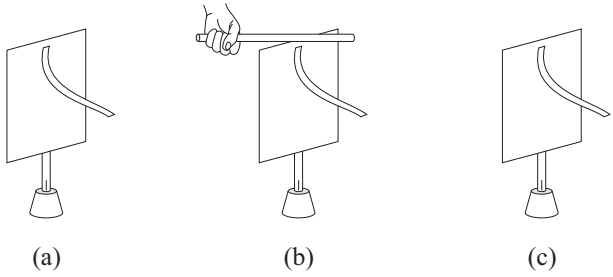


Figura 3.4: (a) Un electroscopio inicialmente cargado. (b) Sujete un extremo de una pajita de plástico neutra con la mano y toque el borde del electroscopio con el otro extremo de la pajita. No ocurre nada en la tira. (c) Cuando se retira la pajita, la tira permanece levantada.

Un electroscopio electrizado no se descarga cuando se toca el cartón con una pajita de plástico neutra que se sostiene con la mano.

Experimento 3.4 — *Tocar un electroscopio cargado con un alambre metálico*

La figura 3.5 muestra lo que ocurre cuando se toca un electroscopio cargado con un palito de madera o un alambre metálico que se sostiene con la mano. La tira levantada cae inmediatamente y permanece vertical después de retirar el palito.

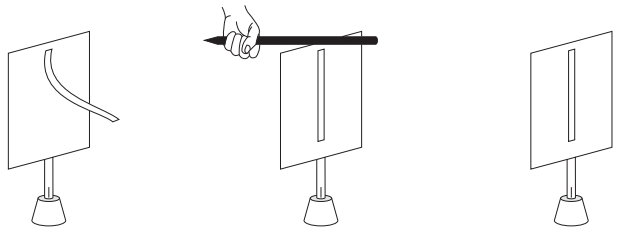


Figura 3.5: (a) Un electroscopio inicialmente cargado. (b) Sujete un extremo de un palito de madera con la mano y toque el borde superior del electroscopio con el otro extremo del palito. La tira cae inmediatamente. (c) Cuando se retira el palito, la tira permanece abajo.

Un electroscopio electrizado se descarga cuando un trozo de madera o metal que se sostiene con la mano toca el cartón. Utiliza madera no tratada para este experimento. Es decir, el trozo de madera no debe estar pintado ni barnizado. Las pinturas y los barnices pueden actuar como aislantes, lo que podría afectar el resultado del experimento.

El electroscopio se descarga inmediatamente cuando un alambre metálico que se sostiene con la mano toca el cartón. Lo mismo ocurre con la mayoría de los palitos de madera que se sostienen con la mano. Sin embargo, dependiendo del tipo de madera, se puede observar una descarga rápida que no es instantánea, sino que tarda unos segundos en descargar el electroscopio.

Observe de nuevo aquí la descarga del electroscopio electrizado como en el experimento 3.2, figura 3.2. Esta vez, la descarga se produjo a través del palito de madera o el alambre metálico.

3.1.1 Definición de los términos conductor y aislante cuando se aplica alta tensión entre los extremos del cuerpo

El electroscopio permite distinguir dos tipos de cuerpos en la naturaleza: los «conductores» y los «aislantes». A continuación, presentamos las definiciones fundamentales relacionadas con los experimentos habituales en electrostática:

Definición 3.3

Las sustancias que descargan un electroscopio electrizado con solo tocarlo, cuando se sostienen en la mano, como en el experimento 3.4, se denominan «conductores de electricidad», «conductores eléctricos» o simplemente «conductores». Las sustancias que no descargan el electroscopio, como en el experimento 3.3, se denominan «aislantes», «no conductores» o «dieléctricos».

3.1.2 Cuerpos que se comportan como conductores o aislantes en los experimentos habituales de electrostática

Al realizar procedimientos similares a los experimentos 3.3 y 3.4 con varias sustancias, obtenemos los siguientes resultados:[2]

- **Conductores para los experimentos habituales de electrostática:** Aire húmedo, cuerpo humano, todos los metales, papel, cartón fino, papel de aluminio, papel de seda, cartón, madera, algodón, trozo de tiza, muchos tipos de vidrio a temperatura ambiente, porcelana, pared, pizarra, corcho, harina de trigo, harina de maíz, hilo acrílico, sal, azúcar, serrín, cuero, tierra o arcilla, ladrillo, algunos tipos de caucho, jabón, hielo, etc.
- **Principales aislantes para los experimentos habituales de electrostática:** Aire seco, resinas naturales como el ámbar y resinas sintéticas como los plásticos en general.

El número de sustancias conductoras es mucho mayor que el de sustancias aislantes. Estas dos listas muestran que la mayoría de las sustancias son conductoras y muy pocas son aislantes. Algunos conductores son muy eficaces y descargan el electroscopio casi instantáneamente, como es el caso del cuerpo humano, los metales, el algodón o el papel. Aunque la madera es conductora, no conduce tan bien como el cuerpo humano. Esto se demuestra por el mayor tiempo que se necesita para descargar el electroscopio cuando un palito de madera toca el cartón, en comparación con el muy corto tiempo que se necesita para descargarlo cuando un dedo o un trozo de metal sostenido en la mano toca el cartón.

Lista de algunas sustancias aislantes: aire seco, seda (hilo o tejido), resinas naturales (ámbar, copal, goma laca), así como resinas sintéticas (plásticos en general, PVC, nailon o poliamida, poliéster, acrílico, poliestireno, etc.).

Los plásticos fueron un gran invento del siglo XX. La primera resina sintética, la baquelita, fue creada por Leo Hendrik Baekeland (1863–1944). Se presentó en la American Chemical Society en 1909. Se le considera generalmente el padre de la industria química. Estas resinas sintéticas recibieron el nombre genérico de «plástico» debido a que eran maleables y podían moldearse en objetos sólidos de cualquier forma deseada. Además de estas sustancias, hay otros materiales que se comportan como aislantes: el vidrio calentado, la lana, un solo cabello humano, una barra de chocolate, el café molido, la cera de parafina y otros tipos de caucho (que son diferentes de los tipos de caucho conductores).

Estas dos listas no deben considerarse exhaustivas. Cada uno debe construir su propio electroscopio y probar el comportamiento de diferentes materiales. Hay que ser prudente con esta distinción, ya que hay muchos factores que pueden influir en el comportamiento conductor o aislante de una sustancia. Entre estos factores se encuentran la composición química del cuerpo, las impurezas presentes en su superficie, su proceso de fabricación, la antigüedad del material, etc.

Aquí solo presentamos un ejemplo. Un tubo de PVC se comporta normalmente como un buen aislante, ya que no descarga un electroscopio electrizado. Hace unos

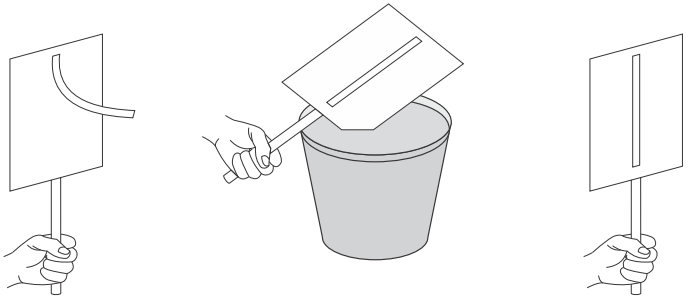
[2] Capítulo 6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

años, construimos un generador electrostático, el cuentagotas de Kelvin, utilizando tubos de PVC como aislantes.[3] Para construir un dispositivo funcional, tuvimos que fabricar tres instrumentos diferentes. Descubrimos que uno de los primeros generadores, que no funcionaba correctamente, tenía un problema con el tubo de PVC utilizado. Aunque lo utilizamos como aislante, descubrimos que este tubo en particular se comportaba como un conductor. Por lo tanto, no permitía la acumulación de cargas en el generador. No intentamos comprender por qué este tubo de PVC presentaba este comportamiento anormal. Al sustituir este tubo por otro tubo de PVC que ya había sido probado y había demostrado ser un buen aislante, finalmente logramos que el experimento funcionara. Ahora era posible producir buenas chispas con este dispositivo.

Experimento 3.5 — *Tocar un electroscopio cargado con agua*

Utilice un procedimiento similar para determinar qué líquidos son conductores o aislantes. Utilice un recipiente conductor que se llenará con diferentes líquidos. Para saber si el recipiente es conductor o aislante, cargue un electroscopio y toque el recipiente con su cartón fino mientras lo sostiene en la mano. Supongamos que el electroscopio se descarga después de este contacto. Esta descarga significa que el recipiente es realmente conductor. Los recipientes de metal, madera o vidrio a temperatura ambiente son ejemplos de recipientes adecuados. A continuación, puede continuar con el experimento.

Llene completamente el recipiente con el líquido que desea analizar. La figura 3.6 ilustra lo que ocurre con un líquido conductor como el agua del grifo.



(a) (b) (c)

Figura 3.6: (a) Un electroscopio cargado. (b) Sumergimos un borde del electroscopio en el agua. Su tira desciende. (c) Cuando el electroscopio sale del agua, la tira permanece abajo.

La figura 3.6 (a) muestra un electroscopio cargado. Sujételo únicamente por la pajita de plástico para evitar tocar el cartón fino o la tira elevada. En (b), sumergimos un borde del electroscopio en agua. El cartón no debe tocar el recipiente, solo el agua. Observe que la tira desciende. (c) Cuando el electroscopio sale del agua, la tira permanece bajada.

[3] [Cam06], [CA08] y sección 7.12 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

El electroscopio se descargó con el agua.

Experimento 3.6 — *Tocar un electroscopio cargado con aceite vegetal*

La figura 3.7 ilustra lo que ocurre en el caso de un líquido aislante como el aceite vegetal de cocina. La figura 3.7 (a) muestra un electroscopio cargado. A continuación, sumergimos un borde del cartón en el líquido. El cartón no debe tocar el recipiente, solo el aceite. Observe que la tira permanece levantada, como en la figura 3.7 (b). Cuando el electroscopio sale del líquido, su tira permanece levantada, como en (c).

Figura 3.7: (a) Un electroscopio cargado. (b) Sumergimos un borde del cartón en un líquido aislante. La tira permanece levantada. (c) Cuando el electroscopio sale del líquido, la tira permanece levantada.

El electroscopio cargado no se descargó con aceite vegetal.

Al realizar procedimientos como los experimentos 3.5 y 3.6, obtenemos los siguientes resultados:[4]

- **Líquidos conductores para los experimentos habituales de electrostática:** Agua dulce, lluvia, agua del grifo, peróxido de hidrógeno (H_2O_2), agua desionizada, agua destilada, lejía (hipoclorito de sodio, $NaClO$), solución salina, alcohol, champú, queroseno, leche, bebidas gaseosas, detergente, licor de caña de azúcar, vodka, detergente, salsa de soja, vinagre, jabón líquido, miel, pegamento líquido, suavizante o acondicionador, pintura esmalte, pintura acrílica, aceite de motor sintético, etc.

- **Líquidos aislantes para los experimentos habituales de electrostática:** Parafina fundida y la mayoría de los tipos de aceite.

En otras palabras, casi todos los líquidos de la vida cotidiana se comportan como conductores. Lista de algunos líquidos aislantes: aceites en general (aceites vegetales

[4] Capítulo 6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

para cocinar, como el aceite de soja o de colza, el aceite de oliva, el aceite para máquinas, el aceite mineral, el aceite de peroba utilizado como cera para muebles, etc.). La excepción a esta lista es el aceite de motor sintético, que se comporta como un conductor en los experimentos habituales de electrostática.

El mismo procedimiento utilizado para comprobar qué líquidos son conductores o aislantes también puede utilizarse para comprobar la conductividad de las harinas. Es decir, se llena un recipiente conductor con la harina que se desea comprobar. Se sumerge un borde del electroscopio cargado en la harina y se observa si la tira desciende o permanece levantada. Evite tocar el recipiente con el cartón del electroscopio.

Experimento 3.7 — *Cuerpo electrizado que atrae un fino chorro de agua*

Este experimento ilustra el efecto que producen el ámbar, el plástico o el acrílico frotados cuando se acercan a líquidos. La pajita de plástico o la regla acrílica solo deben acercarse al líquido, sin tocarlo, independientemente de si la pajita (o la regla) es neutra o fue frotada previamente.

Abra el grifo de manera que salga un fino chorro de agua que fluya regularmente, figura 3.8 (a). Acerque una pajita de plástico neutra al chorro de agua: no ocurre nada, figura 3.8 (b).

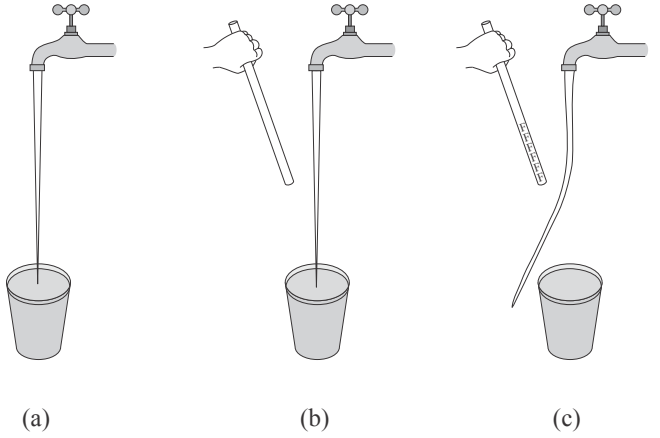


Figura 3.8: (a) El agua fluye sin problemas. (b) No ocurre nada cuando se acerca una pajita de plástico neutra al chorro. (c) Una pajita frotada atrae el chorro.

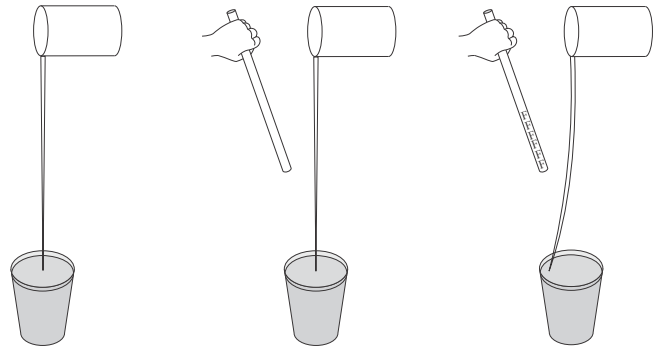
Frote otra pajita y acérquela al chorro. Esta vez, el chorro se curva visiblemente hacia la pajita frotada, figura 3.8 (c). Este efecto se observa más fácilmente cuando la pajita frotada se acerca a la parte superior del chorro, donde la velocidad del agua es menor. A veces, la atracción es tan intensa que el chorro toca la pajita. El experimento también funciona con agua que gotea. El efecto es más visible cuando la pajita frotada está cerca de las gotas más lentas.

Un fenómeno similar se produce cuando un plástico frotado se acerca a un chorro de leche, detergente, alcohol, queroseno, champú, solución salina o casi cualquier líquido clasificado como conductor en la sección 3.1. En otras palabras, los chorros de

estos líquidos son claramente atraídos por el plástico frotado. No son atraídos por una pajita neutra.

Experimento 3.8 — *Cuerpo electrizado que atrae un fino chorro de aceite vegetal*

Repita el experimento 3.7 para atraer un líquido aislante, como el aceite de cocina. Supongamos que un fino chorro de aceite fluye regularmente de un vaso o una caja, figura 3.9 (a). Acérquese una pajita de plástico neutra al chorro y no pasará nada, figura 3.9 (b). Frote otra pajita y acérquela al chorrito. Esta vez, el chorro se curvará ligeramente hacia la pajita frotada, figura 3.9 (c).



(a) (b) (c)

Figura 3.9: (a) El aceite fluye sin problemas. (b) No ocurre nada cuando se acerca una pajita de plástico neutra a la red. (c) Una pajita frotada atrae ligeramente la red de aceite.

En el caso del aceite, el efecto, es decir, la curvatura del chorro, no es tan pronunciado como en el caso de otros líquidos conductores del experimento 3.7, como el agua de la figura 3.8.

Los experimentos 3.7 y 3.8 muestran que la atracción ejercida por un cuerpo electrizado sobre un conductor es mucho mayor que su atracción sobre un aislante.[5] Supongamos dos sustancias, un conductor y un aislante, del mismo tamaño, peso y forma. Se colocan a la misma distancia de un cuerpo electrizado. Los experimentos demuestran que el conductor sufre una fuerza de atracción mayor que el aislante, siendo ambas fuerzas ejercidas por el mismo cuerpo electrizado. De estos experimentos se puede extraer un principio práctico o una regla empírica, a saber: si un cuerpo electrizado atrae visiblemente sustancias ligeras, estas sustancias se comportarán como conductores en los experimentos habituales de electrostática. En otras palabras, cuando se sostienen en la mano, estas sustancias descargan un electroscopio al tocar el cartón del mismo.

[5] Sección 7.7 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

El efecto contrario también se produce. Es decir, las sustancias que descargan un electroscopio son fuertemente atraídas por un cuerpo electrizado situado cerca. Los aislantes, por el contrario, no descargan un electroscopio y solo sufren una fuerza de atracción débil ejercida por un cuerpo electrizado situado cerca.

3.2 Clasificación de sustancias como conductoras o aislantes mediante el comprobador de circuitos

En el volumen 1 de esta obra, demostramos que la diferencia de potencial que actúa entre los extremos de un cuerpo es un factor importante que influye en su comportamiento conductor o aislante.[6] Un cuerpo que se comporta como un aislante cuando sus extremos están sometidos a una pequeña diferencia de potencial eléctrico (generalmente hasta unas pocas decenas de voltios) puede comportarse como un conductor cuando esta diferencia de potencial supera un cierto límite. En los experimentos habituales de electrostática, tratamos diferencias de potencial que suelen oscilar entre 1000 y 10 000 voltios (es decir, entre 10^3 V y 10^4 V). En estas condiciones, la mayoría de las sustancias sólidas y líquidas se comportan como conductores. Por el contrario, para diferencias de potencial débiles, de hasta unas pocas decenas de voltios, la mayoría de las sustancias se comportan como aislantes. Los metales son una excepción a esta regla, ya que se comportan como excelentes conductores para estas diferencias de potencial débiles y fuertes. Las resinas naturales y sintéticas, como el ámbar y los plásticos en general, también son una excepción a esta regla: se comportan como buenos aislantes para estas diferencias de potencial bajas y altas.

En esta sección se describen algunos experimentos que utilizan el comprobador de circuitos de la figura 2.19. Trataremos las diferencias de potencial bajas. Estableceremos una nueva definición de conductores y aislantes adaptada a estas condiciones.

Experimento 3.9 — *Cerrar el comprobador de circuitos con un alambre metálico*

Consideremos un cuarto alambre de cobre, sin aislamiento en los extremos. Un extremo de este cuarto alambre está conectado al punto A de la figura 2.19 y el otro extremo está conectado al punto B. La bombilla debería encenderse, figura 3.10. Esto indica que las conexiones o contactos eléctricos están correctamente establecidos. Además, también indica que circula una corriente eléctrica por los alambres y la bombilla. Como la bombilla se enciende, el alambre de cobre se comporta como un conductor de electricidad cuando se somete a una diferencia de potencial de 1.5 voltios = 1.5 V.

Si la bombilla permanece encendida durante varios minutos, la batería se debilita. Esto se traduce en una disminución de la intensidad luminosa, que acaba llegando a cero. Cuando esto ocurre, la batería se descarga. Para evitar que se descargue, la mejor solución es abrir el contacto (es decir, retirar el cuarto alambre entre A y B) tan pronto como se encienda la bombilla. A continuación, puede utilizar la misma batería para probar otras sustancias.

[6] Sección 6.6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

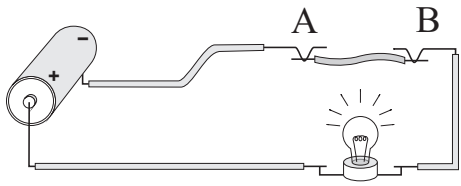
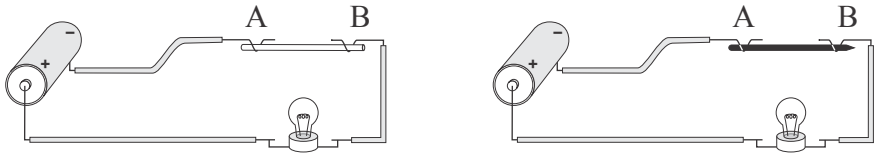


Figura 3.10: Cuando los extremos no aislados de un alambre de cobre se conectan a los extremos A y B, la bombilla se enciende.

Experimento 3.10 — *Cerrar el comprobador de circuitos con una pajita de plástico o un palito de madera*

Conecta los puntos A y B con una pajita de plástico. Cuando hacemos esto, la bombilla no se enciende. Esto indica que no circula corriente eléctrica por el circuito, figura 3.11 (a). La bombilla tampoco se enciende cuando A y B se conectan con un palito de madera, figura 3.11 (b).



(a) (b)

Figura 3.11: (a) La bombilla no se enciende cuando A y B están conectados por una pajita de plástico. (b) La bombilla tampoco se enciende cuando A y B están conectados por un palito de madera.

Como la bombilla no se enciende, una pajita de plástico o un palito de madera actúan como aislantes eléctricos cuando se someten a una diferencia de potencial de 1.5 V.

Experimento 3.11 — *Cerrar el comprobador de circuitos con agua*

La mejor manera de probar los líquidos es utilizar un recipiente aislante (como un vaso de plástico, por ejemplo). Al principio, este debe estar vacío. Para comprobar si se trata realmente de un aislante, conecte A y B a este recipiente vacío. A partir de ahí, supongamos que la bombilla no se enciende, lo que indica que este recipiente se comporta como un aislante cuando se le aplica una diferencia de potencial de 1.5 V.

A continuación, se llena el vaso de plástico con agua dulce del grifo o agua de lluvia. Los terminales A y B se sumergen entonces en el agua. La bombilla no se enciende, figura 3.12. Este hecho indica que el agua dulce se comporta como un aislante cuando se somete a una diferencia de potencial de 1.5 V.

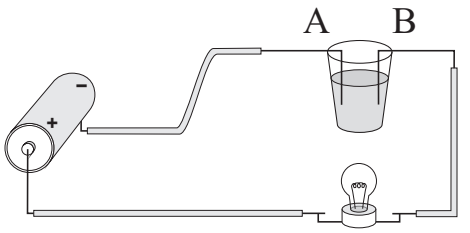


Figura 3.12: La bombilla no se enciende cuando A y B están conectados al agua dulce.

3.2.1 Definición de los términos conductor y aislante cuando se aplica una pequeña diferencia de potencial entre los extremos del cuerpo

Siguiendo los procedimientos de los experimentos 3.9 a 3.11 con varias sustancias, establezca una nueva clasificación de las sustancias basada en otra definición adaptada a las bajas tensiones.

Definición 3.4

Si la bombilla de la figura 2.19 se enciende cuando una determinada sustancia conecta los puntos A y B, como en la figura 3.10, dicha sustancia se denomina «conductora». Si la bombilla no se enciende, como se muestra en la figura 3.11, la sustancia se denomina «aislante».

Según esta definición, un alambre de cobre es un conductor cuando sus extremos están sometidos a una diferencia de potencial de 1.5 V. Por el contrario, una pajita de plástico, un palito de madera y agua dulce son aislantes para esta diferencia de potencial. Como observó Gaspar, el grafito, el agua salada y un limón también se comportan como aislantes para esta diferencia de potencial,[7] aunque muchos manuales indican erróneamente que la bombilla se encendería cuando los puntos A y B de la figura 2.18 se conectaran mediante estas sustancias.

3.2.2 Cuerpos que se comportan como conductores o aislantes en los experimentos habituales con corriente constante

Realizamos varias pruebas similares a los experimentos 3.9 a 3.11. El resultado final es el siguiente:

- **Sustancias que se comportan como conductoras cuando sus extremos están sometidos a una diferencia de potencial de 1.5 V:**
  Todos los metales.

- **Sustancias que se comportan como aislantes cuando sus extremos están sometidos a una diferencia de potencial de 1.5 V:**

[7] [Gas03, pp. 252–256].

Aire seco, aire húmedo, ámbar, plástico, seda, madera, vidrio calentado, vidrio a temperatura ambiente, nailon o poliamida sintética, algodón, PVC, poliéster, lana, cabello humano, tubo acrílico, tejido acrílico, poliestireno, barra de chocolate, café molido, papel, cartón fino, papel de seda, trozo de tiza, porcelana, agua dulce, agua salada, limonada, alcohol, champú, queroseno, leche, bebidas gaseosas, detergente, aceite vegetal de cocina, pared, pizarra, corcho, harina de trigo, harina de maíz, hilo acrílico, sal, azúcar, serrín, tierra o arcilla, ladrillo, caucho, etc.

Se pueden realizar varias variantes de estos experimentos. Cuando no disponemos de casquillos de bombilla, los hilos se pueden soldar directamente a los terminales de las bombillas. En otras palabras, el extremo no aislado de un alambre se conecta a la carcasa lateral del tornillo de la bombilla, mientras que el extremo no aislado de otro alambre se suelda al extremo inferior de la base del tornillo de la bombilla. Estos dos alambres también pueden fijarse simplemente a la carcasa y al extremo del tornillo con cinta adhesiva o con la mano. Los extremos no aislados de los alambres también pueden ponerse en contacto directo con los terminales positivo y negativo de la pila, fijándolos con cinta adhesiva o con la mano. Si se dispone de un soporte para pilas, este suele estar equipado con alambres cuyos extremos están conectados directamente a los terminales de la pila, mientras que sus extremos libres pueden conectarse a otros alambres o al casquillo de una bombilla. También se pueden conectar en serie dos pilas de 1.5 V, lo que da una diferencia de potencial de 3 V entre sus extremos libres.

Es importante señalar que existen varias sustancias que se comportan como conductores según la definición 3.3, mientras que se comportan como aislantes según la definición 3.4. Ejemplos: agua dulce, un palito de madera, papel, muchos tipos de vidrio a temperatura ambiente, etc. Estas sustancias descargan un electroscopio electrizado cuando existe una diferencia de potencial entre 1000 V y 10 000 V entre el electroscopio y la tierra. Por lo tanto, se comportan como conductores para estas tensiones elevadas. Sin embargo, no permiten el paso de una corriente eléctrica de intensidad suficiente para encender la lámpara (es decir, no permiten el paso de una cantidad suficiente de partículas electrizadas a través de ellas) cuando sus extremos están sometidos a una tensión baja que puede alcanzar varias decenas de voltios. Por lo tanto, estas mismas sustancias se comportan como aislantes para estas tensiones bajas.

Como se menciona en el volumen 1 de esta obra, debido a este hecho, podría ser conveniente modificar la terminología. Normalmente, decimos que un determinado cuerpo A «es» un conductor, mientras que otro cuerpo B «es» un aislante. Sin embargo, según lo que acabamos de ver, sería más correcto decir que, en un determinado conjunto de condiciones, el cuerpo A «se comporta como» un conductor, mientras que en otro conjunto de condiciones «se comporta como» un aislante. La misma terminología sería válida para el cuerpo B. Pero esta nueva terminología haría que todas las frases fueran muy largas y complicadas. Por eso mantendremos el procedimiento habitual de decir que los cuerpos «son» conductores o aislantes. Pero debe quedar claro para todos que se trata de conceptos relativos. El comportamiento de los cuerpos depende no solo de sus propiedades intrínsecas, sino también de las condiciones externas a las que están sometidos.

3.3 Factores que influyen en las propiedades conductoras y aislantes de una sustancia

3.3.1 La naturaleza o la composición química de la sustancia

Los experimentos de la sección 3.1 muestran que los cuerpos se pueden dividir en dos grupos denominados conductores y aislantes. En electrostática, se puede aplicar una diferencia de potencial elevada a los extremos de un cuerpo. A continuación, se pueden clasificar utilizando un electroscopio cargado. Toque un extremo del cuerpo con el cartón del electroscopio y conecte el otro extremo del cuerpo a la mano o a tierra. Los cuerpos que descargan el electroscopio se denominan conductores. Un alambre metálico es un ejemplo. Los cuerpos que no descargan el electroscopio se denominan aislantes. Una pajita de plástico es un ejemplo.

Estos experimentos demuestran que el principal aspecto que influye en esta clasificación es la naturaleza del cuerpo, es decir, su composición química y su estructura interna. La mayoría de los cuerpos se comportan electrostáticamente como conductores. Ejemplos: metales, agua, papel, cuerpo humano, madera, muchos tipos de vidrio a temperatura ambiente, varios tipos de caucho, etc. Solo unas pocas sustancias se comportan como aislantes. Ejemplos: aire seco, seda, aceite vegetal, ámbar y otras resinas naturales, así como los plásticos en general y otras resinas sintéticas.

Los experimentos de la sección 3.2 muestran que es necesaria otra clasificación de conductores y aislantes cuando se aplica una pequeña diferencia de potencial entre los extremos de un cuerpo. Esta nueva clasificación se puede obtener utilizando el comprobador de circuitos de la figura 2.19. Comience con una pila nueva y conecte los extremos del cuerpo entre los puntos A y B del comprobador de circuitos. Cuando la bombilla se enciende, se dice que el cuerpo es un conductor. Cuando la bombilla no se enciende, se dice que el cuerpo se comporta como un aislante.

Estos experimentos también muestran, en los experimentos habituales en los que puede circular una corriente constante por el circuito, que el principal aspecto que influye en la clasificación de los cuerpos es su naturaleza o composición química. Para diferencias de potencial pequeñas (hasta unos pocos cientos de voltios), todos los metales se comportan como conductores. La mayoría de las demás sustancias se comportan como aislantes. Ejemplos: el agua, el papel, el cuerpo humano, la madera, la mayoría de los vidrios a temperatura ambiente, varios tipos de caucho, el aire seco y húmedo, la seda, el aceite vegetal, el ámbar y otras resinas naturales, así como los plásticos en general y otras resinas sintéticas.

3.3.2 La diferencia potencial entre los extremos del cuerpo

Más allá de las propiedades internas o intrínsecas de un cuerpo, las secciones 3.1 y 3.2 demostraron que otra propiedad fundamental que permite clasificar una sustancia como conductora o aislante es la diferencia de potencial externo aplicada entre los extremos del cuerpo. Los metales se comportan como conductores para diferencias de potencial bajas y altas. Otras sustancias se comportan como aislantes para diferencias de potencial bajas y altas: el aire seco, la seda, el aceite vegetal, el ámbar y otras resinas naturales, así como los plásticos en general y otras resinas sintéticas.

Por otra parte, varias sustancias se comportan como conductores en los experimentos habituales de electrostática (que tratan de diferencias de potencial elevadas), pero como aislantes en los experimentos habituales que tratan del posible flujo de una corriente eléctrica constante (que tratan de diferencias de potencial bajas). A continuación enumeramos algunas de estas sustancias: el aire húmedo, el agua, el papel, el cuerpo humano, la madera, muchos tipos de vidrio a temperatura ambiente y varios tipos de caucho. Las subsecciones 3.1.2 y 3.2.2 presentan las clasificaciones adecuadas para cada caso.

3.3.3 El tiempo necesario para descargar un cuerpo electrizado

Experimento 3.12 — *Un electroscopio colocado sobre una mesa se descarga con el tiempo*

Cargue un electroscopio como en el experimento 3.1, figura 3.1. Es decir, raspe su cartón con una pajita frotada. Deje este electroscopio cargado sobre una mesa en un ambiente seco. Observe que la tira permanece levantada durante varios segundos, incluso algunos minutos. Sin embargo, si esperamos lo suficiente, por ejemplo una hora, el electroscopio se descargará por completo.

Este fenómeno implica que la definición 3.3 de conductor y aislante, tal y como se da en la subsección 3.1.1, depende del tiempo de observación. Para un intervalo de tiempo de unos segundos, el aire seco puede considerarse un buen aislante. Sin embargo, para un intervalo de tiempo de una hora, el aire seco puede clasificarse como conductor, ya que permite la descarga de un electroscopio.

Esta distinción puede aclararse mediante definiciones más precisas relacionadas con los procedimientos experimentales descritos en la sección 3.1.

Definición 3.5

En el contexto de esta obra, los «buenos conductores» son aquellas sustancias que descargan un electroscopio cuando entran en contacto con él durante menos de 5 segundos. Los «malos conductores» o «malos aislantes» son aquellas sustancias que tardan entre 5 y 20 o 30 segundos en descargar el electroscopio. Estos cuerpos también se denominan «malos conductores», «malos aislantes», «conductores imperfectos» o «aislantes imperfectos». Por último, los «buenos aislantes» son sustancias que necesitan más de 20 o 30 segundos para descargar un electroscopio cargado. En esta obra, nos referiremos generalmente a los buenos conductores con el término «conductores», mientras que los buenos aislantes se denominarán simplemente «aislantes».

3.3.4 La longitud del cuerpo

Los experimentos de esta subsección y los de la subsección 3.3.5 solo deben realizarse en tiempo seco. En este caso, un electroscopio, cargado como en el experimento 3.1, figura 3.1, permanece electrizado durante un intervalo de tiempo de al menos

30 segundos. Por el contrario, en tiempo húmedo y lluvioso, el electroscopio se descarga rápidamente en el aire ambiente poco después de haber sido electrizado (cuando se frota su cartón con una pajita o una regla de plástico). En tiempo lluvioso, los resultados de los experimentos de esta subsección y de la subsección 3.3.5 no serán muy claros. Por eso hay que evitar realizar estas actividades en tiempo húmedo.

Esta subsección examina la influencia de la longitud de una sustancia que entra en contacto con un electroscopio cargado en lo que respecta a sus propiedades conductoras o aislantes.

Experimento 3.13 — *Descargar un electroscopio tocándolo con tiras de papel*

Corta varias tiras de papel (formato A4 o carta), de 2 cm de ancho y una longitud que varíe entre 10 cm y 1 m. Puedes obtener una longitud de 1 m uniendo los extremos de las tiras más cortas con pegamento o clips. Carga un electroscopio y colócalo sobre una mesa en tiempo seco. Sujete un extremo de la tira de 10 cm con la mano y toque el borde del cartón fino del electroscopio con el otro extremo.[8] Observe una descarga rápida del electroscopio, de 1 a 3 segundos, figura 3.13 (b) y (c). Por lo tanto, según la definición 3.5 de la subsección 3.3.3, esta tira puede considerarse un buen conductor.

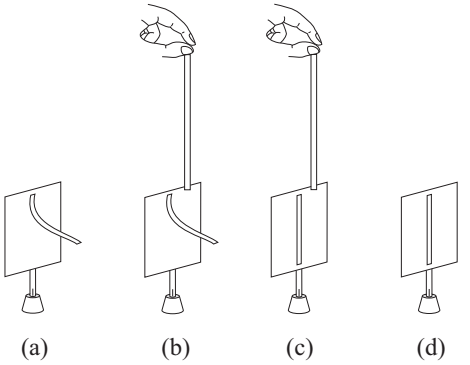


Figura 3.13: (a) Un electroscopio cargado. (b) y (c): Una tira de papel sostenida con la mano descarga rápidamente el electroscopio cuando su extremo libre toca el cartón fino. (d) Al retirar la tira de papel, el electroscopio queda descargado.

Recargue el electroscopio y utilice ahora una tira de papel de 30 cm $\times$ 2 cm. Sujete un extremo de la tira de papel con la mano, mientras que el extremo libre toca el cartón del electroscopio. Observe fácilmente el intervalo de tiempo necesario de 4 a 6 segundos para descargar el electroscopio. Dependiendo del tipo de papel, esta tira de papel de 30 cm de largo puede considerarse un mal conductor.

Este experimento también muestra claramente que la cantidad de carga perdida por el electroscopio electrizado aumenta con el tiempo, véase la subsección 3.3.3. La única diferencia es que, en la situación actual, el electroscopio se descarga principalmente a través de la tira de papel y no a través del aire ambiente.

[8] Sección 6.7 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

El electroscopio se carga una vez más y se repite el experimento con una tira de papel de 1 m de largo y 2 cm de ancho. Se observa que el electroscopio permanece cargado durante unos 10 segundos. Cuando el aire es muy seco, este intervalo de tiempo de descarga puede aumentar hasta 20 o 30 segundos, según el tipo de papel. Según la definición 3.5 de la subsección 3.3.3, concluimos que esta tira de papel de 1 m de largo puede considerarse un buen aislante.

Este experimento demuestra que la longitud de una sustancia influye en su comportamiento como conductor o aislante. Al aumentar la longitud de una sustancia entre la mano y el cartón del electroscopio, aumentamos el intervalo de tiempo necesario para descargar el electroscopio.

Experimento 3.14 — *Descargar un electroscopio tocándolo con hilos de coser*

El experimento 3.13 puede repetirse con varios materiales. Existen varias sustancias interesantes que muestran claramente la influencia de la longitud del cuerpo en el intervalo de tiempo necesario para descargar un electroscopio: papel, cartón, hilo de algodón, hilo de coser, etc. La tabla 3.1 muestra el intervalo de tiempo medido necesario para descargar un electroscopio con tiras de papel de 2 cm de ancho y con hilo de coser, cuando se sigue el procedimiento del experimento 3.13.

Tabla 3.1: Intervalos de tiempo aproximados necesarios para descargar el electroscopio.

Sustancia \ Longitud	10 cm	30 cm	1 m
Tira de papel	1–3 s	4–6 s	10–30 s
Hilo de coser	2 s	3 s	6 s

Los valores numéricos de esta tabla y de las demás tablas presentados en esta obra deben considerarse únicamente de forma cualitativa. Se pueden obtener valores muy diferentes a los aquí presentados en función del grado de electrización del electroscopio, su tamaño, las condiciones atmosféricas del día en que se realiza el experimento, la calidad o la composición química del material sometido a prueba, etc. Estas cifras solo indican el comportamiento cualitativo de los factores que influyen en las propiedades conductoras o aislantes de un cuerpo.

Experimento 3.15 — *Tocar un electroscopio cargado con otras sustancias*

Realice un experimento similar utilizando una pajita de plástico en lugar de la tira de papel. Una pajita clásica mide 20 cm de largo. Córtela y una los extremos de estas pajitas para obtener pajitas de diferentes longitudes: 10 cm, 30 cm o 1 m. Sujete un extremo de esta pajita con la mano mientras que el extremo libre toca el cartón de un electroscopio cargado. Observe que el electroscopio permanece cargado durante más de 20 o 30 segundos en tiempo seco. Concluimos que las pajitas de todas estas diferentes longitudes pueden considerarse buenos aislantes. En este caso, no percibimos la influencia de su longitud en el tiempo de descarga, ya que el electroscopio permanece

cargado incluso después de tocar el cartón con una pajita de plástico corta de 10 cm de longitud.

El comportamiento inverso se produce cuando tiras de papel de aluminio de 2 cm de ancho tocan el cartón de un electroscopio cargado. De hecho, este se descarga casi instantáneamente con tiras de una longitud comprendida entre 10 cm y 1 m. Una tira de papel de aluminio puede considerarse un buen conductor en todos estos casos. Una vez más, no percibimos la influencia de su longitud en el tiempo de descarga. Después de todo, incluso para una tira de 1 m de largo, la descarga del electroscopio es tan rápida que no se puede medir con un reloj de pulsera normal.

Experimento 3.16 — *Cargar dos electroscopios conectados por tiras de papel*

Un experimento similar utiliza dos electroscopios conectados por tiras o hilos de diferentes materiales, como papel, cartón, papel de aluminio, pajitas de plástico, cordón o hilo de coser.[9] Estos materiales pueden fijarse a las cajas de cartón de los electroscopios con clips, figura 3.14.

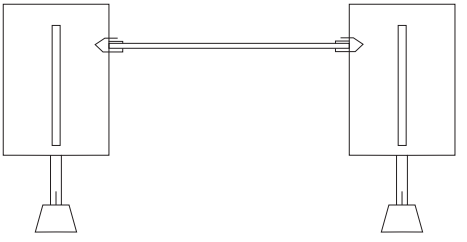


Figura 3.14: Dos electroscopios conectados por una tira de papel

Conecte los dos electroscopios con una tira de papel de 2 cm de ancho y 10 cm de largo. Los electroscopios están inicialmente descargados. Electrice una regla acrílica o una pajita de plástico frotándola con el cabello o una toalla de papel. Raspe varias veces la pajita contra el borde superior de uno de los electroscopios hasta que se cargue, es decir, hasta que la tira de papel de seda permanezca levantada. Intente medir el intervalo de tiempo necesario para cargar el segundo electroscopio. Esta medición no es fiable. De hecho, el segundo electroscopio comienza a cargarse no solo al final de este procedimiento, sino también durante el intervalo de tiempo en el que se raspa por primera vez el primer electroscopio. A veces es necesario golpear varias veces la pajita del segundo electroscopio para liberar su fina tira de papel de seda, de modo que comience a levantarse.

Experimento 3.17 — *Descargar dos electroscopios conectados por tiras de papel*

Se puede obtener una medición más fiable del intervalo de tiempo utilizando los dos electroscopios del experimento 3.16. Para ello, espere a que los dos electroscopios conectados por la tira de papel estén igualmente electrizados. Toque con el dedo

[9] [FM91, pp. 43–45], [Fersdc, p. 70] y [FR08, p. 18].

el cartón superior de un electroscopio. Sus tiras de papel de seda caerán inmediatamente. Mientras mantiene el dedo sobre el primer electroscopio, mida el intervalo de tiempo necesario para descargar el segundo electroscopio. Cuando los dos electroscopios están conectados por esta tira de papel de 2 cm de ancho y 10 cm de largo, este intervalo de tiempo necesario varía entre 2 y 3 s.

Repita este experimento con tiras de papel de 2 cm de ancho y diferentes longitudes que conecten los electroscopios, con longitudes que vayan de 10 cm a 1 m. Se puede utilizar el mismo procedimiento cuando los dos electroscopios están conectados por hilos de coser de 10 cm, 30 cm y 1 m de largo. La tabla 3.2 muestra un resultado típico de un experimento como este utilizando diferentes materiales.

Tabla 3.2: Intervalos de tiempo aproximados necesarios para descargar uno de los electroscopios cargados después de conectar el otro electroscopio a tierra.

Sustancia \ Longitud	10 cm	30 cm	1 m
Tira de papel	2–3 s	5 s	20–25 s
Hilo de coser	2 s	4 s	15–20 s

Conecte los dos electroscopios con pajitas de plástico de 10 cm, 30 cm o 1 m de largo. Electrice los dos electroscopios por igual raspando las pajitas contra sus cartones. Al comienzo del experimento, las tiras de papel de seda deben estar levantadas por igual con respecto a los dos cartones. Toque el cartón del primer electroscopio con el dedo y observe que la tira de papel de seda cae inmediatamente. El segundo electroscopio, por el contrario, permanece electrizado durante más de 20 o 30 segundos en tiempo seco, independientemente de la longitud de la pajita de plástico que conecta los electroscopios.

Conecte los dos electroscopios con tiras de papel de aluminio de 2 cm de ancho y diferentes longitudes, a saber, 10 cm, 30 cm o 1 m. Electrice el sistema de manera que las dos tiras de papel de seda se levanten por igual. Cuando un dedo toca el cartón del primer electroscopio, su tira de papel de seda cae inmediatamente. Lo mismo ocurre con la tira de papel de seda del segundo electroscopio, independientemente de la longitud de la tira de papel de aluminio que conecta los dos electroscopios.

En estos dos últimos ejemplos, no podemos detectar la influencia de la longitud del cuerpo que conecta los dos electroscopios en lo que respecta al intervalo de tiempo necesario para descargar el segundo electroscopio. Cuando están conectados por una pajita de plástico, este intervalo de tiempo es muy largo, independientemente de la longitud de la pajita. En otras palabras, el segundo electroscopio permanece cargado después de conectar a tierra el primer electroscopio. Por el contrario, cuando están conectados por una tira de papel de aluminio, este intervalo de tiempo es nulo, independientemente de la longitud de la tira. En otras palabras, los dos electroscopios se descargan casi instantáneamente cuando uno de ellos se conecta a tierra. En este caso, el intervalo de tiempo necesario para descargar el segundo electroscopio es tan corto que no se puede medir con un simple reloj de pulsera, independientemente de la longitud de la tira de papel de aluminio que conecta los electroscopios.

Consideremos ahora la situación de los experimentos anteriores, en los que el intervalo de tiempo necesario para descargar el segundo electroscopio variaba entre 1 segundo y 2 minutos. Estos experimentos demostraron que cuanto mayor era la longitud del cuerpo que conectaba los dos electroscopios, más lenta era la descarga del segundo electroscopio después de conectar a tierra el primero.

3.3.5 La sección transversal del cuerpo

Esta subsección examina la influencia de la sección transversal de una sustancia que entra en contacto con un electroscopio cargado en lo que respecta a sus propiedades conductoras o aislantes.

Experimento 3.18 — *Descargar un electroscopio tocándolo con el cabello*

Cargue un electroscopio y colóquelo sobre una mesa. Sujete un extremo de un cabello humano con la mano y toque el otro extremo del cabello con el cartón fino del electroscopio cargado, como se muestra en la figura 3.13. Observe que el electroscopio permanece cargado durante varios segundos. Esto indica que un solo cabello humano puede clasificarse como un buen aislante.

Vuelva a cargar el electroscopio y aumente el número de cabellos que sostiene en la mano. Toque simultáneamente sus extremos libres en el cartón del electroscopio cargado. Observe que al aumentar el número de cabellos, la descarga se vuelve más rápida. Por ejemplo, con decenas de cabellos, el electroscopio se descarga en pocos segundos. Esta cantidad de cabello puede clasificarse como un buen conductor.

Experimento 3.19 — *Descargar un electroscopio tocándolo con tiras de papel*

Repita el experimento 3.13 utilizando cuerpos de longitud fija, pero modificando su sección transversal. Modifique, por ejemplo, la anchura de las tiras de papel que entrarán en contacto con el electroscopio. La tabla 3.3 presenta los resultados de este experimento con tiras de papel de 1 m de longitud y dos anchuras diferentes, 0.5 y 2 cm.

Tabla 3.3: Intervalos aproximados para descargar el electroscopio.

Ancho de la tira de papel	0.5 cm	2 cm
Intervalos de tiempo	50 s	10 s

Experimento 3.20 — *Descargar un electroscopio tocándolo con hilos de algodón*

Repita el experimento 3.13 utilizando hilos o cordónes de algodón de longitud fija, pero modificando su sección transversal. Sujete un extremo del hilo, toque el otro extremo en el cartón del electroscopio cargado y mida el tiempo de descarga. La tabla 3.4 muestra los resultados de este experimento con un hilo de coser de algodón fino y un cordón de algodón más grueso, ambos de una longitud de 1 m.

Tabla 3.4: Intervalos aproximados para descargar el electroscopio.

Algodón	hilo de coser	cordón
Intervalos de tiempo	6 s	6–7 s

Experimento 3.21 — *Descargar dos electroscopios conectados por una tira de papel*

Repita el experimento 3.16 conectando los dos electroscopios con tiras de papel de la misma longitud, pero de diferentes anchuras o secciones transversales. La tabla 3.5 compara los intervalos de tiempo necesarios para descargar el electroscopio 2 después de que el electroscopio 1 se haya conectado a tierra tocando su cartón con el dedo. Todas las sustancias de conexión medían 1 m de largo.

Tabla 3.5: Intervalos de tiempo aproximados para descargar uno de los electroscopios cuando el otro electroscopio está conectado a tierra.

Ancho de la tira de papel	0.5 cm	2 cm
Intervalos de tiempo	60 s	20–25 s

Experimento 3.22 — *Descargar dos electroscopios con ayuda de un hilo de algodón*

Repita el experimento 3.16 conectando los dos electroscopios con hilos de algodón de la misma longitud, pero de diferentes anchuras o secciones transversales. La tabla 3.6 compara los intervalos de tiempo necesarios para descargar el electroscopio 2 después de que el electroscopio 1 se haya conectado a tierra tocando su cartón con el dedo. Todas las sustancias de conexión medían 1 m de largo.

Tabla 3.6: Intervalos de tiempo aproximados para descargar uno de los electroscopios cuando el otro electroscopio está conectado a tierra.

Algodón	hilo de coser	cordón
Intervalos de tiempo	15–20 s	6–7 s

Experimento 3.23 — *Descargar un electroscopio tocándolo con varias tiras de papel*

En lugar de variar el ancho de las tiras de papel, modifique el número de tiras de papel del mismo ancho. Realice, por ejemplo, el experimento con tiras de papel de 1 m de largo y 0.5 cm de ancho. Cargue el electroscopio, sujete el extremo de esta tira como se muestra en la figura 3.13 y conecte su extremo libre al cartón del electroscopio, midiendo el tiempo de descarga.

En otro experimento, unimos tres tiras de papel iguales con un clip en cada extremo. Sujete uno de los clips con la mano y toque el otro clip en el cartón del electroscopio cargado, midiendo el tiempo de descarga. La tabla 3.7 compara los resultados de este procedimiento.

Tabla 3.7: Intervalos aproximados para descargar el electroscopio.

Número de tiras de papel	1	3
Intervalos de tiempo	50 s	3 s

Experimento 3.24 — *Descargar un electroscopio tocándolo con varios hilos de algodón*

En lugar de variar las secciones transversales de los hilos de algodón, modifique el número de hilos de algodón con la misma sección transversal. La tabla 3.8 compara los resultados de este procedimiento.

Tabla 3.8: Intervalos aproximados para descargar el electroscopio.

Número de hilos de coser	1	3
Intervalos de tiempo	6 s	2–3 s

Experimento 3.25 — *Descargar dos electroscopios conectados por varias tiras de papel*

En otra prueba, conecte dos electroscopios como en el experimento 3.16. Mida el intervalo de tiempo necesario para descargar uno de los electroscopios cuando el otro electroscopio está conectado a tierra. En todos los experimentos utilizamos tiras de papel de la misma longitud y anchura. Al principio, los electroscopios están conectados por una sola tira de papel y medimos el tiempo de descarga.

En el siguiente experimento, conecte los dos electroscopios con 3 tiras de papel y mida de nuevo el tiempo de descarga. La tabla 3.9 muestra los resultados de este experimento utilizando tiras de papel de 1 m de largo y 0.5 cm de ancho.

Tabla 3.9: Intervalos de tiempo aproximados para descargar uno de los electroscopios después de conectar el otro electroscopio a tierra.

Número de tiras de papel	1	3
Intervalos de tiempo	60 s	15 s

Experimento 3.26 — *Descargar dos electroscopios conectados por varios hilos de algodón*

En otra prueba, conecte dos electroscopios como en el experimento 3.16. Mida el intervalo de tiempo necesario para descargar uno de los electroscopios cuando el otro electroscopio está conectado a tierra. Seguimos utilizando hilos de algodón para coser procedentes de la misma bobina y de la misma longitud. Al principio, los electroscopios están conectados por un solo hilo de algodón.

En el siguiente experimento, conecte los dos electroscopios con 3 hilos de coser y mida de nuevo el tiempo de descarga. La tabla 3.10 muestra los resultados de este experimento utilizando hilos de coser de algodón de un metro de largo procedentes de la misma bobina.

Tabla 3.10: Intervalos de tiempo aproximados para descargar uno de los electroscopios después de conectar el otro electroscopio a tierra.

Número de hilos de coser	1	3
Intervalos de tiempo	15–20 s	16–18 s

Experimentos como estos demuestran que la sección transversal de un cuerpo influye en sus propiedades conductoras o aislantes. Cuanto mayor sea esta sección entre la mano y el cartón del electroscopio, menor será el tiempo necesario para descargar el electroscopio. Del mismo modo, cuanto mayor sea la sección del cuerpo que conecta dos electroscopios, menor será el tiempo necesario para descargar uno de los electroscopios después de haber conectado el otro a tierra tocando su cartón con el dedo.

A continuación, presentamos algunas definiciones relevantes.

Definición 3.6

El flujo de partículas electrizadas a través de la sección transversal de un cuerpo se denomina «corriente eléctrica». Es proporcional a la cantidad de carga por unidad de tiempo que pasa a través de la sección transversal del conductor.

Un ejemplo es la corriente eléctrica que circula a través de una tira de papel o un hilo de coser en estos experimentos.

Este flujo de partículas electrizadas depende del material del conductor. Una tira de papel de aluminio, por ejemplo, conduce mejor que una tira de papel normal de la misma longitud, anchura y grosor. Y estos dos materiales conducen mucho mejor que una tira de plástico del mismo tamaño. Supongamos que queremos descargar un electroscopio electrizado. Sostenga una tira en la mano y toque su extremo libre en el cartón del electroscopio. La cantidad de carga a descargar será siempre la misma, es decir, la electrización inicial del electroscopio. El tiempo de descarga al tocarlo con una

tira de papel de aluminio es menor que el tiempo de descarga al tocarlo con una tira de papel. Y este último tiempo es mucho menor que el intervalo de tiempo necesario para descargar el mismo electroscopio al tocarlo con una tira de plástico.

Consideremos ahora conductores del mismo material. En las mismas condiciones iniciales que en los experimentos anteriores, la corriente eléctrica que circula por un cuerpo dependerá de su longitud. Al aumentar la longitud de una sustancia entre la mano y el cartón del electroscopio, aumentamos el intervalo de tiempo necesario para descargar el electroscopio. Del mismo modo, cuanto mayor sea la longitud de un cuerpo que conecta dos electroscopios cargados, mayor será el intervalo de tiempo necesario para descargar uno de los electroscopios después de conectar el otro a tierra.

Esta corriente eléctrica también depende de la sección transversal del conductor, suponiendo las mismas condiciones iniciales que en los experimentos anteriores. Cuanto mayor sea esta sección entre la mano y el cartón del electroscopio, menor será el intervalo de tiempo necesario para descargarlo. Del mismo modo, cuanto mayor sea la sección transversal de un cuerpo que conecta dos electroscopios cargados, menor será el intervalo de tiempo necesario para descargar uno de los electroscopios después de haber conectado el otro a tierra.

Definición 3.7

Decimos que el cuerpo que conecta los dos electroscopios en estos experimentos tiene una «resistencia eléctrica». En cada momento, esta resistencia es proporcional a la diferencia de potencial entre los dos electroscopios e inversamente proporcional a la corriente eléctrica que atraviesa el cuerpo.

Supongamos las mismas condiciones iniciales. Por ejemplo, dos electroscopios cargados conectados por una tira de papel o un hilo de coser. Conecte uno de los electroscopios a tierra tocando su cartón con el dedo y mida el intervalo de tiempo necesario para descargar el otro electroscopio. Cuanto más largo sea este intervalo de tiempo, mayor será la resistencia del cuerpo que los conecta. Esto significa que la resistencia de este cuerpo es inversamente proporcional a la corriente eléctrica que lo atraviesa, suponiendo que la diferencia de potencial entre sus extremos sea la misma. Según los experimentos anteriores, la resistencia de un cuerpo aumenta con su longitud y disminuye con el tamaño de su sección transversal, dependiendo también de la composición material o química del cuerpo.

Experimento 3.27 — *Comparar intervalos de tiempo*

También es interesante comparar los intervalos de tiempo de las figuras 3.13 y 3.14 para descargar un electroscopio electrizado. En el primer caso, tenemos un electroscopio cargado. Sostenga una tira o un cordón en la mano y toque con su extremo libre el cartón del electroscopio, midiendo el intervalo de tiempo necesario para descargarlo. En el segundo caso, tenemos dos electroscopios cargados conectados por una tira o un cordón. Conecte uno de los electroscopios a tierra tocándolo con la mano y mida el intervalo de tiempo necesario para descargar el segundo electroscopio. Supongamos que se utiliza el mismo cuerpo para descargar los electroscopios en ambos casos.

Puede ser, por ejemplo, una tira de papel de la misma longitud y anchura en ambos casos. Observe que el tiempo de descarga en el primer caso suele ser más corto que el tiempo de descarga en el segundo caso.

Esta diferencia de tiempo tiene una explicación. En el segundo caso, no solo teníamos un electroscopio cargado que descargar, sino también un cuerpo cargado que conectaba los dos electroscopios, es decir, la tira de papel o el cordón de algodón. Por lo tanto, cuando un dedo toca el primer electroscopio, debemos descargar no solo el segundo electroscopio, sino también este cuerpo de conexión. En el primer caso, por el contrario, no era necesario descargar la tira de papel ni el cordón de algodón. Después de todo, estos cuerpos de conexión ya estaban descargados, ya que se sostenían en la mano.

Podemos demostrar que la tira de papel (o el cordón de algodón) que conectaba los dos electroscopios cargados de la figura 3.14 también estaba electrizada. Para ello, coloque un versorio metálico cerca de la tira o del cordón, en el mismo plano horizontal, en cualquier punto a lo largo de la tira o del cordón. Al principio, cuando los dos electroscopios aún están descargados, el versorio debería apuntar en una dirección arbitraria. Raspe varias veces una regla acrílica electrizada sobre el cartón de uno de los electroscopios. Espere a que ambos electroscopios estén igualmente cargados. Observe que el versorio ahora apunta hacia la tira. Esto indica que la tira ahora está electrizada. Lo mismo ocurre con un hilo o cordón de algodón que conecta los dos electroscopios.

Experimento 3.28 — *Descargar sucesivamente dos electroscopios*

Se puede realizar otro experimento interesante con los dos electroscopios de la figura 3.14. Supongamos que una tira de papel de 1 m de largo y 0.5 cm de ancho conecta los dos electroscopios. Supongamos también que ambos electroscopios están igualmente electrizados al comienzo del experimento. En este caso, cuando el dedo toca el cartón del electroscopio 1, su tira de papel de seda cae inmediatamente. La tira de papel de seda del electroscopio 2, por el contrario, tarda unos 60 segundos en caer completamente mientras el dedo toca el cartón del electroscopio 1.

Repita este experimento. Pero esta vez, retire el dedo del primer electroscopio 5 segundos después de haberlo tocado. Su tira de papel de seda, que había caído completamente, comienza a subir. Mientras la tira 1 sube, la tira de papel de seda del electroscopio 2 desciende ligeramente. Al cabo de un tiempo, las dos tiras de papel de seda están inclinadas de la misma manera con respecto a sus cartones. Toque el cartón del segundo electroscopio con el dedo y retírelo después de 5 segundos. El fenómeno descrito anteriormente con las tiras de papel de seda se repite, pero en los electroscopios opuestos. Repita este procedimiento, tocando cada vez un electroscopio diferente después de que hayan alcanzado un nuevo equilibrio. Poco a poco, todo el sistema se descarga.

Experimento 3.29 — *Cargar sucesivamente dos electroscopios*

También es interesante comenzar con los dos electroscopios descargados. Están conectados por una tira larga de papel de poca anchura. Raspe una o dos veces una

regla acrílica electrizada sobre el cartón del electroscopio 1, observando que su tira de papel de seda se levanta casi inmediatamente. La tira de papel de seda del electroscopio 2, en cambio, se levanta lentamente.

Una vez alcanzado el equilibrio, raspe la regla electrizada sobre el cartón del electroscopio 2. Su tira de papel de seda se levanta aún más, una vez más casi instantáneamente. La tira de papel de seda del electroscopio 1, por el contrario, necesita un intervalo de tiempo medible para levantarse al mismo nivel que la tira de papel de seda del electroscopio 2.

3.3.6 La humedad

Humedad del cuerpo de conexión

Experimento 3.30 — *Poner a tierra el electroscopio con cuerpos que presentan diferentes grados de humedad*

Repita los experimentos de la sección 3.1 y de la subsección 3.3.4 modificando la humedad del cuerpo que se conectará al electroscopio cargado de la figura 3.13. En todos los casos, se tocará el electroscopio con tiras de 30 cm de largo y 0.5 cm de ancho cortadas de la misma hoja de papel. Sujete la tira con la mano por su extremo superior. Mida el intervalo de tiempo necesario para descargar el electroscopio desde el momento en que el extremo inferior de la tira de papel toca su cartón. En este experimento, solo variamos el grado de humedad de las tiras de papel. Utilice una tira seca en el primer caso.

En el segundo caso, utilice una tira húmeda (humedecida en toda su longitud, por ambos lados, con un pulverizador de agua). Los experimentos demuestran que cuanto más seca está la tira de papel, más tiempo tardará en descargarse. Por lo tanto, cuanto más seco está el papel, más aislante es.

Este comportamiento diferente de la tira de papel se debe, evidentemente, a la cantidad de agua absorbida. Si comparamos la conductividad de dos columnas de la misma longitud y sección transversal, una de agua dulce y otra de papel común, vemos que el agua es un conductor mucho mejor que el papel. En otras palabras, descarga más rápidamente un electroscopio electrizado. Por lo tanto, cuando una tira de papel absorbe agua, se convierte en un mejor conductor que el papel seco.

Cabe señalar que el agua se absorbe en toda la sección transversal de la tira, y no solo en su superficie.

Humedad del aire

Los experimentos electrostáticos suelen funcionar bien en climas secos, produciendo efectos visibles y perceptibles. La humedad del aire impide la acumulación de cargas eléctricas, lo que reduce el tamaño o la magnitud de los efectos observables.

Experimento 3.31 — *Electroscopio colocado sobre una mesa en tiempo seco*

Es fácil cargar un electroscopio en tiempo seco. Frote una pajita de plástico con el cabello. A continuación, raspe la pajita contra el cartón fino del electroscopio, tal y

como se describe en el experimento 3.1, figura 3.1. El electroscopio permanece cargado durante varios segundos o minutos después de este procedimiento, figura 3.1 (c). Este hecho implica que el aire seco es un buen aislante, según la definición 3.5 dada en la subsección 3.3.3.

Experimento 3.32 — *Electroscopio colocado sobre una mesa en un día húmedo*

Repita el experimento 3.31 en un día húmedo y lluvioso. Cuando raspamos una pajita sobre el cartón del electroscopio, su tira sube, como se muestra en la figura 3.15 (b).

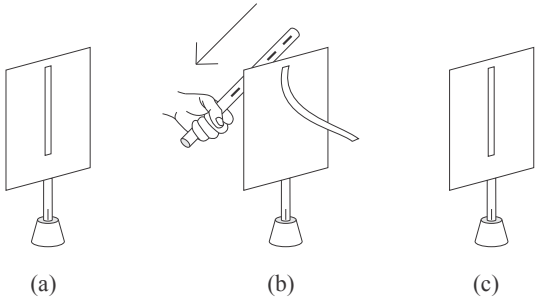


Figura 3.15: (a) Electroscopio con la tira apuntando hacia abajo. (b) Cuando se raspa el borde superior del rectángulo con una pajita, la tira sube. (c) Cuando se retira la pajita, la tira vuelve a bajar casi inmediatamente en tiempo lluvioso.

Retire la pajita frotada. La tira caerá poco después, figura 3.15 (c). Cuanto mayor sea la humedad del aire, más rápida será la descarga del electroscopio. Dependiendo del valor de esta humedad, el aire puede comportarse como un mal o un buen conductor. La presencia de vapor de agua en el aire húmedo es una de las razones por las que se comporta como un conductor, ya que el agua en sí misma es un buen conductor para los experimentos habituales de electrostática.[10] Una superficie cargada puede atraer moléculas o gotas de agua que, al entrar en contacto, se cargan y luego son repelidas por la superficie. Véase el mecanismo *ACR* descrito en la sección 4.4. Este proceso puede descargar la superficie.

En condiciones de humedad, el electroscopio presenta un comportamiento anormal en comparación con lo que ocurre en condiciones de sequedad. Por ejemplo, es más difícil cargarlo. Además, el electroscopio cargado se descarga más fácilmente en tiempo húmedo que en tiempo seco. Hay dos factores principales que influyen en el comportamiento de los electroscopios: el factor I y el factor II. El electroscopio está rodeado de aire y conectado al suelo por la pajita de plástico que sostiene su cartón. Puede descargarse a través del aire ambiente (factor I) o a través de la pajita de plástico que lo sostiene (factor II). La sección 3.1 demostró que el agua dulce y el agua de lluvia se comportan como buenos conductores para los experimentos electrostáticos. Factor I: la humedad del aire aumenta la conductividad de la atmósfera. Por lo tanto, un electroscopio electrizado puede perder fácilmente su carga en el entorno circundante. Factor II: el vapor de agua también puede condensarse en la superficie

[10] Secciones 7.11 y 7.13 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

de cualquier material conectado a tierra y que sostenga su cartón, como la pajita de plástico. Esta humedad acumulada en la superficie de la pajita puede hacer que se comporte como un conductor, facilitando el flujo de partículas electrizadas hacia la tierra. Este efecto es especialmente relevante en materiales hidrófilos.

3.3.7 La orientación del cuerpo con respecto a la tensión aplicada

Hay ciertos materiales anisotrópicos cuya resistencia eléctrica varía en función de la dirección u orientación del cuerpo. El grafito, por ejemplo, tiene una estructura laminada o plana. Su resistencia eléctrica es baja a lo largo del plano de las capas y alta en una dirección ortogonal a estas capas.

Hay ciertos materiales polares que se comportan como conductores en una dirección y como aislantes en la dirección opuesta. En otras palabras, tienen una baja resistencia al flujo de corriente en una dirección y una alta resistencia en la dirección opuesta. El ejemplo más común e importante es el diodo semiconductor. Se puede adquirir fácilmente a bajo precio en tiendas de electrónica (unos céntimos por diodo). Tiene numerosas aplicaciones en la industria electrónica, donde se utiliza como rectificador de corriente eléctrica, interruptor, etc. La figura 3.16 (a) muestra su aspecto, mientras que la figura 3.16 (b) presenta su símbolo en un esquema de circuito. Sus dos terminales se denominan ánodo y cátodo.

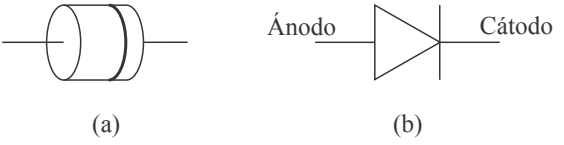


Figura 3.16: (a) Representación de un diodo real. (b) Símbolo utilizado en un esquema de circuito.

Experimento 3.33 — *Polaridad del diodo*

Observe el comportamiento de un diodo en un circuito simple que contiene una pequeña bombilla de 1.5 voltios y un casquillo, una o varias pilas de 1.5 V, así como algunos trozos de alambre metálico. Utilice una sola pila o dos pilas conectadas en serie. Monte un comprobador de circuitos como el de la figura 3.17 (a). En esta configuración, la bombilla debe encenderse, lo que indica no solo que todas las conexiones eléctricas se realizaron correctamente, sino también que el diodo en esta orientación se comporta como un conductor. En esta configuración, el diodo está «polarizado en sentido directo», con el ánodo del diodo conectado al terminal positivo de la pila.

Cuando se invierte la polaridad del diodo, como en la figura 3.17 (b), la bombilla no se enciende. En esta configuración, el ánodo del diodo está conectado al terminal negativo de la batería. El diodo está «polarizado en sentido inverso» y se comporta como un aislante.

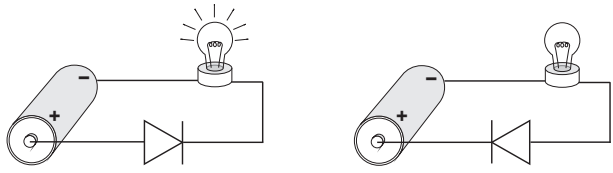


Figura 3.17: (a) El diodo está polarizado en sentido directo y se comporta como un conductor. La corriente puede circular en esta orientación. (b) El diodo está polarizado en sentido inverso y se comporta como un aislante. La corriente no puede circular en esta orientación.

Este comportamiento es fascinante. La simple orientación del diodo con respecto a la batería modifica completamente sus propiedades conductoras. Este experimento demuestra que el diodo es polar. No es fácil comprender cómo puede actuar así. Es difícil explicar su constitución interna en términos sencillos. En cualquier caso, una vez comprendido su funcionamiento en experimentos como este, resulta fácil utilizarlo en numerosas aplicaciones diferentes.

Experimento 3.34 — *Aplicar alta tensión a un diodo*

El experimento 3.33 utilizó un diodo, una pila, una bombilla y algunos trozos de alambre metálico. Demostró que un diodo puede comportarse como conductor o aislante, dependiendo de su orientación con respecto a la pila. Este comportamiento conductor o aislante del diodo depende de la diferencia de potencial que actúa entre sus extremos. En este experimento, una o varias pilas generaron una diferencia de potencial de unos pocos voltios entre sus extremos. En los experimentos electrostáticos, por el contrario, solemos trabajar con diferencias de potencial que van de 1 000 V a 10 000 V.

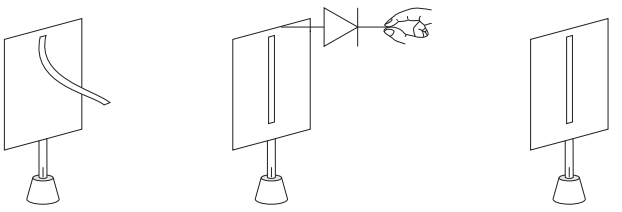
El presente experimento analiza el comportamiento de un diodo en electrostática.

Cargue un electroscopio, figura 3.18 (a). Sostenga el diodo con su cátodo en la mano y toque su ánodo sobre el cartón del electroscopio cargado. La tira de papel de seda cae inmediatamente, figura 3.18 (b). Esta tira permanece vertical después de retirar el diodo, lo que indica que el electroscopio se descargó.

El electroscopio también se descarga cuando el diodo se sujeta por su ánodo, mientras que su cátodo toca el cartón del electroscopio, figura 3.19.

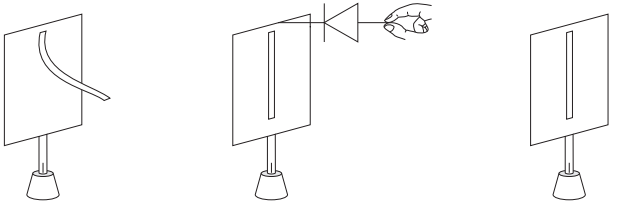
En conclusión, el diodo se comporta como un conductor en los experimentos electrostáticos no solo cuando está polarizado en sentido directo, sino también cuando está polarizado en sentido inverso. Este es otro ejemplo que demuestra que las propiedades conductoras o aislantes de un cuerpo dependen no solo de la naturaleza o la composición química del cuerpo, sino también de la diferencia de potencial externa aplicada a los extremos del cuerpo, como se muestra en la subsección 3.3.2.

En este experimento no especificamos si el electroscopio estaba cargado positiva o negativamente. Este aspecto no es relevante para el resultado del experimento. En otras palabras, los comportamientos indicados en las figuras 3.18 y 3.19 se producen no



(a) (b) (c)

Figura 3.18: (a) Un electroscopio cargado. (b) Mientras sostiene el cátodo del diodo en la mano, toque su ánodo en el cartón del electroscopio, observando que su tira cae inmediatamente. (c) La tira permanece vertical después de retirar el diodo.



(a) (b) (c)

Figura 3.19: (a) Un electroscopio cargado. (b) Mientras sostiene el ánodo del diodo en la mano, toque su cátodo en el cartón del electroscopio, observando que su tira cae inmediatamente. (c) La tira permanece vertical después de retirar el diodo.

solo para un electroscopio cargado positivamente, sino también para un electroscopio cargado negativamente. En ambos casos, el diodo se comporta como un conductor, ya sea polarizado en sentido directo o inverso.

Experimento 3.35 — *Polaridad del LED*

Existen algunos tipos especiales de diodos que emiten luz, llamados diodos electroluminiscentes o LED. Se presentan en diferentes formas. La figura 3.20 (a) muestra cómo son, mientras que la figura 3.20 (b) muestra su símbolo en un esquema de circuito. Son baratos y fáciles de encontrar en tiendas de electrónica (unos céntimos por LED). Se encienden cuando se aplica una tensión de 1.5 V o 3 V a sus patas.

Pueden sustituir a las bombillas de las secciones 2.7, 3.2 y de la subsección 3.3.2. Sin embargo, hay que tener en cuenta que están polarizadas, como cualquier otro diodo. Es decir, cuando el LED está polarizado en sentido directo, se enciende, como se muestra en la figura 3.21. En esta configuración, el terminal positivo de la batería está conectado al ánodo del LED, mientras que el terminal negativo de la batería está conectado a su cátodo.

Sin embargo, cuando se polariza en sentido inverso, no se enciende, como se muestra en la figura 3.22.

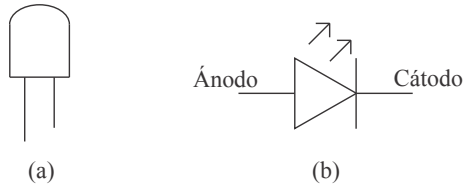


Figura 3.20: (a) Representación de un LED real. (b) Símbolo utilizado en un esquema de circuito.

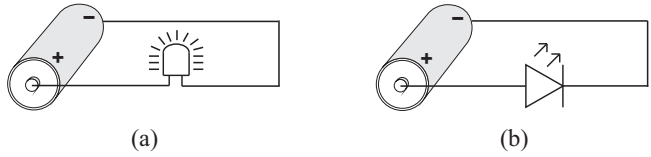


Figura 3.21: (a) LED encendido en polarización directa. (b) LED representado en un esquema de circuito.

3.3.8 La temperatura

La resistencia eléctrica de muchos materiales varía en función de su temperatura. En el caso de los metales, por ejemplo, su resistencia aumenta con la temperatura, pero no de forma lineal. Algunas sustancias metálicas se vuelven superconductoras (resistencia nula) a temperaturas suficientemente bajas.

La resistencia eléctrica de los aislantes también varía con la temperatura, pero su comportamiento no es tan sencillo como el de los metales. En algunos aislantes, la resistencia disminuye al aumentar la temperatura. Esta relación no suele ser lineal.

En general, la resistencia de los semiconductores disminuye al aumentar la temperatura. En algunos materiales, sigue una ley exponencial.

Existen ciertos materiales llamados termistores cuya resistencia depende en gran medida de la temperatura. En algunos de ellos, la resistencia disminuye cuando aumenta la temperatura, mientras que en otros aumenta cuando aumenta la temperatura.

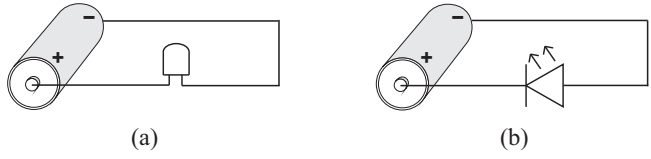


Figura 3.22: (a) LED apagado en polarización inversa. (b) LED representado en un esquema de circuito.

3.3.9 La iluminación

Existen ciertos materiales, generalmente semiconductores, cuya resistencia varía en función de la intensidad de la luz incidente. Se denominan fotorresistencias, resistencias dependientes de la luz (LDR) o células fotoeléctricas. Normalmente, su resistencia disminuye cuando aumenta la intensidad de la luz incidente, presentando así una fotoconductividad. Pueden comportarse como aislantes en la oscuridad y como conductores a la luz del día. Se utilizan como sensores de luz, en el control de la iluminación, como circuitos de detección sensibles a la luz, circuitos de conmutación de luz, dispositivos de alarma, detectores de incendios, dispositivos de medición de la intensidad luminosa, alumbrado público, detectores de infrarrojos, etc.

3.3.10 Otros factores

Existen otros factores internos y externos que pueden influir en el comportamiento conductor o aislante de un cuerpo. Por ejemplo: la presión, las impurezas en la composición del cuerpo, su proceso de fabricación, etc. La conductividad del aire, por ejemplo, varía en función de la presión. Estos otros factores no se tratarán en esta obra. Es importante tener en cuenta que ningún material es conductor o aislante por sí mismo. Simplemente «se comporta como» un conductor o un aislante. Este comportamiento depende no solo de ciertas propiedades intrínsecas del cuerpo, sino también de las condiciones externas a las que está sometido. Al modificar estos factores internos y externos, se pueden cambiar las propiedades conductoras o aislantes de cualquier material.

3.4 Leyes relativas a los circuitos eléctricos que transportan corrientes continuas

Esta sección presenta brevemente algunas de las principales leyes relativas a los circuitos eléctricos que transportan corrientes continuas.

Luigi Galvani (1737–1798) fue un científico italiano y profesor de anatomía en la Universidad de Bolonia. Llevó a cabo importantes investigaciones sobre la electricidad animal en la década de 1780. En particular, observó que los músculos de las patas de las ranas muertas se contraían cuando se tocaban sus nervios con un arco metálico, y publicó un famoso trabajo sobre este tema. Alessandro Volta (1745–1827) se interesó por este tema. Al principio aceptó las ideas de Galvani sobre la electricidad animal, pero luego rechazó por completo este concepto. Según Volta, la esencia de este efecto estaba relacionada con un arco bimetálico que tocaba los nervios de la rana. Durante esta controversia, construyó su famosa pila eléctrica entre 1795 y 1799. En 1800, publicó sus descubrimientos en un artículo muy importante que se tradujo a varios idiomas.[11] Desde entonces, los científicos disponían de una fuente controlada de corriente continua alimentada por una fuente de baja tensión.

Mientras trabajaba con una pila voltaica, H. C. Ørsted (1777–1851) observó en 1820 la desviación de una aguja imantada cerca de un largo alambre conductor de corriente

[11] [Vol00a], [Vol00b], [Vol64], [Mag06] y [MA08].

continua. Su obra de cuatro páginas en la que describía este descubrimiento tuvo un gran impacto en muchos científicos y fue traducida a varios idiomas.[12] A raíz de estas investigaciones, Thomas Johann Seebeck (1770–1831) descubrió el efecto termoeléctrico en 1821. Observó, en particular, que la aguja de una brújula se desviaba por un bucle cerrado formado por dos metales diferentes unidos en dos puntos, siempre que hubiera una diferencia de temperatura entre los dos puntos de unión. Este fenómeno indicaba la presencia de una corriente eléctrica que circulaba alrededor del bucle.

Humphry Davy (1778–1829) fue un químico inglés que también trabajó en el campo de la electricidad. En 1821, descubrió que la conductividad de un alambre metálico conectado a los terminales de una pila voltaica es inversamente proporcional a su longitud, directamente proporcional a su sección transversal e independiente de la forma de dicha sección transversal. De ello dedujo que una corriente constante circula por toda la sección transversal del metal y no solo por su superficie. Entre 1823 y 1826, Antoine-César Becquerel (1788–1878) confirmó estos resultados mediante investigaciones independientes.

Georg Simon Ohm (1789–1854) fue un científico alemán influenciado por los descubrimientos de Volta, Ørsted y Seebeck. Entre 1825 y 1827, llevó a cabo importantes experimentos sobre circuitos eléctricos que transportaban corrientes continuas. Al principio, trabajó con una pila voltaica. Las primeras pilas no eran estables y perdían rápidamente su potencia, lo que reducía la diferencia de potencial entre sus terminales. Entonces decidió utilizar un par termoeléctrico como fuente de tensión constante. La ventaja de esta fuente, en comparación con las primeras pilas, era que cuando las dos uniones de su fuente se mantenían a temperaturas constantes, podía obtener una diferencia de tensión que se mantenía constante durante toda la duración de sus experimentos. También estudió la conductividad de diferentes metales. Estudió la corriente producida en su circuito en función de la composición de los alambres conectados entre los terminales de su fuente de tensión. También analizó cómo la corriente producida se veía influida por la longitud del metal, por su sección transversal y por la diferencia de «fuerza electroscópica» entre los extremos del alambre. Identificó esta fuerza electroscópica (una expresión que él mismo inventó) con la densidad volumétrica de carga. No fue hasta 1849 cuando G. Kirchhoff (1824–1887) identificó correctamente la fuerza electroscópica de Ohm con el concepto de potencial electrostático. Estas investigaciones dieron lugar a lo que se conoce como la ley de Ohm en los manuales.[13] Según esta ley, la diferencia de potencial que actúa entre los extremos de un metal es directamente proporcional a la corriente eléctrica que lo atraviesa. La constante de proporcionalidad se denomina resistencia del metal. Depende del tipo de metal, siendo directamente proporcional a la longitud del hilo e inversamente proporcional a su sección transversal.

[12] [Oer20b], [Oer20a], [Oer65], [Fra81] y [Ørs86].

[13] [Ohm25], [Ohm26], [Ohm66], [OF38], [Whe43], [Kir49], [Kir50], [Ros90, pp. 210–214 y 494–499], [Ram53], [Sch63], [Whi73a, pp. 88–93 y 224–226], [JM86, pp. 51–62], [Ach96, capítulos 6, 9, 10, 11 y 12], [Kip09], [Här12] y [BW10].

Capítulo 4

Conductores y aislantes en algunos experimentos sencillos

4.1 Conductores y aislantes en el efecto del ámbar

El experimento más antiguo sobre la electricidad es lo que se conoce como el efecto del ámbar, sección 1.1. Casi todo el mundo realizó un experimento similar en el liceo. Frote un bolígrafo de plástico o una regla acrílica con el cabello. Entonces atraerá los trozos de papel esparcidos sobre la mesa. El volumen 1 de esta obra presenta una descripción de lo que ocurre en este efecto, así como numerosos experimentos relacionados con él.[1] La presente sección muestra que nuestra comprensión de lo que ocurre en este efecto es diferente de la explicación que se encuentra en la mayoría de los manuales.

Supongamos que hay muchos trozos de papel sobre una mesa. Electrice un peine de plástico frotándolo con el cabello. Acérquelo a los trozos de papel. Cuando esté lo suficientemente cerca, algunos trozos de papel se verán atraídos visiblemente por él y se elevarán hacia el plástico frotado. Este es el fenómeno observado. Ahora examinaremos su explicación, comenzando por lo que generalmente se indica en los manuales.

4.1.1 Explicación del efecto del ámbar en los manuales escolares

En la mayoría de los manuales, los autores afirman que un trozo de plástico frotado (peine, regla, etc.) se electriza y polariza las moléculas de cualquier trozo de papel que se encuentre cerca sobre una mesa. Según estos manuales, la parte de cada molécula que está más cerca del plástico electrizado se electriza con cargas de signo opuesto a

[1] Sección 8.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

las del plástico electrizado. La parte de cada molécula que está más alejada del plástico electrizado se electriza con cargas del mismo signo que las del papel electrizado. Los cuerpos electrizados con cargas del mismo signo se repelen, mientras que los electrizados con cargas opuestas se atraen. La fuerza eléctrica disminuye a medida que aumenta la distancia entre las cargas que interactúan. Por lo tanto, la parte de cada molécula que está más cerca del plástico será atraída hacia el plástico electrizado con una fuerza de intensidad superior a la repulsión ejercida por el plástico sobre la parte de cada molécula que está más alejada de él. Cada molécula polarizada del papel sería entonces atraída hacia el trozo de plástico frotado. Habría una fuerza de atracción neta F ejercida por el plástico frotado sobre todas las moléculas de un trozo de papel. Si esta fuerza F es mayor que el peso W del papel, entonces el papel se elevará hacia el plástico frotado. En esencia, la explicación típica de la fuerza de atracción ejercida por el plástico frotado sobre un trozo de papel se basa en la diferencia entre las fuerzas de atracción y repulsión ejercidas por el plástico electrizado sobre las partes opuestas de cada molécula polarizada del papel. La figura 4.1 ilustra esta explicación.

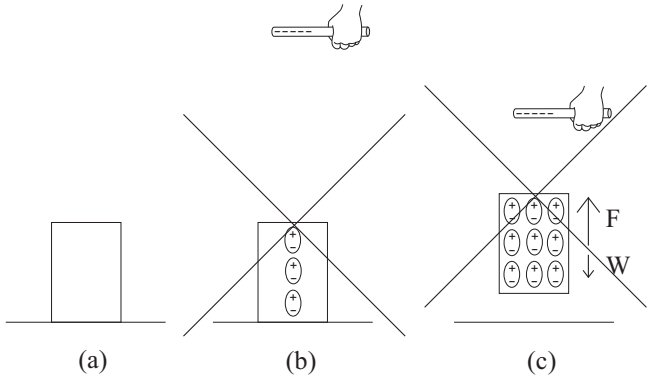


Figura 4.1: Explicación típica del efecto del ámbar. (a) Un trozo de papel sobre la mesa. (b) Moléculas polarizadas del papel debido a la presencia de una pajita de plástico electrizada cerca. (c) Cuando la pajita de plástico se acerca aún más, la polarización de las moléculas aumenta. Si la fuerza de atracción F ejercida por el plástico electrizado sobre todas las moléculas es mayor que el peso W del papel, este será atraído hacia el plástico electrizado.

Creemos que esta explicación del efecto del ámbar no es correcta. Por eso dibujamos un gran símbolo «×» en la figura 4.1. El fenómeno que se presenta en los manuales puede ocurrir. Pero incluso cuando las moléculas del papel se polarizan por el trozo de plástico frotado cerca, esta polarización no debería ser el factor principal responsable de la atracción del pequeño trozo de papel. En esta descripción que presentan la mayoría de los manuales, se supone implícitamente que los trozos de papel se comportan como aislantes. Sin embargo, la mayoría de los tipos de papel y la mayoría de las sustancias ligeras que suelen ser atraídas por un trozo de ámbar frotado o por un trozo de plástico frotado se comportan como conductores.

Además, los manuales no tratan la naturaleza del soporte sobre el que se encuentran inicialmente los trozos de papel. En otras palabras, no mencionan si este soporte se comporta como un conductor o como un aislante.

4.1.2 Nuestra explicación del efecto del ámbar

A continuación, presentamos nuestra descripción de los principales fenómenos relacionados con el efecto del ámbar. La figura 4.2 (a) ilustra el pequeño trozo de papel representado por la letra C, lo que indica que se trata de un conductor. Suponemos aquí que descansa sobre una superficie aislante I.

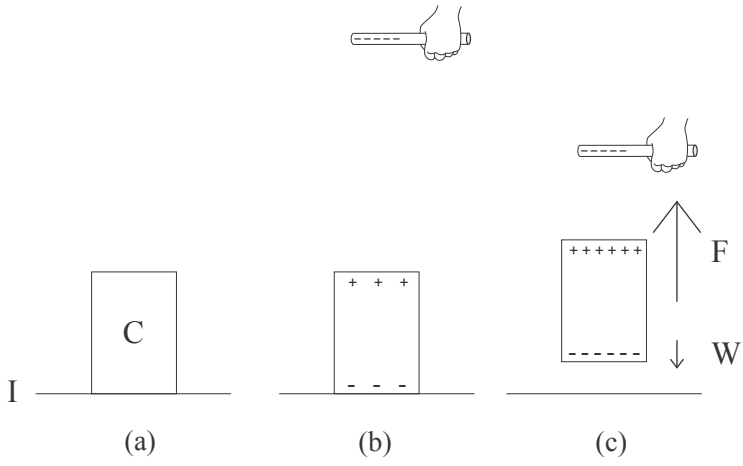


Figura 4.2: (a) Trozo de papel conductor C sobre una superficie aislante I. (b) Polarización macroscópica del conductor debido a la presencia de un trozo de plástico electrizado cercano. (c) Cuando el plástico se acerca aún más, aumenta la cantidad de cargas polarizadas en el papel. Si la fuerza de atracción F ejercida por el plástico electrizado sobre el papel conductor macroscópicamente polarizado es superior al peso W del papel, este será atraído hacia el plástico.

En esta configuración, el principal efecto que se produce cuando un plástico frotado se acerca a estos materiales conductores es su polarización macroscópica. Es decir, una verdadera separación de las cargas en todo el volumen del material. En lugar de una simple polarización de las moléculas del papel, la presencia del trozo de plástico electrizado cercano crea una separación macroscópica de las partículas electrizadas en toda la superficie del papel. La figura 4.2 (b) ilustra cualitativamente esta polarización macroscópica de un trozo de papel cuando se coloca sobre una superficie aislante I. En esta figura no representamos las moléculas polarizadas de la superficie aislante. Cuando el plástico se acerca aún más, aumenta la cantidad de cargas polarizadas en el papel. Si la fuerza de atracción F ejercida por el plástico electrizado sobre el papel conductor macroscópicamente polarizado es superior al peso W del papel, este será atraído hacia el plástico, figura 4.2 (c).

Supongamos dos cuerpos del mismo tamaño, peso y forma. Uno es conductor y el otro aislante. Están en reposo sobre una mesa aislante, lejos uno del otro. Supongamos además que un plástico electrizado se desplaza hacia estos cuerpos, llegando a la misma pequeña distancia d de ambos cuerpos. Cuando se encuentra a esta distancia d del cuerpo aislante, las moléculas del cuerpo se polarizan. Esta polarización microscópica provocará una polarización efectiva de todo el cuerpo aislante. Por el contrario, cuando el plástico electrizado se encuentra a la misma distancia d del cuerpo conductor, provocará una polarización macroscópica del conductor. Esta polarización macroscópica del conductor será superior a la polarización efectiva del aislante. La figura 4.1 (c) ilustra la polarización del trozo de papel tal y como se presenta en los manuales. Estos consideran, erróneamente, que el trozo de papel es un aislante. La polarización efectiva de este trozo de papel está representada por tres cargas positivas en la parte superior del papel y tres cargas negativas en su parte inferior, mientras que las cargas positivas y negativas en el interior se anulan esencialmente entre sí. La figura 4.2 (c), por el contrario, ilustra cualitativamente la polarización real del papel considerándolo como un material conductor. Se representa mediante seis cargas positivas en su parte superior y seis cargas negativas en su parte inferior. Esta polarización es mayor que la polarización efectiva del material aislante representado en la figura 4.1 (c). Dado que esta polarización macroscópica de un material conductor es mayor que la polarización efectiva de un material aislante, la fuerza de atracción neta F ejercida por el plástico frotado sobre el papel polarizado se representa en la figura 4.2 (c) mediante un vector de mayor amplitud que la fuerza de atracción F representada en la figura 4.1 (c).

Sin embargo, el comportamiento de atracción más común observado en el efecto del ámbar se produce cuando un cuerpo conductor ligero descansa sobre un soporte conductor C, figura 4.3 (a).

Ejemplos de esta configuración: trozos de papel en el suelo, sobre una mesa de madera (la madera no debe estar barnizada), sobre una superficie metálica, etc. Cuando un trozo de papel conductor se encuentra sobre un soporte conductor, el papel se conecta a tierra. Por lo tanto, cuando un trozo de plástico electrizado se acerca al papel, este adquiere una carga neta de signo opuesto al del plástico electrizado. Esta configuración se representa en la figura 4.3 (b). En esta imagen no representamos las cargas netas sobre la superficie conductora. Cuando el plástico se acerca aún más, la cantidad de cargas en el papel aumenta. Si la fuerza de atracción F es mayor que el peso W del papel, este se desplaza hacia la pajita, figura 4.3 (c).

La fuerza neta o total F ejercida por el plástico electrizado sobre el trozo de papel que se encontraba sobre una superficie conductora, figura 4.3 (c), es mayor que la fuerza neta representada en la figura 4.2 (c).

Las figuras 4.1 (c), 4.2 (c) y 4.3 (c) suponen que la pajita de plástico está igualmente electrizada en todos los casos. Además, siempre se dibuja a la misma distancia d de un trozo de papel específico que se mueve hacia ella. El tamaño de las flechas indica la intensidad de la fuerza F ejercida por la pajita electrizada sobre el papel. La fuerza F de la figura 4.2 (c) es mayor que la fuerza de la figura 4.1 (c) porque la polarización de un conductor es mayor que la polarización efectiva de un aislante. La fuerza F de la figura 4.3 (c) es mayor que la fuerza de la figura 4.2 porque el papel de la figura 4.3 (c) tiene una carga neta distinta de cero, mientras que el papel de la figura 4.2 (c) solo está polarizado, sin carga neta.

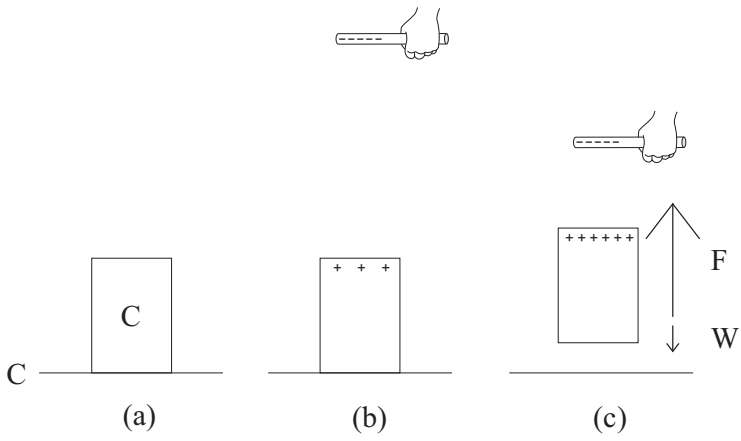


Figura 4.3: (a) Trozo de papel conductor C colocado sobre una superficie conductora C. Este papel está inicialmente conectado a tierra. (b) Cuando una pajita electrizada se acerca al papel, este adquiere una carga neta de signo opuesto al de la pajita. (c) Cuando el plástico se acerca aún más, la cantidad de cargas en el papel aumenta. Si la fuerza de atracción F es mayor que el peso W del papel, este se desplaza hacia la pajita.

Es un prejuicio erróneo muy extendido en los manuales y en la mente de muchos profesores y alumnos suponer que materiales como el papel, la madera, el vidrio y el caucho siempre se comportan como aislantes. Este comportamiento puede darse a baja tensión. Sin embargo, no suele darse en experimentos electrostáticos que implican diferencias de potencial que suelen oscilar entre 1000 V y 10 000 V. Cuando aplicamos estas altas tensiones entre los extremos de un trozo de papel, madera, vidrio o caucho, este material suele comportarse como un conductor. Estas tensiones elevadas son muy comunes en experimentos similares al efecto del ámbar. Por eso nos esforzamos en presentar una descripción detallada de este efecto en el volumen 1 de esta obra, mostrando varias figuras didácticas.[2]

El primer experimento presentado en el volumen 1 de nuestro libro trataba sobre el efecto del ámbar. El último experimento del volumen 1 presentaba un fenómeno similar. Este último experimento nos permitió comprobar la carga neta adquirida por el trozo de papel atraído. Además, el volumen 1 trataba varios instrumentos de papel en los que el papel se comportaba como un conductor. También utilizamos en estos instrumentos sustancias conductoras similares, como el cartón y el papel de seda. Podemos citar en particular el péndulo eléctrico y el electroscopio.[3] La organización del libro se hizo a propósito. Lo pensamos detenidamente. Es muy sencillo realizar un experimento similar al efecto del ámbar. Sin embargo, es complejo describir correctamente los numerosos factores importantes asociados a este fenómeno.

[2] Sección 8.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[3] Secciones 2.1, 2.2, 4.4, 6.1, 6.5 y 7.15 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

4.1.3 Es importante presentar una explicación detallada del efecto del ámbar

La subsección 4.1.1 presentaba la explicación de los manuales sobre el efecto del ámbar. Nuestra propia explicación de este efecto se presentó en la subsección 4.1.2. Nuestra descripción es muy diferente de la que aparece en los manuales habituales. Consideramos que es importante corregir los manuales por varias razones:

- El efecto del ámbar es el experimento más antiguo sobre la electricidad. Los manuales modernos no deberían presentar una explicación errónea de este antiguo fenómeno.
- La mayoría de la gente realizó un experimento similar en el instituto, solo por diversión, como un juego infantil. Frotaron una pajita de plástico o una regla acrílica con el cabello y atrajeron trozos de papel colocados sobre una mesa. A veces, esta divertida actividad será una de las pocas experiencias de física que realizarán en su vida, especialmente para aquellos que abandonan sus estudios después del liceo o para aquellos que cursan estudios de humanidades o ciencias biológicas en la universidad. Por lo tanto, es importante presentar una imagen clara y correcta de este efecto.
- La explicación de la subsección 4.1.1 puede considerarse más sencilla que la descripción presentada en la subsección 4.1.2. Aunque sea así, es mejor presentar una descripción minuciosa y compleja que sea esencialmente correcta, en lugar de una explicación sencilla pero errónea. La explicación más sencilla no siempre es la mejor. Aprendemos muchos aspectos importantes cuando reflexionamos detenidamente sobre lo que ocurre en un fenómeno aparentemente sencillo. Nos damos cuenta de que hay muchos aspectos relevantes que hay que tener en cuenta para describirlo correctamente.
- Incluso algunos fenómenos aparentemente sencillos y cotidianos pueden esconder sorpresas y sutilezas relevantes, como es el caso del efecto del ámbar.
- La descripción correcta de este fenómeno requiere comprender qué son los conductores y los aislantes, así como algunas de sus propiedades principales. Cuando comprendemos estos aspectos, empezamos a tener una imagen más completa de lo que ocurre en este fenómeno. Entonces podemos tener en cuenta estos aspectos extremadamente importantes al analizar otros fenómenos naturales más complejos.
- Gracias a una explicación correcta, aprendemos que los cuerpos ligeros (como trozos de papel, plumones o un hilo de algodón) atraídos por el plástico frotado se comportan normalmente como conductores en los experimentos electrostáticos.
- Con una explicación correcta, también aprendemos que la superficie sobre la que descansan los cuerpos ligeros antes de la atracción (las superficies de metal o madera, por ejemplo) se comporta normalmente como una superficie conductora y conectada a tierra en los experimentos electrostáticos.

Estos dos últimos puntos son aspectos muy importantes que todo el mundo debería aprender. Al comprender estos dos hechos, podemos explicar muchos otros fenómenos curiosos relacionados con la electricidad.

4.2 Conductores y aislantes en el experimento sobre la atracción de un chorro de agua

Muchas personas ya realizaron o al menos observaron un sencillo experimento descrito en numerosos manuales sobre electricidad, que muestra la atracción de un chorro de agua que sale de un grifo, como en el experimento 3.7. Supongamos que una pajita de plástico se cargó negativamente por fricción. Acérquela al chorro de agua. El agua se curva hacia la pajita, figura 3.8. Esta atracción representa el fenómeno observado. En el volumen 1 de esta obra, presentamos una descripción detallada de los orígenes de esta atracción del chorro de agua.[4] Queremos destacar aquí que esta descripción difiere de las explicaciones que se ofrecen en la mayoría de los manuales didácticos.

4.2.1 Explicación de la atracción de un chorro de agua en los manuales escolares

La mayoría de los manuales que tratan este fenómeno mencionan que el agua está compuesta por moléculas polares. Debido a la diferencia de electronegatividad entre los átomos de oxígeno e hidrógeno unidos, existe un momento dipolar permanente en cada molécula. El átomo de oxígeno tiene carga negativa, mientras que los átomos de hidrógeno tienen carga positiva. Este desequilibrio da lugar a un momento dipolar molecular, que apunta desde el átomo de oxígeno negativo hacia una región positiva entre los dos átomos de hidrógeno. Por lo tanto, incluso en ausencia de influencias externas, cada molécula de agua tiene permanentemente un lado positivo y un lado negativo de igual magnitud. La explicación de la curvatura del chorro en los manuales se basa esencialmente en esta propiedad de las moléculas de agua. Inicialmente, cada molécula de agua apunta en una dirección arbitraria. Mencionan que cuando un cuerpo electrizado se acerca al chorro, estas moléculas polares son orientadas por dicho cuerpo. Consideremos una pajita negativa cerca del chorro. Debido a la fuerza eléctrica ejercida por el plástico electrizado sobre las partes electrizadas de cada molécula, las moléculas de agua polares girarán. En particular, el lado positivo de cada molécula apuntará hacia la pajita negativa, acercándose a ella, mientras que el lado negativo de cada molécula se alejará de ella, alejándose ligeramente de la pajita. La fuerza eléctrica disminuye al aumentar la distancia entre los cuerpos que interactúan. Por lo tanto, la parte positiva de cada molécula orientada será atraída por la pajita con una fuerza ligeramente superior a la fuerza repulsiva que actúa sobre la parte negativa de cada molécula. Quedaría una fuerza de atracción neta sobre cada molécula de agua apuntando hacia la pajita electrizada. Según los manuales, esto explicaría la curvatura del chorro, como se muestra cualitativamente en la figura 4.4.

[4] Secciones 2.5 y 7.11 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

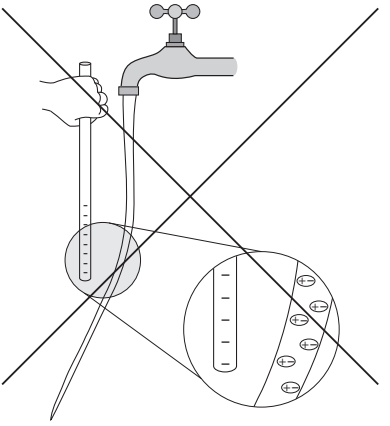


Figura 4.4: Explicación errónea de la desviación del chorro de agua debido a la orientación de las moléculas polares del agua cuando una pajita frotada se acerca al agua.

Creemos que esta explicación no es correcta. Por eso dibujamos un gran símbolo «×» en la figura 4.4. Los manuales parten implícitamente del principio de que el agua es un aislante. Si fuera así, no contendría ninguna carga libre capaz de desplazarse por todo el volumen de agua. La pajita electrizada solo podría orientar las moléculas polares. No dudamos de que las moléculas de agua sean polares y puedan ser orientadas por la pajita electrizada. Sin embargo, este no es el principal mecanismo responsable de la curvatura del chorro.

4.2.2 Nuestra explicación de la atracción de un chorro de agua

A continuación presentamos nuestra descripción de este fenómeno. La principal diferencia entre nuestra descripción y la explicación que se da en los manuales es que consideramos que el agua del grifo es un buen conductor en los experimentos electrostáticos. Después de todo, descarga un electroscopio cargado, como muestra el experimento 3.5, figura 3.6. Por supuesto, el agua del grifo está compuesta principalmente por moléculas polares H_2O. Pero también contiene sales, diversas impurezas, iones H_3O^+ y OH^-, así como otros iones, etc. Estas sustancias hacen que el agua se comporte como un conductor.

Consideremos primero un grifo que gotea, figura 4.5 (a).

Una pajita con carga negativa desvía la trayectoria de las gotas de agua cercanas, figura 4.5 (b). Supongamos que la pajita está alejada del grifo y que solo afecta a las gotas de agua cercanas. Supongamos que el agua se comporta como un conductor. Cuando una pajita negativa se acerca a las gotas, estas se polarizan. Se produce una verdadera separación de cargas en cada gota. La parte más cercana a la gota se electriza positivamente, mientras que la parte más alejada se electriza negativamente, figura 4.6.

La intensidad de la fuerza eléctrica aumenta cuando disminuye la distancia entre los cuerpos que interactúan. Por lo tanto, la parte positiva de la gota es atraída por la

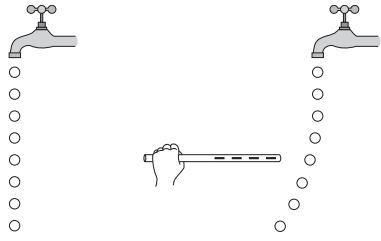


Figura 4.5: (a) Un grifo que gotea. (b) Una pajita con carga negativa atrae las gotas de agua.

Figura 4.6: Una gota de agua polarizada por la pajita negativa.

pajita con una fuerza mayor que la fuerza repulsiva que actúa sobre la parte negativa de la gota. Este desequilibrio de fuerzas produce una fuerza de atracción total que actúa sobre la gota. Esta se desplaza entonces hacia la pajita.

Consideremos ahora un chorro de agua continuo. Cuando una pajita negativa se desplaza hacia el chorro, el agua se curva. La parte del chorro más cercana a la pajita se carga positivamente, mientras que la parte más alejada de la pajita se carga negativamente. En el caso de un chorro continuo, la parte más alejada de la pajita negativa se neutraliza mediante las partículas electrizadas que pueden intercambiarse entre el agua y la Tierra. Al fin y al cabo, se trata de un chorro conectado a tierra, ya que el agua conductora que cae está en contacto con el agua del grifo, las tuberías, el depósito, etc. El chorro de agua se electriza entonces positivamente en el lado cercano a la paja negativa.[5] Se producirá una atracción entre la pajita negativa y el chorro positivo, lo que hará que el agua se incline hacia el plástico. La figura 4.7 ilustra cualitativamente la distribución de las cargas en el chorro de agua.

Una vez más, es erróneo suponer que el agua del grifo es un aislante. Si fuera así, sus moléculas polares se alinearían por una fuerza eléctrica externa. Las moléculas alineadas serían entonces atraídas por el cuerpo cargado externo. Pero, en realidad, el agua dulce contiene muchas sales, minerales e impurezas que están repletas de partículas con carga eléctrica, también llamadas iones, como H_3O^+ y OH^-. En presencia de grandes diferencias de potencial, estos iones electrizados pueden desplazarse en el agua, de modo que esta adquiere un comportamiento conductor. Una masa de agua puede polarizarse macroscópicamente cuando se acerca un cuerpo electrizado externo. Cuando este volumen de agua se conecta eléctricamente a tierra, adquiere una carga neta de signo opuesto al del cuerpo electrizado cercano. Los efectos causados por esta polarización macroscópica o por esta carga neta acumulada en el

[5] Secciones 2.5 y 7.11 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

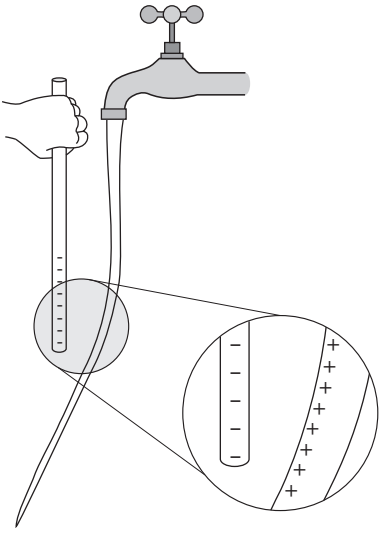


Figura 4.7: Electrización del chorro conductor conectado a tierra cuando un cuerpo electrizado se aproxima a él.

volumen de agua serán mucho más importantes que cualquier efecto resultante únicamente de la orientación de sus moléculas polares.[6] Uno de estos efectos puede ser la curvatura del chorro. La amplitud de la curvatura para un líquido conductor como el agua es mucho mayor que la de un líquido aislante como el aceite, suponiendo que ambos líquidos se encuentren a la misma distancia de la misma pajita electrizada, figuras 3.8 y 3.9.

Feynman, Leighton y Sands son algunos de los pocos autores modernos que consideran el agua del grifo como un conductor.[7]

4.2.3 Es importante presentar una explicación detallada del atractivo de un curso de agua

La subsección 4.2.1 presentaba la explicación de los manuales sobre el experimento de desviación de un chorro de agua mediante una pajita electrizada colocada cerca. Nuestra propia explicación de este efecto se presentó en la subsección 4.2.2. Nuestra descripción es muy diferente de la que aparece en los manuales habituales. Consideramos que es importante corregir los manuales por varias razones. Más allá de las razones citadas en la subsección 4.1.3, podemos mencionar:

- El experimento de la atracción de un chorro de agua es uno de los fenómenos eléctricos más sencillos, que aparece en muchos manuales. Los modernos no deberían presentar una explicación errónea de este sencillo fenómeno.

[6] Para un debate sobre este tema, véase [WB11], [Jec12], [BW12a], así como las secciones 2.5 y 7.11 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[7] [FLS64, pp. 8–9].

- La mayoría de las personas vieron este experimento descrito en Internet y tal vez incluso lo hayan realizado ellos mismos en casa o en la escuela. Merecen una imagen clara y correcta de este efecto.

- Gracias a una explicación correcta, aprendemos que el agua se comporta como un conductor en los experimentos electrostáticos. Se trata de un aspecto muy importante que todo el mundo debería conocer. Al comprender este hecho, podemos explicar muchos otros fenómenos curiosos relacionados con la electricidad. En particular, tomamos conciencia del papel crucial que desempeñan el agua y la humedad en estos experimentos.

4.3 Diferencias entre los vidrios antiguos y los modernos

Los fenómenos eléctricos fueron descritos por primera vez por los antiguos griegos, con el famoso efecto del ámbar, sección 1.1. Durante los siglos XVII y XVIII, el ámbar se sustituía generalmente por un tubo de vidrio para realizar estos experimentos. En cuanto a su comportamiento eléctrico, existen tres diferencias principales entre los vidrios antiguos y los modernos. Por vidrios antiguos nos referimos a los tubos, esferas y cilindros de vidrio utilizados por Francis Hauksbee (hacia 1666–1713), Stephen Gray (1666–1736), Charles Du Fay (1698–1739), Jean Antoine Nollet (1700–1770) y Benjamin Franklin (1706–1790), por ejemplo. Por vidrios modernos entendemos los tipos de vidrio habituales que se encuentran en la vida cotidiana en el hogar (por ejemplo, tazas, botellas, tarros de comida, cristales de ventanas, espejos, bombillas, etc.) o en las tiendas minoristas (vasos de precipitados, tubos de ensayo, tubos de cultivo, lentes, láminas de microscopio, prismas, etc.).

Estas diferencias pueden deberse a la composición interna de estos vidrios y también a los procesos de fabricación de estos materiales. Gray, en particular, realizó la mayoría de sus experimentos electrizando un tubo de vidrio flint, que es un tipo especial de vidrio que contiene plomo en su composición.[8] El vidrio flint fue desarrollado por George Ravenscroft (1632–1683) hacia 1662. Es el precursor del vidrio de plomo inglés o cristal (aunque se trata de un material amorfo sin estructura cristalina).

Es importante destacar aquí estas diferencias, no solo por los aspectos históricos relacionados con los experimentos originales de estos primeros científicos, sino también por sus aspectos pedagógicos y didácticos modernos. Después de todo, cuando intentamos reproducir algunos de los primeros experimentos con vidrios modernos, muchas actividades simplemente no funcionan como se describió originalmente. Los fenómenos deseados también pueden producirse únicamente con una intensidad o amplitud muy baja, es decir, con un grado muy pequeño que no es fácilmente observable o detectable. Las tres subsecciones siguientes tratan las principales diferencias entre los vidrios antiguos y los modernos, comenzando por las más relevantes.[9]

[8] [Chi54], [Hau09], [RR57, pp. 570 y 584–585], [Hom81, p. 13] y [Hei99, pp. 235–236].

[9] [Bos11, section 2.5] y [BAC12, section 4.5, pp. 93–100]. Véase también el capítulo 1, secciones 5.1 y 6.3, así como el anexo B, sección B.1 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

4.3.1 El comportamiento conductor o aislante

Stephen Gray frotaba su tubo de vidrio flint con una mano desnuda, tal y como menciona en su artículo de 1707–1708.[10] Después de frotar el tubo de vidrio, lo sostenía en la mano durante los experimentos. Otros investigadores de la época, como Hauksbee, Du Fay y Nollet, también frotaban tubos de vidrio. Estos tubos se fabricaban con el vidrio habitual de la época. La mayoría de las ilustraciones y pinturas de este periodo que representan experimentos eléctricos muestran a los investigadores sosteniendo los tubos frotados con las manos desnudas. Estos tubos no se descargaban al entrar en contacto con la tierra, es decir, al entrar en contacto con las manos de los científicos.

Este hecho significa que los antiguos tubos de vidrio se comportaban como excelentes aislantes. Los tubos electrizados no se descargaban con las manos de los investigadores conectadas a tierra. Por el contrario, muchos tipos de vidrio moderno común se comportan como buenos conductores para los experimentos electrostáticos. Esta es la principal diferencia entre el vidrio antiguo y el moderno.

El comportamiento conductor de muchos tipos de vidrio moderno se puede comprobar fácilmente con el experimento 3.4 de la sección 3.1. De hecho, cuando un trozo de vidrio sostenido en la mano toca el cartón de un electroscopio cargado, se descarga rápidamente. Aunque este comportamiento conductor se da en muchos tipos de vidrio moderno, algunos tipos de vidrio siguen presentando un comportamiento aislante. La propiedad conductora o aislante de un trozo de vidrio depende de su constitución interna, del comportamiento de su superficie y de su proceso de fabricación.

Por lo tanto, es difícil electrizar muchos tipos de vidrio moderno utilizando el procedimiento de Gray. Tome, por ejemplo, un vaso y frótelo con el cabello o con un paño de algodón. Si luego acerca este vaso frotado a trozos de papel colocados sobre la mesa, no se observará ninguna atracción. Incluso cuando hay atracción, suele ser de baja intensidad y difícilmente perceptible. Esta ausencia de atracción se explica por el comportamiento conductor del vidrio moderno. Independientemente de la cantidad de carga adquirida durante el frotamiento, la mayor parte se neutraliza con las cargas del suelo a través de nuestro cuerpo y nuestras manos, tan pronto como cesa el frotamiento. Al fin y al cabo, el vidrio se conecta a tierra a través de la mano.

Según Bossa y sus colaboradores, la conductividad eléctrica de los vidrios puede variar considerablemente en función de su composición química.[11] Por eso, en lo que respecta a los experimentos electrostáticos, hoy en día es fácil encontrar vidrios que se comportan como conductores y otros que se comportan como aislantes. Es fácil electrizar por fricción los materiales aislantes que se sostienen en la mano. Los materiales conductores, por el contrario, solo pueden electrizarse por fricción cuando están aislados del suelo mediante un mango aislante. Por lo tanto, antes de intentar reproducir un experimento antiguo utilizando vidrios modernos, compruebe su comportamiento eléctrico. Esta prueba es muy importante. Si se comportan como aislantes, hay muchas posibilidades de reproducir con éxito el experimento antiguo, obteniendo resultados similares al sostener el tubo de vidrio con la mano. Si, por el contrario, se comportan como conductores, el vidrio debe aislarse del suelo antes de realizar el experimento.

[10] [Chi54, pp. 34 y 37].
[11] [Bos07].

El vidrio debe fijarse a un mango aislante. La mano solo debe tocar este mango y no el vidrio, para evitar cualquier descarga. A continuación, el tubo de vidrio puede frotarse contra otro material. Después, este trozo de vidrio frotado, electrizado y aislado puede utilizarse en diferentes experimentos.

Muchos tipos de vidrio pueden modificar su comportamiento eléctrico con un ligero calentamiento. Un trozo de vidrio conductor puede convertirse en aislante simplemente calentándolo al fuego o en el microondas.

La manipulación deja condensación en la superficie del vidrio. Debe evitarse esta humedad debido a la alta conductividad del agua en comparación con la del vidrio. Algunos vidrios se comportan como conductores debido a la humedad o al vapor de agua acumulado en su superficie. Cuando el vidrio se calienta, esta agua se evapora y pueden comportarse como aislantes. En otras palabras, este procedimiento de calentamiento aumenta la cantidad de carga que el vidrio puede retener en su superficie después de haber sido frotado. El vidrio es un material higroscópico que absorbe la humedad del aire y, por lo tanto, aumenta su conductividad.[12] La conductividad del vidrio depende de su composición y del estado de su superficie. El vidrio caliente suele ser más aislante que el vidrio a temperatura ambiente.

Otro factor que puede aumentar las propiedades aislantes del vidrio es el aumento de su longitud, como se indica en la subsección 3.3.4. Supongamos que un tubo de vidrio se sujeta por un extremo y se frota por el otro. Habrá una cantidad razonable de vidrio seco entre estas dos regiones, lo que se traducirá en un buen grado de aislamiento. Además, los tubos más largos tienen una resistencia eléctrica mayor que los tubos más cortos. Por lo tanto, los tubos más largos conservarán durante más tiempo las cargas adquiridas por fricción. Gray, en particular, solía trabajar con un tubo de vidrio de un metro de largo.

4.3.2 La densidad de las cargas superficiales adquiridas por fricción

Consideremos un vidrio moderno que actúa como aislante debido a su composición química, su proceso de fabricación o porque fue previamente calentado. Incluso en este caso, existe una diferencia importante entre este vidrio y los vidrios antiguos. Stephen Gray y otros científicos precursores podían producir efectos considerables con sus tubos electrizados por fricción. Estos efectos eran fácilmente perceptibles a gran distancia. Podían, por ejemplo, atraer cuerpos ligeros situados a unos 10 o 20 cm de los tubos. También lograron transmitir la virtud eléctrica o el poder de atracción a cordones conductores muy largos que estaban aislados del suelo. Algunas de estos cordones medían más de 100 m de largo. El tubo de vidrio electrizado tocaba un extremo del cordón o se mantenía cerca de él. El otro extremo del largo cordón (o un cuerpo conductor fijado a ese otro extremo del cordón) podía entonces atraer cuerpos ligeros colocados cerca, como hojas de latón. Gray pudo entonces crear una fuerte polarización del cordón gracias a la gran cantidad de carga acumulada en la superficie de su tubo de vidrio frotado. Su tubo adquirió una gran cantidad de cargas eléctricas durante

[12] [WB09].

el proceso de fricción. Además, Gray podía producir fácilmente chispas o descargas eléctricas acercando su tubo de vidrio electrizado a otros cuerpos conductores.

Es difícil reproducir algunos de estos efectos con la misma intensidad (o a estas distancias) utilizando materiales modernos frotados manualmente. Para realizar estos experimentos, se debe electrizar un aislante por fricción. Este aislante puede ser, por ejemplo, un trozo de vidrio previamente calentado, una pajita de plástico, una regla de acrílico o un tubo de PVC. Incluso cuando reproducimos algunos de los fenómenos descritos por Gray, el orden de magnitud de los efectos observados suele ser inferior al de los fenómenos mencionados por Gray. Mida, por ejemplo, la distancia crítica a la que una pajita o un tubo de PVC frotado comienza a atraer pequeños trozos de papel. Esta distancia suele ser inferior a la distancia crítica a la que Gray logró atraer cuerpos ligeros con su tubo frotado. También podemos polarizar los extremos de un alambre metálico aislado y conductor que se encuentra cerca de una regla acrílica o una pajita de plástico frotada. Sin embargo, la intensidad de esta polarización del alambre metálico suele ser inferior a la de los cordones obtenidos por Gray que se encontraban cerca de su tubo de vidrio frotado. Coloque trozos de papel cerca de un extremo de un alambre metálico y acerque el tubo de PVC frotado a su otro extremo. Mida la longitud máxima de este alambre con la que atrae los trozos de papel. Por lo general, es inferior a la longitud de los cordones de Gray que atraían cuerpos ligeros cuando su tubo de vidrio frotado estaba cerca del otro extremo del cordón. Hoy en día es difícil producir chispas visibles o descargas eléctricas después de frotar un aislante en la mano y acercarlo a otro cuerpo conductor. Incluso cuando producimos estas chispas, solo se producen a distancias muy pequeñas entre la pajita de plástico electrizada y el conductor cercano. Gray, por el contrario, podía producir grandes chispas visibles con su tubo electrizado a unos 10 o 20 cm de un cuerpo conductor cercano.

La explicación de este comportamiento diferente, o la causa de estos órdenes de magnitud diferentes, reside en las densidades de las cargas superficiales adquiridas por fricción. El tubo de Gray no solo era un excelente aislante, sino que también podía adquirir una gran densidad de carga superficial por fricción. La densidad de las cargas que obtenía es generalmente mucho mayor que la densidad de las cargas superficiales que se obtienen hoy en día en nuestros aislantes, incluso cuando utilizamos buenos aislantes como una pajita de plástico, una regla de acrílico o un tubo de PVC. Dado que solo obtenemos pequeñas cantidades de carga superficial por fricción, es difícil reproducir algunos de los experimentos realizados por Gray que producen efectos del mismo orden de magnitud o intensidad.

4.3.3 El signo de las cargas adquiridas por el vidrio frotado

La tercera diferencia entre los vidrios antiguos y modernos se refiere al tipo de cargas eléctricas que adquiere el material cuando se frota contra la piel humana.[13]

Du Fay descubrió los dos tipos de electricidad. También propuso la regla según la cual los cuerpos electrizados con cargas del mismo tipo se repelen, mientras que los cuerpos electrizados con cargas de signo opuesto se atraen. Estos descubrimientos se publicaron en 1733.[14] Observó que el vidrio, el cristal de roca, las piedras preciosas, el

[13] Secciones 5.2 a 5.4 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[14] [DF33b], [DF34a] y [BC07].

pelo de los animales y la lana adquirían electricidad del primer tipo cuando se frotaban contra su piel o contra la seda. El ámbar, el copal, la goma laca, la tela de seda, el hilo y el papel, por el contrario, adquirían electricidad del segundo tipo cuando se frotaban contra su piel o contra otra tela de seda. Por lo tanto, denominó «electricidad vítrea» al primer tipo de electricidad y «electricidad resinosa» al segundo.

Veinte años después de la publicación de estos resultados, se descubrieron nuevos efectos. En particular, se observó que el vidrio rugoso o sin pulir podía cargarse de electricidad vítrea al frotarlo con franela, o de electricidad resinosa al frotarlo con seda aceitada. Este efecto también se producía con otros materiales. En otras palabras, un mismo material podía adquirir electricidad del primer o del segundo tipo, según el material con el que se frotara. Este descubrimiento condujo a la creación de lo que se conoce como la serie triboeléctrica, cuyas primeras publicaciones se remontan a 1757 y 1759.

En una serie triboeléctrica, el símbolo «$+$» va seguido de numerosos cuerpos, terminando con el símbolo «$-$». Cuando el cuerpo I se frota contra el cuerpo II, el que se carga positivamente será el cuerpo más cercano al símbolo «$+$», mientras que el otro cuerpo se cargará negativamente.

La terminología de Du Fay perdió su significado y fue sustituida por otros términos. Desde entonces, se acordó sustituir los términos «electricidad vítrea» y «electricidad resinosa» por «electricidad positiva» y «electricidad negativa», respectivamente. Otras expresiones similares que se utilizan hoy en día son «cargas eléctricas positivas» y «cargas eléctricas negativas», o «cuerpos con carga positiva» y «cuerpos con carga negativa».

Ahora podemos explicar la tercera diferencia entre los vidrios antiguos y los modernos. Está relacionada con el tipo de electrización que adquiere un trozo de vidrio cuando se frota contra la piel humana. Los vidrios modernos son muy similares a la piel en la serie triboeléctrica.[15] En particular, algunos tipos de vidrio estarán más cerca del símbolo «$+$» en una serie triboeléctrica que la piel humana. Llamemos a estos vidrios A. Otros tipos de vidrio estarán más cerca del símbolo «$-$» en una serie triboeléctrica que la piel humana. Llamemos a estos vidrios B, tabla 4.1.

Tabla 4.1: Serie triboeléctrica para vidrios modernos.

$+$
vidrio de tipo A
piel humana
vidrio de tipo B
$-$

Cuando el vidrio A se frota contra la piel, se carga positivamente. Por el contrario, cuando el vidrio B se frota contra la piel, se carga negativamente. Para saber si un trozo de vidrio específico es de tipo A o B, frótelo contra la piel. Compruebe la carga adquirida. Detecte, por ejemplo, si ese trozo de vidrio será atraído o repelido por otro

[15] Sección 5.4 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

cuerpo previamente cargado positivamente. Experimentos de este tipo nos permitirán clasificar ese trozo de vidrio específico como de tipo A o B.

En conclusión, los vidrios modernos pueden adquirir una electrización positiva o negativa cuando se frotan contra la piel humana. Por el contrario, los vidrios antiguos utilizados por Gray y otros investigadores de la época solo adquirían generalmente una electrización positiva cuando se frotaban contra la piel.

4.3.4 El vidrio en los manuales modernos y la importancia de corregir lo que dicen

La mayoría de los manuales modernos comienzan el estudio de la electricidad con el efecto del ámbar. El experimento se describe generalmente con un tubo de vidrio que sustituye al ámbar. Estos manuales también utilizan tubos de vidrio electrizados para presentar los dos tipos de electricidad, positiva y negativa. En ambos casos, los autores suponen explícita o implícitamente que el vidrio es un aislante para los experimentos electrostáticos.

Las figuras o imágenes de estos manuales modernos suelen mostrar el tubo frotado sostenido con la mano desnuda. Sustituyen el ámbar por un tubo de vidrio electrizado. Analizan la atracción de los cuerpos ligeros sobre una mesa, la atracción y repulsión que ejerce este tubo de vidrio electrizado sobre un péndulo eléctrico cercano, su efecto sobre un electroscopio cercano, etc. Creemos que, en la mayoría de los casos, los autores modernos se limitan a copiar de otros manuales los resultados «hipotéticos» de estos experimentos. En otras palabras, es probable que no hayan realizado ellos mismos estos experimentos. Nuestra hipótesis se basa en algunos detalles. En primer lugar, no es fácil encontrar una varilla de vidrio en casa o en una tienda minorista normal. En cualquier caso, incluso si probamos estos experimentos con un vaso o un tubo de ensayo, los efectos descritos no se producirán normalmente o solo se producirán con una amplitud muy pequeña, difícilmente perceptible a simple vista. Después de todo, la mayoría de los vidrios modernos se comportan como conductores. Por lo tanto, cuando se sostienen en las manos, no conservan la carga adquirida durante el frotamiento debido al efecto de conexión a tierra.

Otro experimento descrito en muchos manuales se refiere a los dos tipos de carga, positiva y negativa. A veces se menciona que un tubo de vidrio se vuelve positivo cuando se frota con seda, mientras que una varilla de goma se vuelve negativa debido al roce con un tejido acrílico. La fuerza de repulsión entre dos tubos de vidrio con carga positiva se ilustra colgando uno de ellos de un hilo, mientras que el otro se sostiene con la mano desnuda, figura 4.8 (a). A veces, este experimento «hipotético» también se ilustra con dos tubos colgados de hilos, figura 4.8 (b).

Al sustituir uno de los tubos de vidrio positivos suspendidos por una varilla de goma negativa suspendida, los manuales ilustran las fuerzas de atracción entre cuerpos con cargas opuestas.

Una vez más, los manuales escolares suponen explícita o implícitamente que el vidrio se comporta como un aislante. En este caso, suponen que el tubo de vidrio permanece electrizado cuando se sostiene con la mano desnuda. También hacen la misma suposición al suponer que permanece electrizado cuando se cuelga de un hilo.

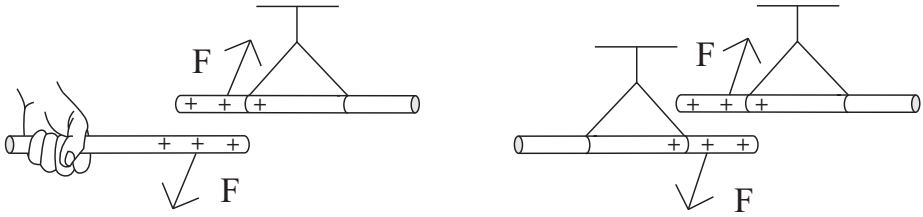


Figura 4.8: (a) Fuerzas de repulsión entre un tubo de vidrio sostenido con la mano desnuda mientras que el otro está suspendido de un hilo. (b) Fuerzas de repulsión entre dos tubos de vidrio suspendidos de hilos.

Después de todo, no especifican el material de ese hilo y no discuten si es conductor o aislante.

Si un alumno intenta reproducir este experimento con un tubo o una taza de vidrio, probablemente no observará ninguna repulsión. La razón, como se indicó anteriormente, es que el vidrio moderno suele comportarse como un conductor. Por lo tanto, un vidrio frotado no permanecerá electrizado cuando se sujeta con la mano desnuda. Tampoco permanecerá electrizado cuando se cuelga de la mayoría de los tipos de hilos o de alambres (algodón, lino, cobre, etc.), ya que estos hilos se comportan como conductores. El alumno puede sentirse frustrado. También puede llegar a la conclusión de que el problema radica en él, es decir, que no tiene aptitudes ni habilidades para la física. Incluso puede perder todo el interés que antes tenía por esta materia.

Evidentemente, algunos manuales presentan experimentos reales realizados con tubos de vidrio modernos que producen los efectos descritos en las figuras. En estos casos, trabajaron con vidrios aislantes electrizados, incluso cuando los sostenían en sus manos. Pero incluso si ese fuera realmente el caso, deberían llamar la atención sobre el hecho de que los experimentos descritos no funcionarían con la mayoría de los vidrios que se encuentran en los hogares debido a su comportamiento conductor.

En conclusión, antes de realizar experimentos con vidrios, es esencial comprobar previamente si se comportan como conductores o aislantes.

4.4 El mecanismo *ACR*

El volumen 1 de esta obra trataba sobre el mecanismo denominado «ACR», descubierto por Du Fay en 1733.[16] Este fenómeno se produce generalmente cuando un conductor ligero, aislado eléctricamente del suelo, es atraído por un cuerpo electrizado. Toca este cuerpo y luego es repelido por él. A veces, el cuerpo ligero no necesita tocar el cuerpo electrizado, ya que la repulsión puede producirse después de que se hayan acercado entre sí. Heilbron designó con las letras *ACR* esta sencilla regla de atracción, comunicación de electricidad y repulsión (es decir, Atraer, Comunicar,

[16] Secciones 4.2 y 4.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

Repeler).[17] Estas letras A, C y R se utilizan a veces como derivadas de las palabras Atracción, Contacto y Repulsión.

Los experimentos 4.1, 4.2 y 4.3 muestran situaciones sencillas que ilustran este mecanismo.

Experimento 4.1 — *Hacer flotar unas hebras de algodón*

Consideremos primero un objeto como un plumón o unas hebras de algodón. Es importante que el objeto elegido tarde mucho tiempo en caer al suelo, por ejemplo, unos 10 segundos para recorrer una distancia de 2 metros. Aún mejor si cae más lentamente. Por el contrario, si cae mucho más rápido, no será posible observar los efectos aquí descritos.

Frote una pajita de plástico o una regla acrílica con el cabello. Sujete la pajita o la regla acrílica frotada en posición horizontal. Suelte el plumón o las hebras de algodón un poco por encima de la pajita. El objeto es atraído por la pajita y se adhiere a ella, figuras 4.9 (a) y (b).

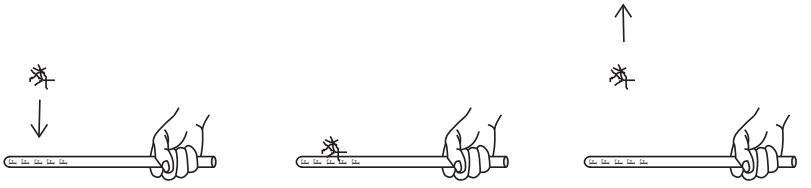


Figura 4.9: (a) Unas hebras de algodón son inicialmente atraídas por una pajita de plástico frotada. (b) El algodón toca la parte frotada de la pajita. (c) Tras el contacto, el algodón es repelido por la pajita. ¡Entonces puede permanecer suspendido sobre la pajita a pesar de la atracción gravitatoria de la Tierra!

Si observamos atentamente el objeto, podemos ver cómo se estiran sus hebras, como si quisieran alejarse de la pajita. A veces, el objeto rebota hacia arriba tras el contacto, alejándose de la pajita frotada. Si esto no ocurre inmediatamente, podemos hacer que el objeto se desprenda golpeando suavemente la pajita o soplando suavemente sobre el objeto. Una vez que el objeto se desprendió de la pajita y comienza a caer, coloque la pajita frotada debajo del objeto en caída. El objeto es entonces repelido por la pajita y rebota hacia arriba. A veces, esto no ocurre inmediatamente, ya que el objeto debe tocar la pajita frotada dos o tres veces y liberarse después de cada contacto antes de que la pajita pueda repelerlo claramente. Cuanto más electrizada esté la pajita, más rápido será repelido el objeto después de tocarla, figura 4.9 (c).

Colocando lentamente la pajita frotada debajo del objeto, muévalo a cualquier lugar de la habitación. Si el objeto se acerca demasiado a nuestro cuerpo o a cualquier otro objeto de la habitación, es atraído hacia nuestro cuerpo o hacia ese objeto y se pega a él. Para evitarlo, utilice la pajita frotada para alejar el objeto de esos cuerpos.

[17] [Hei99, pp. 5 y 255–258].

En este caso, el objeto puede permanecer fácilmente en suspensión durante un tiempo a una distancia de 10 a 20 cm por encima de la pajita, dependiendo del grado de electrización de esta. Para mantener el objeto en suspensión, la pajita frotada debe mantenerse en constante movimiento por debajo de él, siguiendo su movimiento, con el fin de guiar su desplazamiento.

Experimento 4.2 — *Hacer flotar una semilla de diente de león*

La figura 4.10 ilustra un experimento similar realizado con una semilla de diente de león. La semilla cae de forma natural muy lentamente, lo que la hace ideal para este experimento. Es fácil mantenerla en suspensión sobre una pajita de plástico frotada con pelo.

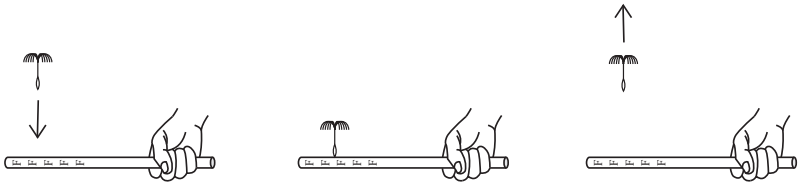


Figura 4.10: El experimento 4.9 se puede realizar fácilmente con una semilla de diente de león flotando sobre una pajita de plástico frotada con el cabello.

Con una semilla de diente de león, el procedimiento suele ser más fácil que con unas hebras de algodón. Cuando la semilla se libera en el aire sobre la pajita frotada, es atraída por la pajita, la toca y es repelida inmediatamente.

Los experimentos 4.1 y 4.2 son muy sencillos, pero extremadamente curiosos. Nadie que los realice olvida lo que ve. Otto von Guericke (1602–1686), Stephen Gray y Du Fay realizaron experimentos como estos. Tuvieron una gran importancia histórica. Blondel y Wolff realizaron un vídeo muy interesante que muestra una reproducción moderna de la levitación de una fina hoja de oro,[18] «El baile de las hojas de oro».

Experimento 4.3 — *Repulsión entre un cuerpo electrizado y el disco de papel de un péndulo eléctrico*

Utilice un péndulo eléctrico clásico compuesto por un pequeño disco de papel o papel de aluminio con un diámetro de aproximadamente 1 o 2 cm, sujeto al extremo libre inferior de un hilo de seda, nailon o poliéster, figura 2.10. Electrice una pajita de plástico o un peine acrílico frotándolo enérgicamente con el cabello, una servilleta de papel o un paño de algodón. Acérquelo al péndulo. El disco es atraído por la pajita, la toca y luego es repelido por ella, figura 4.11.

A veces, el disco de papel no es repelido inmediatamente por el plástico frotado tras el contacto, y permanece en contacto con él durante unos segundos. En este caso, observe la repulsión golpeando ligeramente la pajita para liberar el disco. También

[18] [BW12c] y [BW12b].

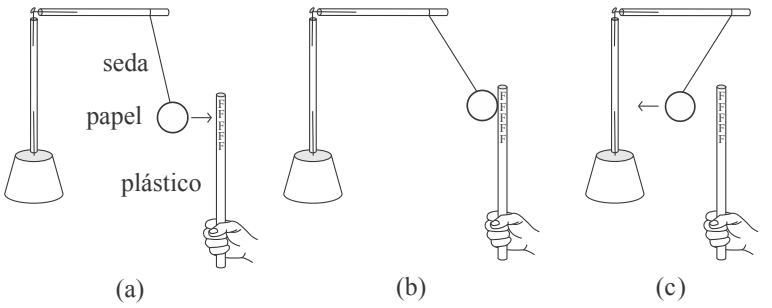


Figura 4.11: (a) El disco de papel es atraído primero por el plástico frotado, (b) lo toca y luego (c) es repelido por la pajita.

puede mover la pajita hacia arriba y hacia abajo para liberar el papel, o soplar ligeramente sobre él. Una vez liberado, el disco de papel normalmente es repelido por el plástico frotado. En algunos casos, se necesitan 2 o 3 atracciones del disco por la pajita frotada, dejando siempre su contacto en cada atracción, antes de poder observar su repulsión.

Para volver a empezar todo este proceso, el disco debe descargarse. Para ello, toque el disco de papel con el dedo. No es necesario sujetar el disco de papel, basta con tocarlo. Se descargará al entrar en contacto con la tierra. Tras esta descarga, acerque de nuevo la pajita electrizada al péndulo. El disco de papel volverá a ser atraído por la pajita. Tocará la pajita y será repelido por ella.

4.4.1 Explicación del mecanismo *ACR*

Hay una explicación sencilla para este comportamiento. Ilustramos la explicación del mecanismo *ACR* con el experimento 4.3. Supongamos que la pajita o la regla de plástico están cargadas negativamente y que el disco de papel es inicialmente neutro cuando se aleja del plástico. Un disco de papel o papel de aluminio se comporta como un buen conductor. Está sostenido por un hilo aislante de seda, nailon o poliéster. Cuando la pajita electrizada se acerca al disco, este se polariza. La parte del disco más cercana a la pajita frotada adquiere una carga de signo opuesto al de la pajita, mientras que la parte opuesta del conductor adquiere una carga del mismo signo que la de la pajita, figura 4.12 (a).

La distancia entre la parte positiva del disco y la pajita negativa es menor que la distancia entre la parte negativa del disco y la pajita. La fuerza eléctrica es atractiva entre cuerpos con cargas de signos opuestos y repulsiva entre cuerpos con cargas del mismo signo. Además, la intensidad de estas fuerzas aumenta cuando disminuye la distancia entre los cuerpos cargados. Por lo tanto, la atracción ejercida por la pajita negativa sobre la parte positivamente electrizada del disco es mayor que la repulsión ejercida sobre la parte opuesta del conductor, que está negativamente electrizada. Estas fuerzas opuestas de diferentes magnitudes producen una fuerza de atracción neta que actúa sobre el disco. Cuando el disco toca la pajita, se produce un intercambio de partículas electrizadas entre ambos, neutralizando la parte del disco cercana a la

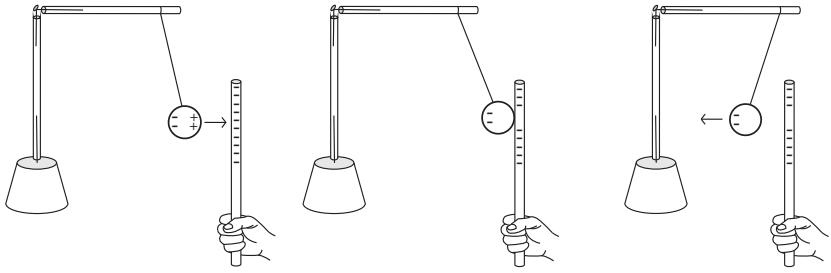


Figura 4.12: (a) El disco conductor se polariza bajo el efecto de una pajita electrizada situada cerca. Existe una atracción neta entre ambos. (b) Al entrar en contacto, se produce un intercambio de partículas electrizadas. Como resultado de este intercambio, el disco se carga con una carga neta del mismo signo que la de la pajita. (c) El disco electrizado es entonces repelido por la pajita.

pajita, así como los puntos de la pajita que tocaron el disco, figura 4.12 (b). En esta imagen exageramos la región neutralizada de la pajita. El plástico se comporta como un aislante. Por lo tanto, las partículas negativas de las otras regiones electrizadas de la pajita no se mueven. Tras el contacto, tanto el disco como la pajita se electrizan negativamente. Entonces se produce una repulsión neta entre ellos, figura 4.12 (c).

4.4.2 Situaciones en las que no se aplica el mecanismo *ACR*

Experimento 4.4 — *Atracción entre un cuerpo electrizado y un disco de papel sujeto a un hilo de algodón*

Repita el experimento 4.3 utilizando en este caso un disco conductor conectado a tierra. Para ello, sustituya el hilo aislante por un hilo conductor unido a un soporte conductor. El disco de papel se puede fijar al extremo inferior de un hilo de algodón, que a su vez está fijado a un palito de madera o a un alambre metálico. Sujete un extremo del palito con la mano, mientras que el otro extremo sostiene el hilo de algodón. Este instrumento es similar al hilo pendular de Gray descrito en la sección 2.5.

Acérquese lentamente un trozo de plástico frotado cerca de este péndulo conductor. El péndulo se inclina hacia la pajita, la toca y permanece pegado a la pajita electrizada, figura 4.13.

Repita este proceso varias veces. El mecanismo *ACR* no se produce. Es decir, incluso cuando el disco toca varias veces la pajita electrizada, no se produce el mecanismo de atracción, contacto y repulsión.

Experimento 4.5 — *Atracción entre un cuerpo electrizado y un disco de plástico*

Repita el experimento 4.3 utilizando en este caso un disco aislante de un péndulo eléctrico de plástico de la figura 2.12.

Acerque lentamente un trozo de plástico frotado al disco de plástico de este péndulo. El péndulo se inclina hacia la pajita, figura 4.14 (a).

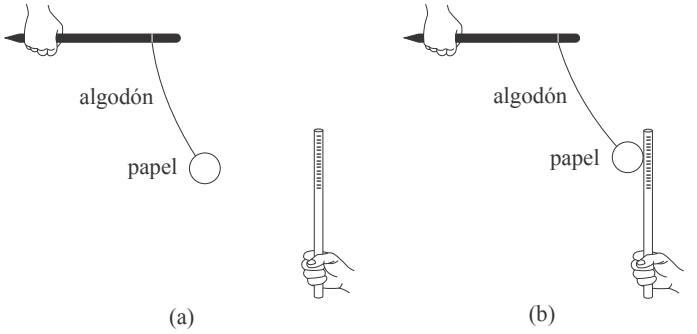


Figura 4.13: (a) El disco conductor conectado a tierra es atraído por una pajita electrizada. (b) El disco toca la pajita y permanece adherido a ella tras el contacto.

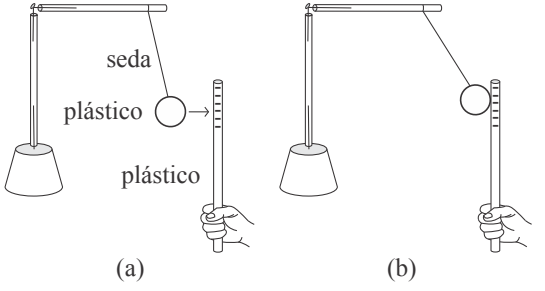


Figura 4.14: (a) El disco aislante de un péndulo de plástico es atraído por una pajita frotada, (b) lo toca y se queda pegado a él.

Si dejamos el disco de plástico y la pajita frotada en contacto, normalmente se quedan pegados el uno al otro, figura 4.14 (b).

Estas actividades indican que, para que se produzca el mecanismo *ACR*, el conductor (disco de papel) debe estar aislado eléctricamente del suelo (por el aire y por un alambre aislante), como era el caso en el experimento 4.3. Cuando el conductor se conecta a tierra, como en el experimento 4.4, el mecanismo *ACR* no se produce, incluso permitiendo el contacto entre el conductor y la pajita electrizada.

Este comportamiento también puede explicarse. Observemos en primer lugar que los únicos aislantes en este último experimento eran el aire y la pajita de plástico electrizada. Todos los demás cuerpos se comportaban como conductores, es decir, el disco de papel, el hilo de algodón, el palito de madera y la mano conectada a tierra. Supongamos que la pajita estaba electrizada negativamente. Cuando se acerca al disco, este tiende a polarizarse. Sin embargo, al tratarse de un conductor conectado a tierra, sus partículas con carga negativa se neutralizan al estar conectado a tierra. Por lo tanto, el disco se carga positivamente cerca de la pajita, figura 4.15 (a).

Cuando el disco de papel toca la paja, se produce un intercambio de partículas electrizadas entre ambos, lo que tiende a neutralizar el disco y los puntos de la paja que

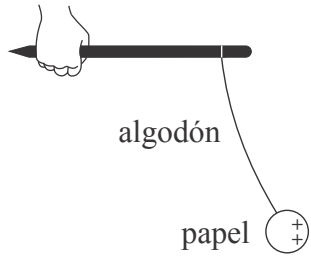


Figura 4.15: (a) El disco conectado a tierra se cargó positivamente cerca de la pajita negativa. (b) El conductor conectado a tierra permanece cargado positivamente cerca de la pajita, ya que es atraído por las regiones negativas de la pajita aislante.

lo tocaron. Al ser la paja un aislante, sus otras partículas electrizadas no se mueven y permanecen en su sitio. Estas partículas negativas que permanecieron en la paja electrizada siguen ejerciendo una fuerza de atracción sobre las partículas electrizadas libres del disco conductor. Estas fuerzas de atracción tienden a polarizar de nuevo el disco, dejándolo positivo en la zona de contacto y negativo en su lado opuesto. Debido a la conexión a tierra, el lado opuesto del disco se vuelve neutro. Solo queda la zona positiva cerca de la paja negativa, figura 4.15 (b). En esta figura, exageramos la zona neutra de la paja que está en contacto con el disco.

Cabe señalar que el mecanismo *ACR* tampoco se produce en el caso de un pequeño aislante que es atraído por un cuerpo electrizado, como se observa en el experimento 4.5. El disco de plástico puede ser ligeramente atraído por la pajita electrizada e incluso puede tocarla. Sin embargo, el disco permanecerá pegado a la pajita electrizada después del contacto, incluso después de repetir este procedimiento varias veces.[19]

4.5 La importancia del descubrimiento de los conductores y aislantes por Stephen Gray

La referencia más antigua a lo que se conoce como efecto del ámbar aparece en la obra *Timeo* de Platón (hacia 428–348 a. C.).[20] Durante dos mil años, se hicieron pocos descubrimientos en el campo de la electricidad. La gente sabía básicamente que el ámbar y algunas otras sustancias tenían el poder de atraer cuerpos ligeros después de ser frotadas. En 1729, Stephen Gray se dio cuenta de que existían dos grupos de cuerpos, hoy llamados conductores y aislantes. También descubrió algunas de las principales propiedades de los conductores y los aislantes. Publicó sus resultados en 1731 en una de las obras más importantes de la historia de la electricidad.[21] El volumen 1 de esta obra trata en detalle el artículo de Gray.[22]

[19] Sección 7.6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[20] [Pla52, secciones 79 a 80, pp. 470–471], [Pla09, secciones 79 a 80, pp. 163–165] y sección 2.2 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[21] [Gra32d], [Bos11, capítulo 6] y [BAC12, capítulo 7, pp. 127–169].

[22] Véase el anexo B de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17]. Véase también [RP13a], [RP13b], [RP13c], [Rai15], [RP15b], [RP15a] y [RP16].

El descubrimiento fundamental de Gray permitió controlar los fenómenos eléctricos. Identificó el mecanismo de puesta a tierra o conexión a masa que permite descargar un conductor electrizado. Consiguió electrizar metales, agua y el cuerpo humano. Para ello, aisló estos materiales del suelo. Pudo transmitir la electricidad (o el poder de atraer cuerpos ligeros) a lugares alejados del punto donde se producía la fricción. Para ello, utilizó cordones y hilos conductores aislados del suelo. Cuando se mantenía un tubo de vidrio electrizado en contacto con el extremo de este cordón conductor o cerca de él, el extremo libre del cordón (o un conductor unido a él) también atraía la luz situada cerca. También fue el primero en mostrar cómo almacenar la electricidad, es decir, cómo aumentar el tiempo durante el cual un cuerpo permanece electrizado. Creó los primeros electretos (materiales dieléctricos con polarización dipolar electrostática permanente, o con electrización permanente), como se indica en la sección 13.4. Los materiales con polarización dipolar permanente también se denominan imanes eléctricos.[23] También fue uno de los primeros científicos en realizar experimentos relacionados con la conservación de las cargas eléctricas.[24]

Du Fay, siguiendo los pasos de Gray, reconoció la repulsión como un fenómeno eléctrico y descubrió el mecanismo *ACR*.[25] Cuando observó una anomalía en este mecanismo (es decir, una situación en la que esta regla no funcionaba), se convenció de la existencia de dos tipos de electricidad, a los que denominó electricidad vítrea y electricidad resinosa.[26] Hasta entonces, solo se conocía un tipo de electricidad. Hoy en día, estos dos tipos de electricidad se denominan, respectivamente, electricidad positiva y electricidad negativa. Otras expresiones análogas son «cargas eléctricas positivas y negativas» o «cuerpos electrizados positiva y negativamente».

El desarrollo de la electricidad fue vertiginoso tras el descubrimiento de Gray. Lo que hizo posibles todos estos nuevos descubrimientos fue el conocimiento de estos dos tipos de cuerpos en la naturaleza, a saber, los conductores y los aislantes, así como sus principales propiedades. Hoy en día, este conocimiento parece trivial. Sin embargo, fue el desconocimiento de la existencia de estos dos materiales fundamentalmente diferentes lo que impidió durante dos mil años el progreso en el estudio de la electricidad. En 2012, publicamos una traducción al portugués comentada y completa de los artículos de Gray sobre electricidad, así como una reproducción de sus principales experimentos utilizando materiales de bajo coste.[27]

[23] [Net94], [Sil10b], [Sil10a], [Bos11, capítulo 8, pp. 226–248] y [BAC12, capítulo 19, pp. 373–392].
[24] Sección 6.10 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[25] Sección 4.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[26] [DF33b], [DF34a] y [BC07].
[27] [BAC12].

Capítulo 5

La electrización de cintas adhesivas

Este capítulo describe experiencias relacionadas con un tema curioso, a saber, la electrización de cintas adhesivas.[1]

5.1 El comportamiento aislante o conductor de la cinta

Experimento 5.1 — *Aislamiento en toda su longitud*

Comience con un rollo de cinta adhesiva común de 1 o 2 cm de ancho. Puede ser cinta adhesiva de oficina PSA, cinta mágica, cinta invisible, cinta adhesiva, cinta de celofán, etc. Analice sus propiedades conductoras o aislantes. La cara adhesiva o engomada se representará con la letra inicial G, mientras que la cara lisa o deslizante se representará con la letra S. Cargue primero un electroscopio, figura 5.1 (a).

Tome un trozo de cinta adhesiva de unos 10 a 20 cm de largo. Sujete los extremos con las manos. Toque el borde del electroscopio cargado con la cara lisa. La tira del electroscopio permanece levantada, figura 5.1 (b). El mismo fenómeno se produce cuando la cara adhesiva de la cinta toca el borde de un electroscopio cargado, figura 5.1 (c).

Este experimento demuestra que las dos caras de una cinta adhesiva se comportan como aislantes en toda su longitud. Aunque la cinta está conectada a tierra por la mano, el electroscopio no se descarga.

Experimento 5.2 — *La cinta conductora por su cara*

Repita el experimento con un electroscopio cargado, figura 5.2 (a).

[1] [Jef59], [Bea96], [CS02, capítulo 14], [Mor04b], [Mor04a] y [Vas05].

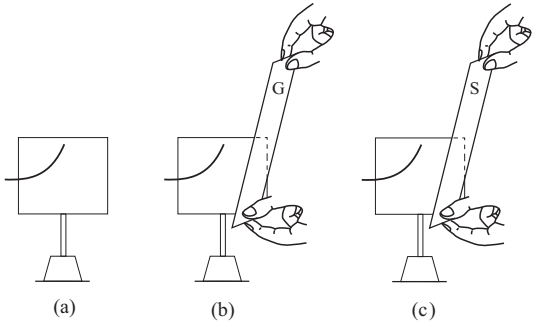


Figura 5.1: (a) Electroscopio cargado. (b) La cara lisa de una cinta adhesiva toca el borde del electroscopio. La cinta permanece levantada. (c) También permanece levantada cuando la cara adhesiva de la cinta toca el cartón.

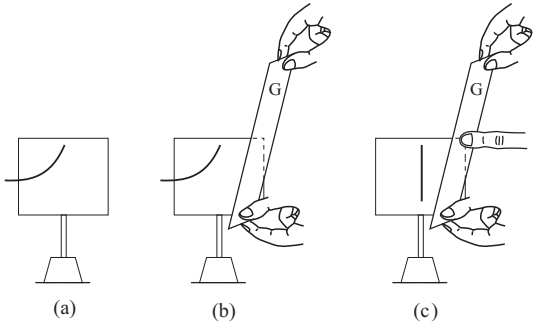


Figura 5.2: (a) Electroscopio cargado. (b) La cara lisa de la cinta toca el borde del cartón y la cinta permanece levantada. (c) Un dedo toca la otra cara de la cinta y la cinta vuelve a caer.

Sujete una cinta adhesiva por ambos extremos. Toque el centro de la cara lisa de la cinta adhesiva en el borde del electroscopio. Su tira permanece levantada, figura 5.2 (b). A continuación, otra persona toca con el dedo el centro de la otra cara de la cinta. La cinta debe permanecer entre el borde del cartón y el dedo. El dedo no debe tocar el cartón. En este caso, la cinta cae en unos segundos, figura 5.2 (c).

La cinta de un electroscopio cargado también cae cuando la cara adhesiva de la cinta toca el borde del cartón y un dedo toca la cara lisa de la cinta.

El electroscopio se descarga cuando una cara de la cinta adhesiva toca el borde del cartón y un dedo toca la otra cara de la cinta. Por lo tanto, la cara de una cinta adhesiva se comporta como un conductor para los experimentos electrostáticos, aunque la cinta se comporte como un aislante en toda su longitud.

Experimento 5.3 — *Varias cintas superpuestas*

Superponga varias capas de cinta adhesiva colocando cintas de la misma longitud. Pegue una cinta adhesiva inicial de 10 a 20 cm de largo sobre la superficie de un escritorio. Pegue encima tantas capas como desee, todas de la misma longitud. A continuación, repita el experimento 5.2 con esta cinta multicapa. Toque un lado de la cinta multicapa en el borde de un electroscopio cargado. A continuación, toque con un dedo el lado opuesto de esta cinta multicapa. Mida el intervalo de tiempo necesario para descargar el electroscopio. La tabla 5.1 muestra un resultado típico.

Tabla 5.1: Intervalos aproximados para descargar el electroscopio.

Número de capas superpuestas	intervalo de descarga
1	1–5 s
5	5 s
10	10 s
15	15–20 s
20	25–60 s

Según la definición 3.5, concluimos que 20 capas superpuestas de una cinta pueden considerarse un aislante en una dirección ortogonal a dichas capas. Esta situación se representa en la figura 5.3.

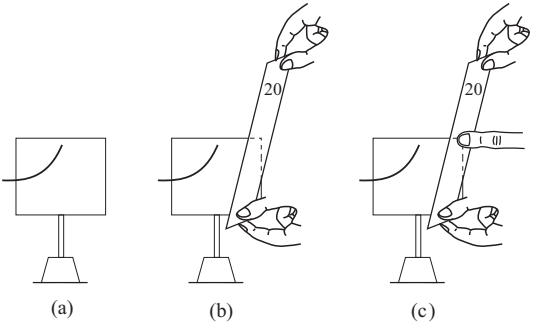


Figura 5.3: (a) Electroscopio cargado. (b) Una cara de una cinta con 20 capas toca el borde del cartón y la tira permanece levantada. (c) La tira permanece levantada cuando un dedo toca la cara exterior de esta cinta multicapa.

Este experimento ilustra una vez más el tema tratado en la subsección 3.3.4. De hecho, las propiedades conductoras o aislantes de un cuerpo dependen no solo de su naturaleza, sino también de su longitud o grosor. En el presente experimento, cuanto más gruesa es la cinta multicapa, más se comporta como un aislante.

Experimento 5.4 — *Otros tipos de cinta adhesiva*

Repita los experimentos 5.1 y 5.2 con otros tipos de cinta adhesiva.

Una cinta quirúrgica o médica, por ejemplo, se comporta como un conductor no solo en su superficie, sino también en toda su longitud. Mientras que una cinta adhesiva de oficina normal está fabricada con un material plástico aislante, una cinta quirúrgica suele estar fabricada con algodón, un material conductor.

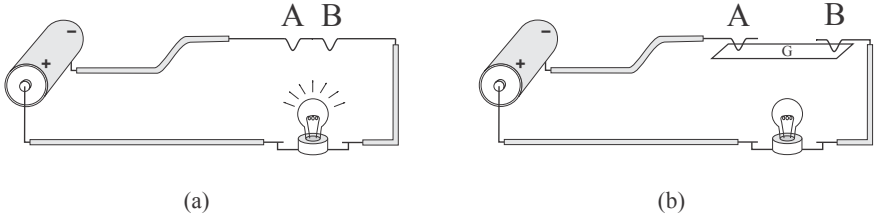
Una cinta eléctrica (también llamada cinta aislante), por el contrario, se comporta como la mayoría de las cintas adhesivas. Es decir, es aislante en toda su longitud y conductora en su superficie. Su color estándar es el negro. Está compuesta de vinilo o PVC.

Al aumentar el número de capas superpuestas de cinta aislante, también aumentamos su comportamiento aislante ortogonalmente a sus caras. Una cinta con 15 o 20 capas puede considerarse un buen aislante en toda su profundidad, como se ilustra en la figura 5.3.

Experimento 5.5 — *Comportamiento aislante en toda su longitud para bajas tensiones*

El comportamiento de la cinta aislante en el experimento 5.4 puede sorprender a mucha gente. Al fin y al cabo, esta cinta se suele denominar «cinta aislante». Sin embargo, a través de su superficie, se comporta como un conductor en los experimentos electrostáticos (el electroscopio se descarga a través de su superficie). Realizamos dos nuevos experimentos para comprender esta nomenclatura.

Repita el experimento 3.9. La bombilla se enciende cuando los extremos conductores A y B se conectan directamente entre sí, figura 5.4 (a). Lo mismo ocurre cuando A y B se conectan mediante un alambre metálico.



(a) (b)

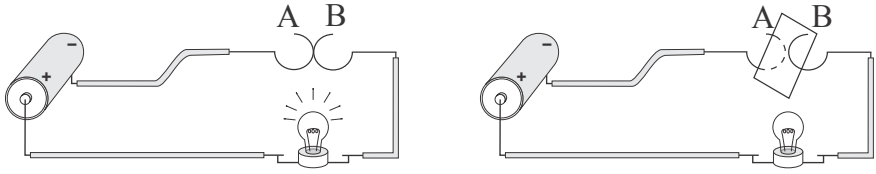
Figura 5.4: (a) La bombilla se enciende cuando los conductores A y B se tocan. (b) La bombilla no se enciende cuando A y B, separados por 2 o 5 cm, tocan dos puntos centrales en la cara adhesiva de la cinta.

Ahora coloque una cinta adhesiva de 2 a 5 cm de largo entre los puntos conductores A y B, de modo que estos puntos toquen el centro de la cara adhesiva de la cinta. La cinta adhesiva, la cinta quirúrgica y la cinta aislante actúan como aislantes en este experimento, tal y como se muestra en la figura 5.4 (b). Lo mismo ocurre cuando A y B tocan dos puntos de la cara lisa de la cinta adhesiva separados por 2 o 5 cm.

Todas estas cintas adhesivas se comportan como aislantes en toda su longitud para bajas tensiones.

Experimento 5.6 — *Comportamiento aislante por sus caras para bajas tensiones*

Compruebe el comportamiento de estas cintas en sus caras. Comience conectando directamente A y B para comprobar que la lámpara se enciende y que todas las conexiones eléctricas se realizaron correctamente, figura 5.5 (a).



(a) (b)

Figura 5.5: (a) La bombilla se enciende cuando los conductores A y B se tocan. (b) La bombilla no se enciende cuando A toca una cara de la cinta adhesiva y B toca la otra cara.

A continuación, coloque un trozo de cinta adhesiva en posición vertical, con el punto A tocando el centro de una cara de la cinta y el punto B tocando el centro de la otra cara de la cinta. La bombilla no se enciende con todos los tipos de cinta adhesiva (adhesiva, quirúrgica o eléctrica), figura 5.5 (b).

El experimento 5.4 muestra que la cinta eléctrica se comporta como un conductor a través de su cara en fenómenos electrostáticos en los que existe una diferencia de potencial de 1 000 V o más entre las dos caras de la cinta. El experimento 5.6, por el contrario, muestra que la cinta eléctrica se comporta como un aislante a través de sus caras para tensiones bajas de unos pocos voltios. Esta cinta también es un buen aislante cuando la tensión a través de su cara alcanza aproximadamente 300 V. Por eso se le dio el nombre de cinta «aislante» o «eléctrica».

Estos experimentos también ilustran el tema tratado en la subsección 3.3.2. De hecho, el comportamiento conductor o aislante de un cuerpo depende no solo de las propiedades intrínsecas de dicho cuerpo, sino también de la diferencia de potencial externa aplicada a él.

5.2 La electrización de la cinta

Para uniformizar los experimentos y sus resultados, la cinta que se va a probar siempre debe retirarse de otra cinta situada debajo, denominada «cinta base» y representada por la letra B. Pegue la cinta adhesiva base de 10 a 20 cm de largo sobre una superficie plana y lisa de una mesa. Esta cinta base debe alisarse con el dedo. Se debe pegar otra cinta de la misma longitud sobre la cinta base. Se denominará «cinta superior» y se representará con la letra U, figura 5.6.

Doble un extremo para facilitar la manipulación. La cinta superior también debe alisarse con el dedo.

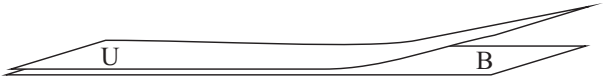


Figura 5.6: Cinta superior U por encima de la cinta base B.

Experimento 5.7 — *Cinta adhesiva que atrae objetos ligeros*

Se coloca un electroscopio descargado sobre la mesa, figura 5.7 (a).

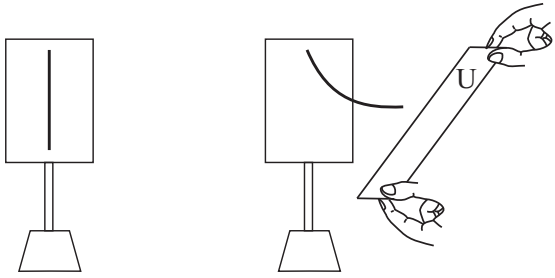


Figura 5.7: (a) Electroscopio descargado. (b) Cinta superior U atrayendo la tira del electroscopio.

Las cintas B y U deben prepararse, figura 5.6. Sujete el extremo doblado de la cinta superior y tire de ella *rápidamente* hacia arriba para separarla de la cinta base. La cinta base debe permanecer pegada a la mesa. Sujete la cinta U por sus extremos y acérquela a la parte inferior de la tira de papel de seda del electroscopio. La tira es atraída por la cinta, figura 5.7 (b).

Esta cinta superior también orienta un versorio metálico cuando se acerca a él. Sujete la cinta verticalmente por sus extremos y acérquela a una de las patas del versorio. El versorio girará, apuntando su pata más cercana hacia la cinta. Cuando se mueve la cinta alrededor del versorio, este gira siguiendo la posición de la cinta.

Este experimento demuestra que la cinta superior se electrizó al retirarla rápidamente de la cinta base. Estos fenómenos de atracción son análogos al efecto del ámbar, sección 1.1. Este experimento también ilustra que la cinta se comporta como un aislante en toda su longitud. Después de todo, aunque está conectada a tierra cuando se sostiene con las manos, no se descargó.

Experimento 5.8 — *Cinta adhesiva atraída por conductores inicialmente neutros*

Retire *rápidamente* otra cinta U de la cinta base. Enganche uno de sus extremos a un lápiz, un bolígrafo o al borde de una mesa. La cinta debe colgar verticalmente, figura 5.8 (a) y (b).

Acérquese con un dedo a la parte inferior de la cinta adhesiva suspendida, en una dirección ortogonal al plano de la cinta. La cinta es atraída por el dedo, figura 5.8 (c).

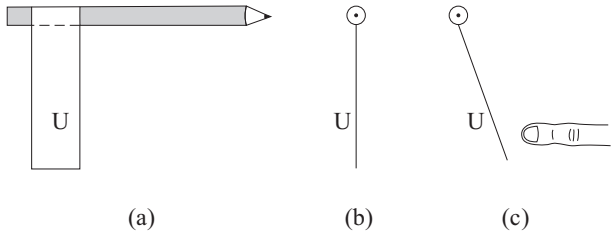


Figura 5.8: (a) Vista lateral de una cinta superior suspendida. (b) Vista frontal. (c) La cinta es atraída por un dedo cercano.

La cinta no debe tocar el dedo. Esta atracción se produce no solo cuando el dedo se acerca a la cara adhesiva G de la cinta, sino también cuando se acerca a la cara lisa S.

Este experimento también muestra que la cinta adhesiva se electrizó al retirarla rápidamente de la cinta base. Este fenómeno es opuesto al efecto del ámbar. Ilustra el principio de acción y reacción.[2] En el efecto del ámbar, un cuerpo electrizado atrae objetos ligeros que inicialmente eran neutros. La atracción es fuerte cuando estos objetos ligeros se comportan como conductores. En el fenómeno inverso que se observa aquí, un cuerpo inicialmente neutro (el dedo) atrae los objetos electrizados (como la cinta U suspendida) que se encuentran cerca. Cuando se produce la atracción, el dedo ya no es neutro. Ahora tiene una carga eléctrica de signo opuesto al de la cinta electrizada.

Pruebe los experimentos 5.7 y 5.8 con diferentes tipos o marcas de cintas adhesivas, utilizando siempre el mismo tipo de cinta para cada par BU. La marca que se electrifique más debe utilizarse en los siguientes experimentos.

Estos experimentos funcionan bien en tiempo seco.

Es probable que la cinta superior se haya electrizado en la cara adhesiva G cuando se retiró de la cinta base. Después de todo, antes de retirarla de la cinta base, se alisó con un dedo conductor.

Los experimentos de la sección 5.1 demostraron que una cinta adhesiva se comporta como un conductor a través de su cara. Por lo tanto, después de retirarla de la cinta base, puede producirse un intercambio de partículas electrizadas entre las caras adhesiva y lisa de la cinta superior cargada. Puede ocurrir que, unos segundos después de retirarse de la cinta base, las dos caras de la cinta superior también se electrifiquen. En cualquier caso, en este trabajo no comprobaremos si la cinta se electrizó solo en la cara adhesiva o en las dos caras.

Experimento 5.9 — *Descubrir el signo de carga en la cinta electrizada*

Electrice dos electroscopios con cargas opuestas. Esta electrización opuesta se puede conseguir por inducción, por ejemplo.[3] Estos electroscopios cargados deben permanecer sobre una mesa, separados entre sí, con las tiras levantadas. Anote cuál está cargado positivamente y cuál negativamente.

[2] Sección 3.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[3] Sección 7.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

Tire *rápidamente* de otra cinta U hacia arriba y fuera de la cinta base B. Sujétela horizontalmente por sus extremos y acérquela a la parte inferior de las tiras de los dos electroscopios, sin tocarlas. Atraerá una tira y repelerá la otra. Conociendo el signo de la carga de los electroscopios electrizados, determine el signo de las cargas en la cinta U. En la mayoría de los experimentos que realizamos, la mayoría de las marcas producieron cintas superiores *negativamente* electrizadas. Estas cintas repelieron la tira del electroscopio negativo y atraído la tira del electroscopio positivo.

Según la marca de la cinta adhesiva, la cinta superior puede electrizarse positivamente.

5.3 La neutralización de la cinta

Esta sección describe cómo neutralizar una cinta electrizada.

Experimento 5.10 — *Descargar la cinta con el paso del tiempo*

Supongamos que una cinta superior se electrizó tal y como se describe en la sección 5.2. Cuélguela verticalmente de un soporte adecuado, figura 5.8 (a) y (b).

La forma más sencilla de descargarla es dejarla suspendida en reposo durante unos minutos al aire libre. A continuación, cuando se acerca un dedo a la parte inferior de la cinta, esta ya no atrae al dedo. Del mismo modo, cuando se acerca esta cinta a la parte inferior de una tira perteneciente a un electroscopio descargado, la tira ya no es atraída por la cinta. Del mismo modo, un versorio metálico no es orientado por esta cinta.

Experimento 5.11 — *Descargar la cinta por su cara lisa*

Ahora presentamos otro procedimiento para descargar una cinta superior. Tire de una nueva cinta U hacia arriba y retírela de la cinta B. Cuélguela verticalmente del borde de una mesa o de un lápiz, como se muestra en la figura 5.8 (a) y (b). Sujete la parte inferior de la cinta y frote lentamente con un dedo de un lado a otro sobre la cara *lisa* de la cinta, figura 5.9.

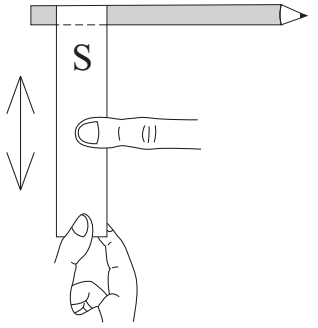


Figura 5.9: Frote la cara *lisa* de la cinta adhesiva.

A continuación, comprueba su electrización como en los experimentos 5.7 y 5.8. Normalmente, esta cinta ya no atrae la tira de un electroscopio descargado, no orienta un versorio y no es atraída por un dedo.

Experimento 5.12 — *Es difícil despegar la cinta adhesiva por su cara adhesiva*

Repita el experimento con una cinta electrizada suspendida. Repita el procedimiento del experimento 5.11, pero esta vez frote el dedo a lo largo de la cara *adhesiva* G de la cinta. A continuación, compruebe su electrización como en los experimentos 5.7 y 5.8. Observe que, esta vez, la cinta permanece electrizada.

Los experimentos 5.11 y 5.12 son un poco sorprendentes. Después de todo, la cinta U debería haberse electrizado inicialmente en la cara adhesiva cuando se retiró de la cinta base. Por lo tanto, cabría esperar que se descargara al frotar un dedo a lo largo del lado G. Sin embargo, en este caso no se produce la neutralización. Una de las razones por las que permaneció electrizada podría estar relacionada con el propio adhesivo, que impide que el dedo se deslice fácilmente a lo largo del lado G. Por lo tanto, no podemos tocar ni conectar a tierra todos los puntos a lo largo de ese lado de la cinta. Quizás solo se neutraliza en los pocos puntos en los que el dedo toca el adhesivo, permaneciendo electrizado en los demás puntos. Además, el dedo que se separa del adhesivo puede recargar la cinta.

El experimento 5.11, por el contrario, demostró que es posible descargarla deslizando un dedo por el lado liso de la cinta. Una de las razones por las que se produce esta neutralización en este caso está relacionada con el experimento 5.2, que demostró que la cinta se comporta como un conductor en su lado. Por lo tanto, al deslizar un dedo conductor a lo largo del lado liso, se neutralizan las partículas electrizadas situadas a ambos lados de la cinta. Además, el dedo puede deslizarse por toda la superficie del lado liso, tocando la mayoría de los puntos de la cinta. Esta conexión a tierra general no se produjo en la cara adhesiva, ya que el adhesivo impidió el movimiento de deslizamiento del dedo.

Experimento 5.13 — *Descargar la mitad de una cinta*

Prepare una nueva cinta electrizada U de unos 20 cm de largo. Cuélguela por un extremo y frote lentamente con el dedo su superficie lisa, como se muestra en la figura 5.9, pero solo en la mitad inferior de la cinta. Retire el dedo.

Vuelva a acercar el dedo al centro de la parte frotada de la cinta, a unos 5 cm del extremo libre inferior. La cinta ya no es atraída por el dedo. La cinta también se puede sostener en horizontal. Cuando el centro de la parte frotada de la cinta se acerca al extremo inferior de la tira de un electroscopio descargado, no se produce ninguna atracción. Esta parte frotada de la cinta tampoco interactúa con un versorio metálico situado cerca.

Acerque el centro de la parte no frotada de esta cinta al extremo inferior de la cinta de un electroscopio descargado. La tira es atraída por la cinta. Esta parte de la cinta también orienta un versorio situado cerca. Vuelva a colgar la cinta por su otro extremo, esta vez con la parte frotada hacia arriba. Acerque un dedo al centro de la

parte inferior de la cinta que no fue frotada. Esta parte no frotada de la cinta es atraída por el dedo.

Este experimento demuestra varios hechos. Comenzamos con una cinta electrizada en toda su longitud y solo frotamos la mitad. Al deslizar un dedo por el lado liso de esta cinta electrizada, neutralizamos esa zona. La otra mitad de la cinta, sobre la que no se deslizó el dedo, no se descargó. Este hecho demuestra una vez más que la cinta adhesiva se comporta como un aislante en toda su longitud. En otras palabras, solo la mitad de la cinta permanece electrizada en toda su longitud. Las partículas electrizadas de esta parte no pueden desplazarse longitudinalmente hacia la otra mitad de la cinta.

5.4 La electrización de cintas con cargas opuestas

Prepare otro conjunto de cintas adhesivas, esta vez con tres cintas superpuestas. La cinta inferior B debe medir entre 10 y 20 cm de largo y pegarse sobre una superficie lisa y plana. Alísela con el dedo. Pegue una segunda cinta adhesiva sobre la cinta inferior. Doble un extremo y alise esta segunda cinta en toda su longitud. Pegue una tercera cinta sobre la segunda cinta. Doble un extremo y alise esta tercera cinta en toda su longitud. La segunda cinta se denomina cinta inferior y se representa con la letra L, que debe escribirse en su extremo. La tercera cinta se denomina cinta superior y se representa con la letra U, que debe escribirse en su extremo. Los extremos doblados de las cintas L y U deben superponerse. La figura 5.10 ilustra este conjunto de 3 cintas.

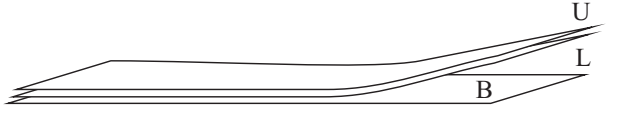


Figura 5.10: La cinta U se encuentra encima de la cinta L, que a su vez se encuentra encima de la cinta B.

Experimento 5.14 — *Neutralidad de un par de cintas superpuestas*

Las cintas U y L deben levantarse *lentamente* juntas y retirarse de la cinta base. La cinta B debe permanecer pegada a la mesa. Cuelgue la doble capa de cinta verticalmente en un soporte adecuado. Pase esta doble capa varias veces entre dos dedos para descargar el par.

A continuación, acerque este par de cintas LU a la tira de un electroscopio descargado. La tira no es atraída, figura 5.11.

Cuelgue el par de cintas LU verticalmente en un soporte adecuado, figura 5.12 (a) y (b). Acerque un dedo a la parte inferior de este par. No se produce ninguna atracción, figura 5.12 (c).

A veces, después de levantarlo y retirarlo de la cinta base, y luego alisarlo entre dos dedos, el par atrae la cinta de un electroscopio descargado y es atraído por otro dedo. Si se producen estas interacciones, el par debe neutralizarse antes de continuar con los experimentos. Para neutralizar el par, cuélguelo verticalmente y espere unos minutos.

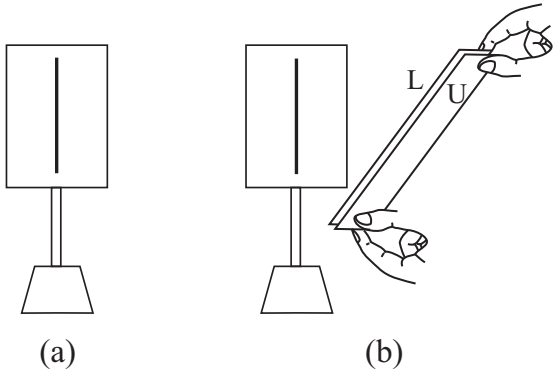


Figura 5.11: (a) Electroscopio descargado. (b) El par de cintas neutras LU no atrae la cinta de un electroscopio descargado.

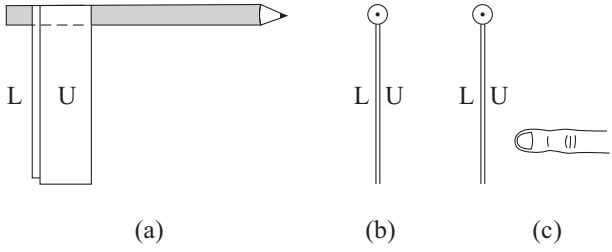


Figura 5.12: (a) Vista lateral de un par de cintas adhesivas LU suspendidas. (b) Vista frontal. (c) El par no es atraído por un dedo cercano.

También puede pasarla lentamente varias veces entre dos dedos. El par también puede colgarse verticalmente por un extremo de un soporte adecuado. Frote lentamente un dedo de manera vaivén a lo largo del lado liso de la cinta U, como se muestra en la figura 5.9.

A partir de ahora, supongamos que el par LU es neutro. Es decir, ya no atrae a los cuerpos ligeros y no es atraído por los conductores conectados a tierra.

Experimento 5.15 — *Atracción y repulsión entre cintas electrizadas*

Comience con un par de cintas neutras LU, como en el experimento 5.14. Sujete el extremo doblado de la cinta L con una mano y el extremo doblado de la cinta U con la otra mano. A continuación, tire *rápidamente* de la cinta U hacia arriba para separarla de la cinta L. Cuelgue cada cinta verticalmente en un soporte adecuado, con ambos soportes separados entre sí.

Compruebe que cada cinta se electrizó realizando procedimientos similares a los de los experimentos 5.7 y 5.8.

Siga el mismo procedimiento con un nuevo par de cintas neutras LU y prepare otra cinta L electrizada y otra cinta U electrizada.

Acérquese lateralmente un lápiz horizontal al otro lápiz, cada uno con una cinta U. Los lápices pueden incluso tocarse. Observe que las cintas se repelen, figura 5.13 (a). Dos cintas L electrizadas también se repelen, figura 5.13 (b). Sin embargo, una cinta inferior atrae a una cinta superior, figura 5.13 (c).

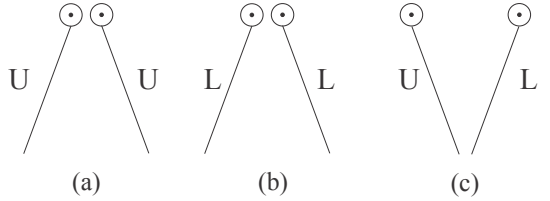


Figura 5.13: (a) Repulsión entre dos cintas U. (b) Repulsión entre dos cintas L. (c) Atracción entre una cinta inferior y una cinta superior.

Concluya que las cintas U y L ahora están electrizadas de manera opuesta, una positivamente y la otra negativamente.

Al reducir la distancia entre los lápices horizontales que sostienen las cintas U, se aumenta el ángulo de inclinación de las cintas con respecto a la vertical. Este hecho ilustra que la fuerza de repulsión entre cuerpos electrizados con cargas del mismo signo aumenta cuando disminuye la distancia entre los cuerpos en interacción. Lo mismo ocurre al reducir la distancia entre dos cintas L, o entre una cinta inferior y una cinta superior.

Experimento 5.16 — *Descubrir el signo de la carga en cada cinta*

Cuelgue una cinta inferior electrizada verticalmente en un soporte adecuado y una cinta superior electrizada en otro soporte adecuado. Estos dos soportes deben estar separados entre sí. Frote una pajita de plástico con el cabello o en un trozo de papel para que se cargue de electricidad negativa. Acérquela horizontalmente a la parte inferior de las dos cintas. En la mayoría de las cintas con las que trabajamos, la cinta superior era repelida por la pajita, mientras que la cinta inferior era atraída por ella.

Una pajita adquiere una carga positiva suficiente cuando se frota entre dos tubos de PVC.[4] Acerque esta pajita positiva a las dos cintas electrizadas. Repele la cinta inferior y atrae la cinta superior.

Entonces se puede concluir que, normalmente, la cinta superior se electriza negativamente, mientras que la cinta inferior se electriza positivamente, figura 5.14.

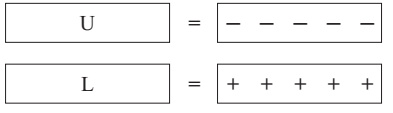


Figura 5.14: La cinta superior tiene carga negativa y la inferior tiene carga positiva.

[4]Sección 5.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

5.5 Dipolos eléctricos

Un dipolo eléctrico está formado por dos partículas iguales y eléctricamente opuestas, separadas por una cierta distancia. Un cuerpo cuya carga total es nula y que posee una cantidad igual de cargas positivas y negativas separadas a lo largo de su volumen también se denomina dipolo eléctrico. En esta sección, mostramos cómo fabricar dipolos eléctricos y presentamos algunos fenómenos que se pueden observar con ellos. La interacción entre dos dipolos eléctricos presenta muchas propiedades análogas a la interacción entre dos imanes.

Experimento 5.17 — *Dipolo eléctrico realizado con cintas adhesivas*

Ahora prepare un dipolo eléctrico comenzando con un versorio de plástico, tal y como se describe en la subsección 2.3.3. Supongamos que cada pata de este versorio mide aproximadamente 5 cm de largo. Supongamos también que ambas patas son inicialmente neutras. Esto se puede comprobar acercando un dedo a cada pata. Si el versorio no se orienta con el dedo, las patas pueden considerarse neutras. Prepare un conjunto de 3 cintas superpuestas (denominadas B, L y U), como en la figura 5.10, cada una de 4 cm de largo. A continuación, las cintas L y U se electrizan de forma opuesta, como en el experimento 5.15. Pegue la cinta L en una pata del versorio y la cinta U en la otra pata, figura 5.15 (a).

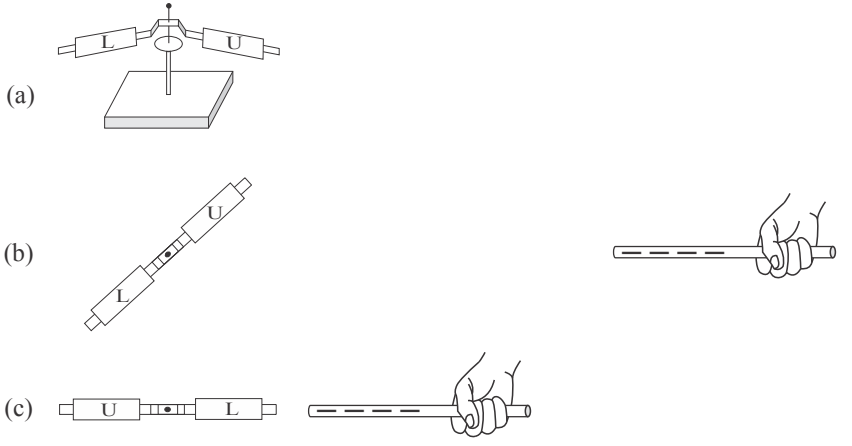


Figura 5.15: (a) Versorio de plástico con una cinta electrizada L en una pata y una cinta electrizada U en la otra pata. (b) Vista superior con el versorio en una orientación arbitraria cuando la pajita electrizada está alejada de él. (c) El versorio está orientado hacia la pajita electrizada que se encuentra cerca.

Cuando la pajita negativa se acerca a una de las patas, el versorio gira y apunta hacia la pajita. Además, la pata U es repelida por la pajita, mientras que la pata L es atraída por ella. En equilibrio, el versorio se orienta como se indica en la figura 5.15 (c).

Este dipolo eléctrico tiene cargas opuestas de igual magnitud en las diferentes patas del versorio. Es análogo a una brújula magnética ordinaria y puede denominarse

«brújula eléctrica».[5] La interacción entre dos versorios de plástico polarizados se comporta como la interacción entre dos brújulas magnéticas.

Sin embargo, mientras que una brújula normal se orienta por la Tierra y por un imán cercano, este dipolo eléctrico se orienta no solo por otro dipolo eléctrico, sino también por una pajita electrizada con un solo tipo de carga (positiva o negativa). No existe ningún imán similar a una pajita electrizada. En otras palabras, no conocemos ningún material en la naturaleza que contenga un solo tipo de «carga magnética». Por ejemplo, no existe ninguna sustancia que contenga únicamente un polo norte. Cuando partimos un imán recto por la mitad, cada mitad tiene un polo norte y un polo sur, figura 5.16.

Figura 5.16: (a) Imán recto. (b) Al romper el imán, formamos dos nuevos imanes. Cada pequeño imán tiene un polo norte y un polo sur.

Este experimento no funciona correctamente cuando las cintas adhesivas se fijan a un versorio metálico. Hay dos razones para ello. (a) La primera razón es que este versorio es un conductor. La cinta adhesiva también se comporta como un conductor a través de su superficie. Por lo tanto, las partículas electrizadas de ambas cintas pueden neutralizarse mutuamente a través del versorio conductor.

(b) Existe una segunda razón que dificulta la realización de este experimento con un versorio metálico (incluso cuando no se produce esta neutralización, las dos cintas conservan sus cargas opuestas). Un versorio metálico es un conductor. Por lo tanto, cuando se acerca una pajita electrizada a una de sus patas, esta adquiere una carga inducida de signo opuesto. Entonces será atraída por la pajita, intentando orientar el versorio. Habrá una fuerte fuerza de atracción entre esta pata y la pajita. Finalmente, esta fuerza de atracción puede ser mayor que la fuerza que actúa entre cada cinta y la pajita. Si esto ocurre, las dos patas del versorio serán atraídas por la pajita, pero con fuerzas totales de diferentes intensidades. Supongamos, por ejemplo, que la pajita es negativa, que la cinta adhesiva de la pata izquierda es positiva y que la de la pata derecha es negativa. Cuando la pajita se acerca a la pata izquierda, el extremo de esta pata se vuelve positivo. Por lo tanto, la pajita atraerá esta pata metálica, así como la cinta adhesiva que hay pegada a ella. Acerque la pajita a la pata derecha. El extremo de esta pata también se volverá positivo. La pajita atraerá entonces esta pata metálica debido a las cargas inducidas en ella, mientras que repelerá la cinta negativa pegada a ella. La fuerza de atracción total que actúa sobre la pata izquierda será mayor que la fuerza de atracción resultante que actúa sobre la pata derecha, suponiendo que la distancia entre la pajita y cada pata sea la misma. Este hecho complicará un poco el análisis de la rotación de este versorio metálico.

[5] [Net94] y [CS02, p. 466].

Experimento 5.18 — *Otros tipos de dipolos eléctricos*

El experimento 5.17 utilizaba un dipolo eléctrico fabricado con cintas adhesivas. El presente experimento describe otros tipos de dipolos eléctricos.

La serie triboeléctrica, tabla 1.1, muestra que una pajita de plástico se carga negativamente cuando se frota con el cabello, la piel, papel o algodón. Adquiere una carga positiva suficientemente importante cuando se frota entre dos tubos de PVC. Para ello, coloque un extremo de la pajita entre estas dos piezas bien comprimidas y retírela rápidamente de los tubos de PVC.

Comience con una pajita neutra en forma de letra V invertida. Cuélguela de un hilo de seda que pase por su centro. Frote la mitad de esta pajita con una toalla de papel. Esta primera mitad de la pajita se electriza negativamente. Tire rápidamente de la otra mitad de la pajita, alejándola de los dos tubos de PVC comprimidos. Esta segunda mitad de la pajita se electriza positivamente. La pajita queda entonces polarizada por este procedimiento, aunque las dos partes pueden adquirir cargas de diferente amplitud, como se muestra en la figura 5.17 (a). En esta situación, la pajita tiene una carga total, neta o resultante, diferente de cero. Se forma un dipolo eléctrico cuando las dos partes se electrizan por igual con cargas opuestas, figura 5.17 (b).

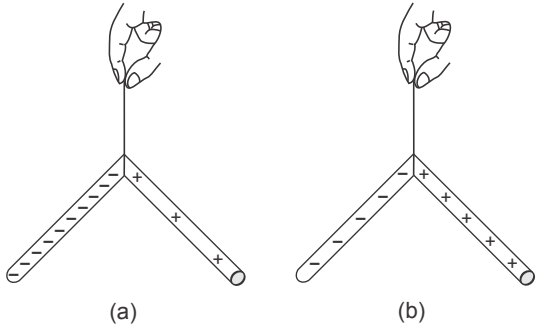


Figura 5.17: (a) La pata negativa está más electrizada que la pata positiva. (b) Las patas están electrizadas por igual con cargas opuestas.

Puede orientar este dipolo acercando una regla acrílica negativa a una de sus patas.

Fabrique otro tipo de dipolo eléctrico utilizando una barra o un paralelepípedo de poliestireno que mida, por ejemplo, $2 \times 2 \times 7$ cm o $0.5 \times 0.5 \times 5$ cm.[6] El tamaño exacto no es muy importante. Utilizando la serie triboeléctrica, tabla 1.1, sabemos que el poliestireno se vuelve negativo cuando se frota con el cabello, la piel o papel. Se vuelve positivo cuando se frota con una bolsa de plástico o contra una placa acrílica rígida. Frote un extremo de la barra de poliestireno sobre un trozo de papel. Frote el otro extremo de la barra sobre una placa acrílica rígida. A continuación, la barra se sostiene con un hilo de seda que pasa por su centro. Entonces será similar a un péndulo eléctrico, sustituyendo la barra al disco de papel de la figura 2.10. La figura 5.18 ilustra este dipolo eléctrico suponiendo cargas iguales y opuestas en ambos extremos.

Una paja negativa repele el extremo negativo y atrae el extremo positivo.

[6] [Fersdb, Corpo com duas cargas diferentes, p. 11; e Pêndulo de isopor, p. 30].

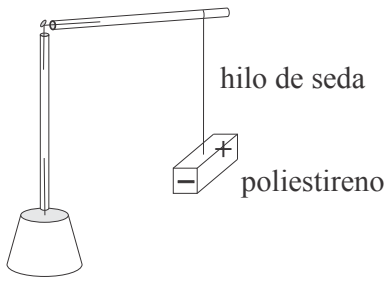


Figura 5.18: Barra de poliestireno polarizado.

Dos de estas barras polarizadas colocadas una al lado de la otra se orientan una hacia la otra. Una barra no solo ejercerá un par sobre la otra, sino también una fuerza neta. En equilibrio, los extremos que se enfrentan tendrán polaridades opuestas.

Fabrique un dipolo eléctrico con un versorio de plástico. Elija dos materiales adecuados para frotar sus patas. Estos materiales deben encontrarse en los lados opuestos de la serie triboeléctrica con respecto al material plástico del versorio. En otras palabras, un material debe estar entre el plástico y la carga positiva, mientras que el otro material debe estar entre el plástico y la carga negativa. Electrice una pata negativamente y la otra positivamente. Se forma un dipolo eléctrico cuando las dos patas se electrizan por igual con cargas opuestas, figura 5.19.

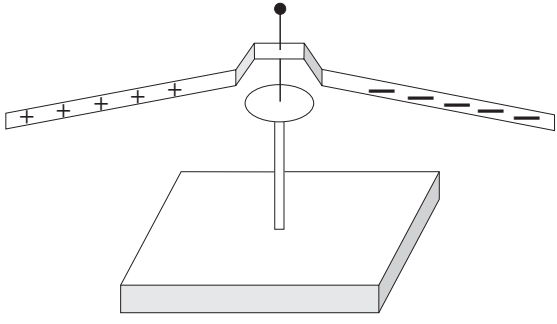


Figura 5.19: Versorio de plástico polarizado.

La pata negativa es repelida por una pajita negativa y atraída por una pajita positiva. La pata positiva es repelida por una pajita positiva y atraída por una pajita negativa.

5.6 Aspectos generales relacionados con las cintas adhesivas

Las sustancias adhesivas se conocen desde hace miles de años. Las cintas adhesivas fueron inventadas alrededor de 1845 por el cirujano Horace Day. Creó cintas quirúrgicas aplicando un adhesivo a base de caucho sobre tiras de tela. Las cintas

adhesivas comerciales se introdujeron a principios del siglo XX. Las cintas eléctricas se crearon a principios de la década de 1930. Se denominaban «cintas de fricción» y consistían en una cinta de tela impregnada con un material adhesivo fabricado a partir de gutapercha. En la década de 1940, el papel de tela fue sustituido por cinta de plástico de vinilo.

La mayoría de las cintas adhesivas utilizan un adhesivo sensible a la presión, o PSA. Esto significa que el grado de adherencia entre dos superficies depende de la presión ejercida. Hoy en día, la mayoría de las cintas están hechas de tiras de vinilo, PVC o plástico recubiertas con un adhesivo de caucho en una cara y una capa antiadherente en la otra. Esta última capa evita que el adhesivo se pegue a la cara lisa cuando se enrolla o desenrolla la bobina.

Capítulo 6

El electroforo

6.1 El instrumento

Esta sección presenta un dispositivo que desempeñó un papel importante en la historia de la electricidad: el electroforo. Se compone de dos partes: (a) una base aislante electrizada, asociada a (b) un colector de carga. Este colector de carga está compuesto por un conductor conectado a un mango aislante, sección 2.6. La base aislante también se denomina placa o bloque dieléctrico. Se puede cargar por fricción o por cualquier otro medio. La figura 6.1 representa una placa aislante cargada positivamente, así como el colector de carga del electroforo.

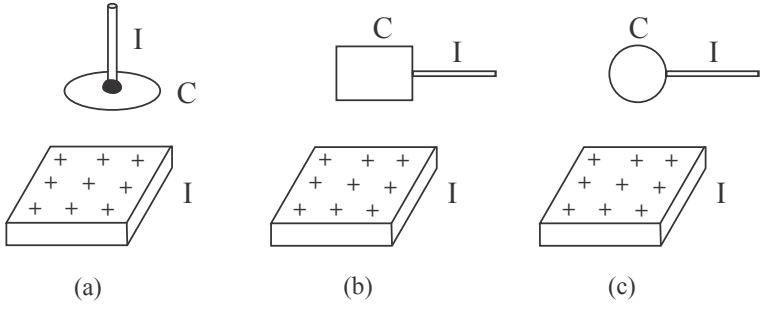


Figura 6.1: Ejemplos de electroforos compuestos por una placa aislante I cargada positivamente, con su colector de carga, es decir, un conductor C provisto de un mango aislante I.

Normalmente, la base aislante y el conductor son planos, aunque este aspecto no es esencial. Deben tener la misma forma para ofrecer una gran superficie de contacto. La base aislante o dieléctrica tiene el mismo tamaño o es más grande que el conductor. Puede ser una lámina de plástico, una placa de poliestireno, una caja de CD de plástico, una placa de PVC, una placa de acrílico, etc. Se puede electrizar frotándola enérgicamente con una toalla de papel, lana, tela de algodón o cualquier otro material adecuado.

Algunos autores utilizan el nombre de electroforo para referirse únicamente a su parte (b), es decir, el conductor con un mango aislante. Esta parte (b) funciona como un colector de carga.

El colector de carga de la figura 6.1 (a) puede representar, por ejemplo, la tapa metálica de una lata o un molde de pizza de aluminio conectado a un tubo de PVC. Este colector de carga también puede representar el plano de prueba de Coulomb, es decir, un disco conductor de cartón fino conectado a una pajita de plástico con plastilina.[1] También puede ser una placa de aluminio ligera conectada al extremo de un tenedor de plástico horizontal con cinta adhesiva. El colector de carga de la figura 6.1 (b) puede representar, por ejemplo, un electroscopio clásico como los utilizados en este libro, pero sin su tira de papel de seda. En este caso, se trata simplemente de un cartón rectangular unido a una pajita de plástico. El colector de carga de la figura 6.1 (c) puede representar, por ejemplo, una bola de papel de aluminio unida al extremo de una pajita de plástico, o una esfera metálica en el extremo de un tubo de PVC.

Un electroforo particular con el que obtuvimos una buena electrización utiliza un molde para pizza de 30 cm de diámetro con un mango aislante en el centro. La base aislante de este electroforo puede ser una placa cuadrada de PVC de 40 cm de lado. Esta base aislante se electriza frotándola enérgicamente con una toalla de papel o un paño de algodón. Cláudio Furukawa, de la Universidad de São Paulo, nos proporcionó este electroforo.[2]

El electroforo fue inventado por el físico sueco Johan Carl Wilcke (1732–1796). Publicó sus principales resultados en 1762.[3] Había publicado la primera serie triboeléctrica en 1757. El electroforo fue mejorado y popularizado por Alessandro Volta hacia 1775. El nombre «electroforo» se debe a Volta. Se deriva de las palabras griegas «ámbar» o «elektron» y «llevar» o «pherein», es decir, un proveedor o portador de electricidad.[4] Este instrumento se conoce generalmente como «electróforo de Volta», aunque fue inventado por Wilcke.

El científico alemán Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) construyó en 1777 un electroforo de gran tamaño. Su colector de carga era un disco metálico de 2 m de diámetro. Esta placa metálica se elevaba y bajaba mediante un sistema de poleas, produciendo chispas de hasta 40 cm de longitud. Utilizó este electroforo para producir las famosas figuras de Lichtenberg, es decir, descargas eléctricas ramificadas en la superficie de materiales aislantes.[5]

6.2 El funcionamiento del electroforo

Experimento 6.1 — *Electrizar el colector de carga de un electroforo*

Esta sección describe cómo utilizar el electroforo. La figura 6.2 (a) representa una placa de poliestireno electrizada negativamente en su superficie mediante fricción con una servilleta de papel. El colector de carga de este electroforo puede ser un disco de

[1] Sección 2.6.
[2] [MFsd].
[3] [Hei99, pp. 418–419].
[4] [Hei99, pp. 416–417].
[5] [Lic56], [Har67, p. 89], [BJ92], [Beu92] y [Ach96, capítulo 5].

cartón fino provisto de una pajita de plástico que sirve de mango, o un disco metálico provisto de un tubo de PVC que sirve de mango. La figura 6.2 (b) muestra el disco sobre la base aislante electrizada. En la figura 6.2 (c), un dedo toca cualquier punto de la cara superior del disco metálico. Retire el dedo, figura 6.2 (d). Por último, levante el colector de carga por su mango, figura 6.2 (e). No toque su disco conductor.

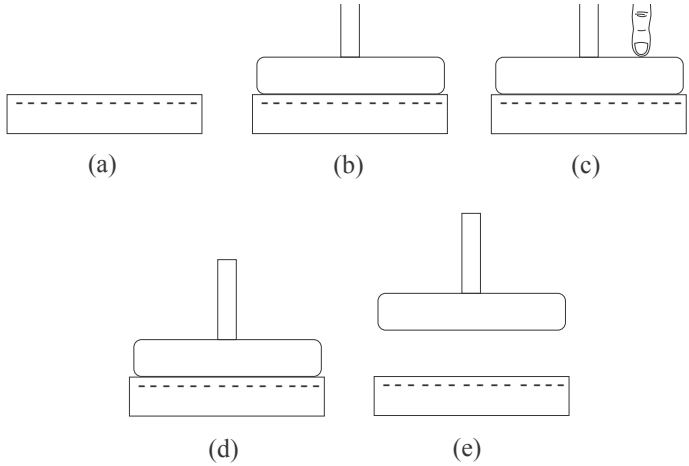


Figura 6.2: Funcionamiento del electroforo.

Cargue dos péndulos eléctricos, uno positivamente y otro negativamente. Deben mantenerse separados entre sí. Acerque lentamente el colector de carga del electroforo a cada uno de estos péndulos. Observe que repele el péndulo positivo y atrae el péndulo negativo. Concluimos que el electroforo se electrizó positivamente durante esta operación.

Existe una explicación sencilla para esta electrización basada en la inducción eléctrica o la polarización, figura 6.3.

Cuando el disco conductor se coloca sobre la placa aislante electrizada, se polariza. Cuando un dedo toca su cara superior, el disco conductor se conecta a tierra. Su cara superior se neutraliza, pero su cara inferior permanece electrizada debido a la presencia de la placa aislante electrizada cercana. Cuando se retira el dedo, no cambia nada en el disco. Cuando se levanta el disco por su mango, se produce una redistribución de la carga neta del disco entre sus caras superior e inferior. Al final del proceso, el electroforo se electriza con una carga neta de signo opuesto al de la base electrizada.

La figura 6.4 ilustra la situación en la que el colector de carga está compuesto por una esfera metálica con un mango aislante. Toca una placa aislante electrizada positivamente, por lo que al final del proceso se carga negativamente.

El experimento 6.1 muestra que el colector de carga se electriza con una carga de signo opuesto al de la base. La electricidad almacenada en el colector de carga puede transportarse fácilmente a cualquier lugar cuando el colector se sujeta únicamente por su mango aislante. A continuación, puede transferirse parcialmente a otro conductor aislado del suelo cuando el colector de carga electrizado toca dicho conductor. Cuando

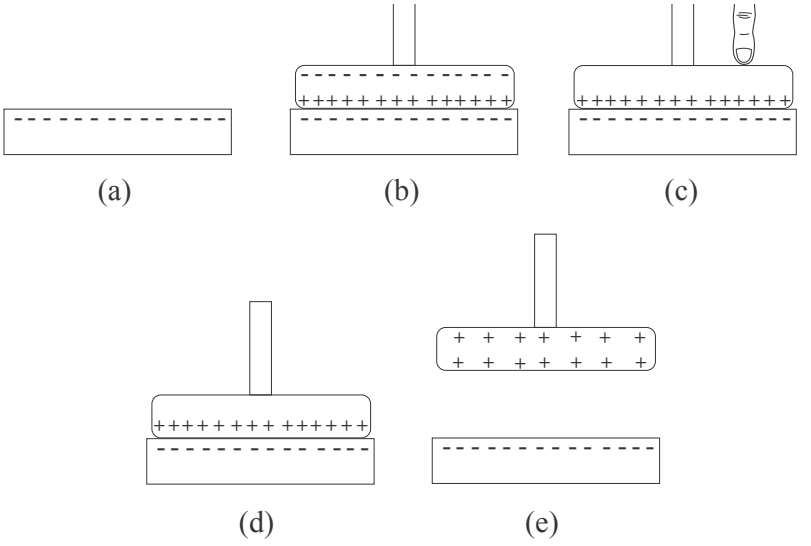


Figura 6.3: Electrización del colector de carga con una carga neta de signo opuesto al de la base.

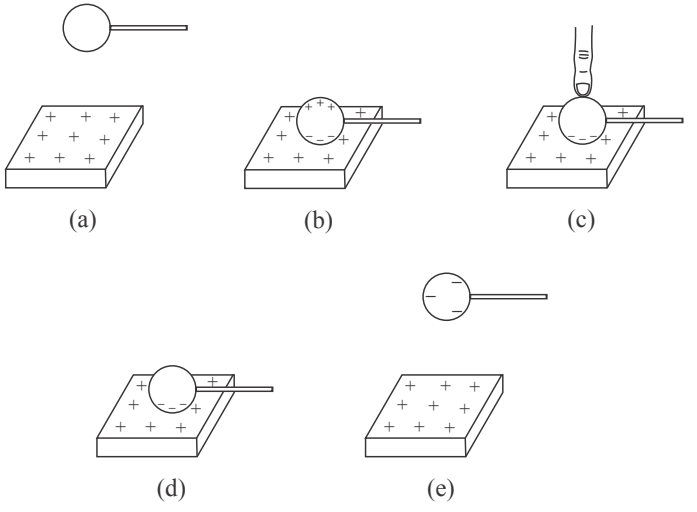


Figura 6.4: Conductor esférico que toca una placa aislante positiva.

este conductor es mucho más grande que el colector de carga, adquiere la mayor parte de la electricidad inicialmente almacenada en el colector.

Es muy fácil electrizar y manipular un electroforo. *Pero su principal ventaja es que todo este proceso de electrización puede repetirse varias veces sin que la base electrizada pierda su carga de forma apreciable.* Supongamos que, en cada ciclo de funcionamiento, transferimos toda la carga recogida a otro conductor. Después de muchos ciclos,

transferimos una cantidad de carga cuya amplitud es mucho mayor que la cantidad de carga distribuida sobre la base electrizada. Este hecho notable se explica fácilmente. En cada ciclo, el colector de carga toca la base electrizada solo en unos pocos puntos de contacto. Solo estos puntos se neutralizarán. Las demás regiones de la base electrizada no se neutralizan en este proceso. Después de todo, se trata de un aislante que no permite el movimiento de sus partículas electrizadas. Además, las cargas adquiridas por el colector en cada ciclo no son suministradas por la placa electrizada. Son suministradas por la Tierra durante la conexión a tierra con un dedo. La importancia de la base electrizada es polarizar el conductor del colector de carga. El colector de carga adquiere una carga neta gracias a la conexión a tierra. Dado que la superficie conductora de la Tierra es enormemente mayor que la superficie del colector de carga, la Tierra dispone de una cantidad casi inagotable de cargas libres que pueden suministrarse al colector de carga durante muchos ciclos de funcionamiento.

En cualquier caso, la base electrizada se descarga lentamente. Una de las razones es la escasa cantidad de partículas electrizadas que se intercambian con el colector de carga en los puntos de contacto. Otra razón es la baja conductividad del aire debido a la presencia de iones móviles. Además, también pierde parte de sus partículas electrizadas en el suelo. Al fin y al cabo, aunque sea aislante, no existen aislantes perfectos en la naturaleza. El poliestireno, el plástico, el acrílico y otros materiales aislantes siempre tienen una baja conductividad. Pero normalmente estas pérdidas de electrización son muy pequeñas y no se perciben fácilmente en tiempo seco. Normalmente, se puede hacer funcionar el electroforo durante unos minutos, repitiendo varias veces el ciclo de carga, sin notar la pérdida de electrización de su base. Además, incluso cuando la cantidad de electricidad de la base disminuye con el tiempo o con los ciclos de funcionamiento del electroforo, basta con frotar una vez más la base aislante para restaurar su electrización original. A continuación, se puede producir una nueva serie de ciclos de funcionamiento.

El colector de carga de un electroforo puede electrizarse varias veces sin descargar de forma apreciable su base. Por eso Volta llamó a este aparato «elettroforo perpetuo», es decir, un proveedor inagotable de electricidad. Su placa dieléctrica conservaba su electricidad casi indefinidamente durante numerosos ciclos de funcionamiento:[6,7]

> […] electrizado una sola vez, brevemente y con moderación, nunca pierde su electricidad, y aunque se le toque varias veces, conserva obstinadamente la fuerza de sus signos.

Experimento 6.2 — *Cargar un electroscopio en contacto con una base electrizada*

En este experimento, la base o placa aislante rectangular electrizada del electroforo permanece fija con respecto al suelo en un plano vertical, figura 6.5 (a).

El colector de carga será un cartón fino rectangular de 7 cm por 10 cm conectado a una pajita de plástico. Se pega una fina tira de papel de seda en la cara exterior de este colector de carga, es decir, en el mismo lado que la pajita. Sujete el colector de

[6] [Hei99, p. 416].

[7] […] electrified but once, briefly and moderately, never loses its electricity, and although repeatedly touched, obstinately preserves the strength of its signs.

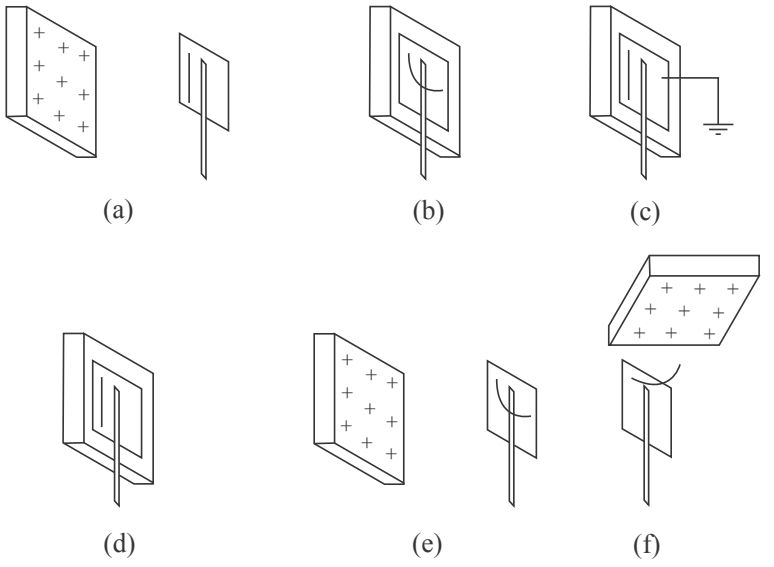


Figura 6.5: (a) Base electrizada y colector de carga del electroforo provisto de una tira de papel de seda. (b) La tira se levanta cuando el cartón toca la placa electrizada. (c) La tira vuelve a caer durante la conexión a tierra. (d) Permanece abajo cuando se suprime la conexión a tierra. (e) Se levanta cuando el colector sale de la base. (f) Tira atraída por la placa electrizada.

carga por la pajita y coloque el cartón sobre la placa electrizada, tocándola. La tira se aleja del cartón, figura 6.3 (b). Conecte el cartón a tierra mientras está en contacto con la base electrizada. Este proceso de conexión a tierra puede realizarse, por ejemplo, tocando el cartón con un dedo. La tira cae, pegándose al rectángulo, figura 6.3 (c). La tira permanece abajo cuando se elimina la conexión a tierra, figura 6.3 (d). Retire el electroforo de la placa electrizada sujetándolo por su mango aislante. La tira vuelve a subir, figura 6.3 (e). Coloque la placa aislante electrizada positivamente en posición horizontal. Acérquela al cartón, su tira se desplaza hacia la placa, figura 6.5 (f). Este hecho indica que el colector se electrizó con una carga de signo opuesto al de la placa electrizada.

Este comportamiento puede explicarse por la distribución de carga de la figura 6.3, invirtiendo los signos de todas las cargas.

Experimento 6.3 — *La serpiente eléctrica*

Realice el experimento de la «serpiente eléctrica».[8] El colector de carga del electroforo será el disco de la figura 6.1 (a). Coloque trozos de papel (o pequeños trozos de papel de aluminio o papel de seda) sobre el disco, en el mismo lado en el que se fijó el mango aislante. El colector de carga se electriza como en el experimento 6.1. Cuando el colector de carga sale de la base electrizada, algunos trozos de papel saltan

[8] [FR08, p. 86].

del disco. Ahora acerque un dedo a la parte superior del disco. Los trozos de papel restantes son atraídos por el dedo, lo tocan y caen de nuevo sobre el disco.

Este experimento no funciona correctamente cuando los trozos de papel se sustituyen por pequeños trozos de un material aislante, como una bolsa de plástico.

Este experimento está relacionado con el efecto del ámbar, que muestra un fenómeno opuesto. En el efecto del ámbar, una pajita frotada se acerca a pequeños trozos de papel y estos saltan hacia el plástico frotado. Aunque los trozos de papel son inicialmente neutros, se polarizan por la pajita electrizada cercana. Cuando los trozos de papel descansan sobre una superficie conductora, adquieren una carga neta de signo opuesto al de la pajita cercana.[9]

En el presente experimento, por el contrario, el disco del electroforo y los trozos de papel que se encuentran sobre el disco se electrizan con cargas del mismo signo cuando separamos el colector de carga de la base electrizada. Debido a la repulsión que ejerce el disco electrizado sobre los trozos de papel electrizados, algunos trozos de papel saltan del disco cuando este sale de la base. Cuando se acerca un dedo al disco, los trozos de papel restantes son atraídos por él. El dedo es un conductor conectado a tierra. Inicialmente es neutro cuando está alejado del disco electrizado. Cuando se acerca al disco electrizado, la punta del dedo se carga con una carga de signo opuesto al del disco. El dedo electrizado atrae entonces los trozos de papel de carga opuesta. Como los trozos de papel restantes también son repelidos por el disco electrizado, se desplazan hacia el dedo. Cuando los pequeños trozos de papel tocan el dedo, adquieren una carga neta del mismo signo que la del dedo debido al mecanismo *ACR*. A continuación, son repelidos por el dedo y atraídos por el disco, cayendo sobre este.

Este experimento y el efecto del ámbar ilustran el principio de acción y reacción. En el efecto del ámbar, una pajita electrizada atrae trozos de papel que inicialmente eran neutros. Aquí, en cambio, los trozos de papel electrizados son atraídos por un dedo que inicialmente era neutro.

6.3 Un testimonio personal

Cito aquí una experiencia particular que podría ser útil para otras personas. Durante mis estudios de física en la Universidad de Campinas (UNICAMP) entre 1980 y 1983, leí artículos sobre el electroforo y decidí construir este instrumento. Utilicé la tapa circular de una caja metálica como colector de carga. Corté 20 cm de un palo de escoba de madera para hacer un mango aislante. Fijé el mango al disco con un clavo. Utilicé varias bases aislantes, como una bolsa de plástico, una placa de acrílico o una placa de PVC. Para electrizar esta base, la froté con una toalla de papel, un paño de algodón y otros materiales.

Probé algunos experimentos sencillos descritos en los manuales, pero siempre fracasé. En otras palabras, no conseguí reproducir con mi electroforo los fenómenos eléctricos descritos en los manuales. Al principio, supuse que la base no había recibido suficiente electricidad. Cambié el material de la placa base, pero nada cambió. Cambié las sustancias utilizadas para frotar la placa, pero tampoco cambió nada. Finalmente,

[9] Como se explica en la subsección 4.1.2. Véase también la sección 8.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

decidí cambiar los métodos de fricción. Nada funcionó. Al final, abandoné este experimento y otros relacionados con la electricidad. Llegué a la conclusión de que era culpa mía, que no se me daba bien la física experimental. Esta frustrante experiencia fue una de las razones por las que decidí dedicarme a la física teórica.

A principios de la década de 1990, descubrí los trabajos de Norberto Ferreira.[10] Entonces descubrí por fin la verdadera razón de mi fracaso. No era una falta de habilidad manual. Mi error fue utilizar un mango de madera como material aislante. En aquel momento, pensaba que ese mango era aislante simplemente porque era de madera. Al fin y al cabo, ese era el mensaje implícito que se encontraba en la mayoría de los manuales didácticos. Mencionaban que la madera, el vidrio, el caucho, el agua y muchas otras sustancias eran aislantes, e incluso presentaban sus constantes dieléctricas. Los metales y el cuerpo humano, por el contrario, se consideraban conductores. Durante mis estudios de grado, nunca hubiera imaginado que un trozo de madera pudiera comportarse como un conductor. Por lo tanto, nunca intenté probar su comportamiento conductor y no consideré sustituirlo por un tubo de PVC u otro material.

Gracias al trabajo de Norberto Ferreira, descubrí que la mayoría de los materiales se comportan como conductores en los experimentos electrostáticos. Estos materiales conductores incluyen muchos tipos de madera, vidrio, caucho, agua del grifo, etc. Este aspecto fue la lección más importante que aprendí de su trabajo. En otras palabras, en lugar de decir que un determinado cuerpo es conductor o aislante, es más correcto mencionar que ese material «se comporta como» un conductor o un aislante, «dependiendo de las condiciones internas y externas a las que se someta». En particular, cuando aplicamos una alta tensión entre los extremos de un cuerpo, un determinado material que normalmente se comporta como un aislante para bajas tensiones puede entonces comportarse como un conductor. Como en electrostática, generalmente nos enfrentamos a tensiones elevadas, que suelen oscilar entre 1 000 V y 10 000 V, la mayoría de los materiales se comportan como conductores.

Es probable que el mango de madera que utilicé en el colector de carga de mi electroforo se comportara como un conductor. Por eso no pude recoger cargas con este instrumento y los experimentos fracasaron. Sustituyendo el mango de madera por un tubo de PVC u otro mango aislante, los sencillos experimentos descritos en los manuales pueden reproducirse fácilmente.

Mi fracaso o frustración inicial ilustra la importancia de probar siempre el comportamiento conductor de los materiales antes de comenzar cualquier experimento. Para ello, el mejor procedimiento para saber si una sustancia se comporta como conductor o aislante es utilizar la prueba del electroscopio descrita en la sección 3.1. Norberto Ferreira también me enseñó a construir electroscopios sencillos y económicos, así como muchos otros aparatos que funcionan perfectamente. Esa fue la segunda lección importante que aprendí con él.

[10] [Fer78], [FM91], [Fersda], [Fersdb], [Fersdc], [Fersdd], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] y [Fer01a].

Capítulo 7

La distribución de cargas en un conductor

Este libro presenta varios experimentos con conductores huecos. Por lo general, se trata de una carcasa cilíndrica de papel, cartón o metal (como una taza o una lata). Esta carcasa cilíndrica a veces se denomina cilindro. No tiene tapa ni por arriba ni por abajo, para que se pueda ver lo que ocurre en su interior. También se puede utilizar una malla metálica cilíndrica. Si es necesario, el cilindro se puede aislar del suelo sosteniéndolo con pajitas verticales fijadas con cinta adhesiva. La carcasa cilíndrica también se aísla cuando se coloca sobre una placa de poliestireno o una caja de CD de acrílico. Cuanto más gruesa sea la placa, mejor será su aislamiento. Se puede obtener un buen aislamiento para estos experimentos con placas de entre 2 y 5 cm de grosor.

7.1 La distribución de cargas en los conductores

7.1.1 Experimentos con electroscopios

Experimento 7.1 — *Electrizar una carcasa cilíndrica*

Prepare la carcasa cilíndrica de la figura 7.1 (a). Esta carcasa se utilizará como electroscopio curvo. Las tiras de papel de seda internas y externas indicarán las densidades de carga superficial situadas en las paredes internas y externas.

Recorte un rectángulo de papel o cartón fino de 10 × 20 cm (o 10 × 30 cm). Fije una pajita de plástico con cinta adhesiva de manera que una parte sobresalga del rectángulo. Cierre el rectángulo formando una carcasa cilíndrica. Los bordes del papel que se unen pueden pegarse o fijarse con una grapadora. Esta carcasa cilíndrica se denominará a veces simplemente cilindro. Recorte tiras muy pequeñas de papel de seda, de 1 a 3 mm de ancho y de 5 a 9 cm de largo. Sus extremos superiores deben pegarse al interior y al exterior del cilindro. A continuación, la pajita vertical se fija a un soporte adecuado, como el soporte fabricado con un vaso de plástico fino, yeso y un tensor de papel, figura 7.1 (a).

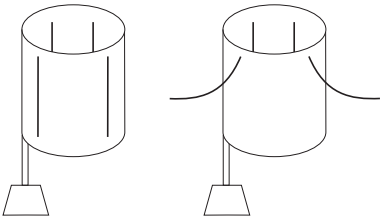


Figura 7.1: (a) Carcasa cilíndrica de papel aislada del suelo. (b) Carcasa cilíndrica electrizada con tiras externas levantadas. Cuanto mayor es la electrización del cilindro, más altas son sus tiras.

Electrice una pajita de plástico o una regla acrílica frotándola con el cabello o una toalla de papel. Raspe varias veces la pajita frotada sobre el borde superior del cilindro hasta que se electrifique, como indican sus tiras levantadas. El cilindro también se puede electrizar con un electroforo, como el fabricado con un cartón fijado a una pajita de plástico, figura 6.1 (b). Para electrizar la carcasa de papel, toque el borde superior del cilindro con el electroforo electrizado. Este proceso debe repetirse varias veces, electrizando siempre el electroforo antes de tocarlo con el cilindro. Cuando el cilindro adquiera suficiente electricidad, observe que solo sus tiras externas permanecen levantadas, alejadas del cilindro. Sus tiras internas, por el contrario, permanecen bajas, adheridas al cilindro incluso cuando está electrizado, como se muestra en la figura 7.1 (b).

Además, las tiras externas se levantan poco a poco. En otras palabras, sus ángulos de elevación aumentan cada vez que se raspa el cilindro con la pajita electrizada o cada vez que un electroforo electrizado toca su borde superior. Suben hasta alcanzar un cierto grado de saturación. Una vez alcanzada esta desviación máxima, se puede raspar el cilindro con la pajita electrizada o tocarlo con un electroforo electrizado, sin que las tiras suban más.

Experimento 7.2 — *Electrizar un rectángulo de papel*

Recorta un rectángulo de papel o cartulina fina de 7 cm por 20 cm (o 10 cm por 30 cm). Fija dos o tres pajitas con cinta adhesiva de manera que una parte de cada pajita sobresalga del rectangulo. El rectangulo debe permanecer vertical, con las pajitas fijadas en soportes adecuados. Recorte dos tiras finas de papel de seda de 6 cm de largo y de 1 a 3 mm de ancho. El extremo superior de una tira debe pegarse en el centro de un lado del rectangulo, mientras que el extremo superior de la otra tira debe pegarse en el centro del otro lado del rectangulo, como se muestra en la figura 7.2. Este instrumento se parecerá a un electroscopio más grande, con una tira de papel de seda a cada lado. Está aislado del suelo por las pajitas de plástico.

Raspe una pajita electrizada sobre el borde superior del rectángulo. Las tiras de ambos lados se levantan, figura 7.3. El rectángulo también se puede electrizar tocando su borde superior con el colector de carga de un electroforo electrizado.

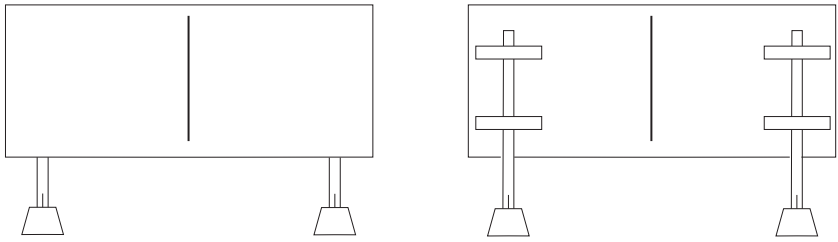


Figura 7.2: (a) Rectángulo de papel visto desde delante. (b) Vista trasera.

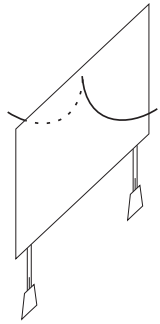


Figura 7.3: Rectángulo electrizado.

Este proceso de carga puede repetirse varias veces. Cuanto más electrizado esté el rectángulo, mayor será el ángulo de elevación de sus tiras.

Experimento 7.3 — *Plegar un rectángulo electrizado*

Llamemos A a un lado del rectángulo y B al otro lado. Sujete el electroscopio del experimento 7.2 por sus pajitas de plástico o por las bases hechas con tazas de café, yeso y tensores de papel, sin tocar el papel rectangular. Entonces se deforma en forma de carcasa cilíndrica.[1] Cuando cerramos el círculo, la tira interior del lado B desciende, mientras que la tira exterior del lado A asciende, figura 7.4 (a). Cuando cerramos el círculo, la tira interior desciende. Además, la tira exterior es más alta en esta configuración de la figura 7.4 (a) que las tiras de ambos lados de la figura 7.3.

Abra la carcasa cilíndrica para volver al rectángulo. Cree otra carcasa cilíndrica doblando el rectángulo hacia el otro lado. La tira de papel de seda del lado B, que estaba hacia abajo en la figura 7.4 (a), ahora está levantada y se encuentra en el lado exterior del nuevo círculo, figura 7.4 (b). La tira de papel de seda del lado A, que estaba hacia arriba en la figura 7.4 (a), ahora está hacia abajo, situada dentro del nuevo círculo, figura 7.4 (b).

[1] [FM91, pp. 74–75], [Fersdb, Gaiola de Faraday, p. 45] y [FR08, pp. 89–90].

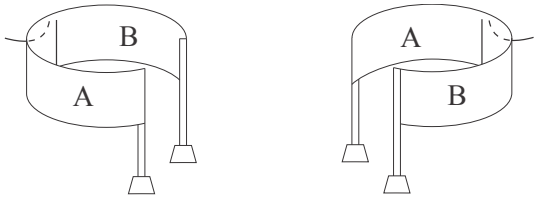


Figura 7.4: Carcasa cilíndrica electrizada. (a) y (b): las tiras interiores bajan, mientras que las tiras exteriores suben.

Experimento 7.4 — *Separar las dos partes de un conductor electrizado*

Un experimento similar utiliza un instrumento compuesto por dos partes independientes que pueden separarse entre sí.[2] La primera parte de este instrumento es un simple electroscopio compuesto por un cartón rectangular conectado a dos pajitas de plástico fijadas en dos soportes adecuados. Se pegan dos finas tiras de papel de seda a este electroscopio, una a cada lado, como se muestra en la figura 7.2. La segunda parte de este instrumento es una carcasa cilíndrica de papel o cartón fino. Las pajitas y los cartones de ambas partes deben tener la misma altura. Esta carcasa cilíndrica también está conectada a dos pajitas fijadas en soportes adecuados. Al principio, los bordes de ambas partes se tocan. Las tiras de papel de seda de ambos lados del electroscopio deben estar hacia abajo.

Electrice el sistema raspando el borde superior del electroscopio con una pajita frotada. El sistema también se puede cargar tocando el cartón con un electroforo electrizado. Con este procedimiento, la tira de papel de seda externa se eleva, mientras que la tira de papel de seda interna permanece hacia abajo, figura 7.5 (a).

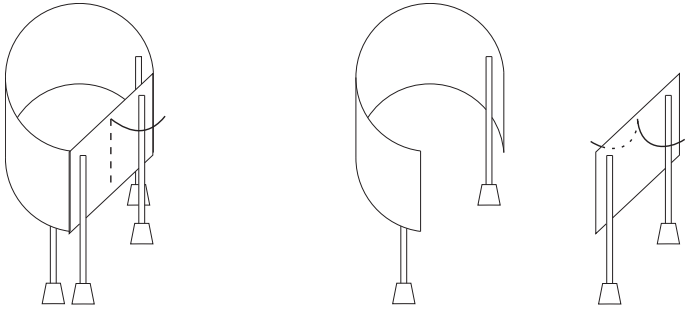


Figura 7.5: (a) Sistema electrizado con las dos cajas en contacto entre sí. Solo se eleva la tira de papel de seda exterior. (b) Cuando las dos partes se separan, la tira exterior desciende ligeramente, mientras que la tira interior se eleva.

[2] [Fer78, section 4.10.9, pp. 89–90].

Separe las dos partes de este instrumento sujetando únicamente los soportes o las pajitas, sin tocar los cartones. La tira externa desciende ligeramente, mientras que la tira interna de la figura 7.5 (a) asciende, tal y como se muestra en la figura 7.5 (b).

7.1.2 La recogida de cargas situadas en las paredes internas y externas de un conductor electrizado

Los experimentos anteriores solo analizaron el comportamiento de finas tiras de papel de seda. Los siguientes experimentos muestran cómo recoger directamente una parte de las partículas electrizadas distribuidas por las paredes internas y externas de una carcasa cilíndrica electrizada.

Experimento 7.5 — *Intentar recoger cargas en la pared interna de una carcasa cilíndrica electrizada*

Ahora utilice la carcasa cilíndrica del experimento 7.1 sin las tiras internas y con una sola tira de papel de seda externa. Este cilindro está aislado del suelo por la pajita de plástico. Raspe una pajita cargada negativamente por su borde superior, hasta que se levante la tira de papel de seda, figura 7.6 (a). La carcasa se carga negativamente.

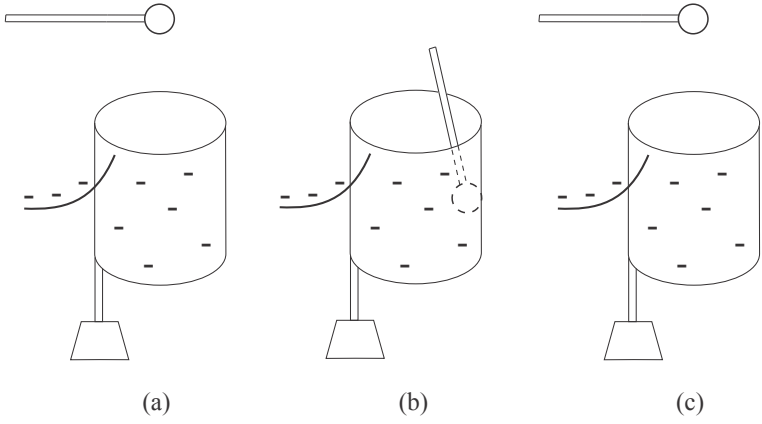


Figura 7.6: (a) Un colector descargado y una carcasa cilíndrica cargada negativamente. (b) Toque la bola de papel de aluminio en la pared interna de la carcasa cilíndrica. (c) Al retirar el colector de carga, compruebe que permanece descargado.

El colector de carga será una bola de papel de aluminio conectada al extremo de una pajita de plástico, figura 2.15 (b). Este colector debe estar inicialmente descargado, figura 7.6 (a). Sosteniendo el colector por la pajita, toque la bola de papel de aluminio con la pared interna del cilindro electrizado, figura 7.6 (b). Retire el colector y compruebe su electrización. Para ello, acérquelo a un péndulo eléctrico descargado o a un versorio metálico. Observe que el péndulo eléctrico y el versorio metálico no se mueven. Concluimos que el colector no adquirió ninguna carga neta al tocar la pared interna del cilindro electrizado, figura 7.6 (c).

Experimento 7.6 — *Recoger cargas en la pared externa de una carcasa cilíndrica electrizada*

Repita el experimento 7.5 comenzando de nuevo con un colector descargado y una carcasa cilíndrica cargada negativamente, figura 7.7 (a).

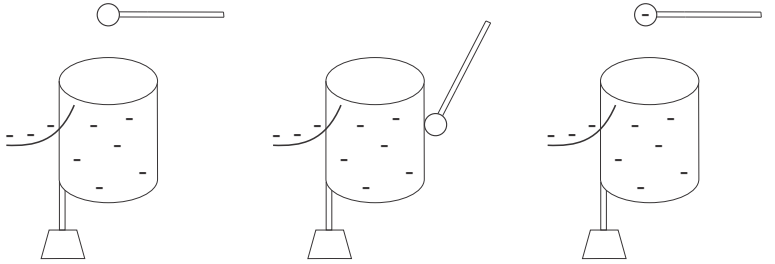


Figura 7.7: (a) Un colector descargado y una carcasa cilíndrica cargada negativamente. (b) Toque la bola de papel de aluminio en la pared externa de la carcasa cilíndrica. (c) Retire el colector de carga y compruebe su carga, verificando que esté cargado negativamente.

Toque la bola de papel de aluminio en la pared *externa* del cilindro electrizado, figura 7.7 (b). Compruebe su carga desplazándola hacia un péndulo neutro o un versorio metálico. El péndulo y el versorio son atraídos por la bola, lo que indica que ahora está electrizada. Acerque la bola electrizada a dos péndulos electrizados separados entre sí, uno positivo y otro negativo. La bola atrae al péndulo positivo y repele al péndulo negativo, lo que demuestra que el colector de carga se electrizó negativamente, figura 7.7 (c).

Experimento 7.7 — *Intentar recoger cargas en la pared interna de una carcasa cilíndrica electrizada utilizando un pequeño electroscopio*

El experimento 7.5 también puede realizarse con otro colector de carga, concretamente un trozo de cartón cuadrado unido a una pajita. El cuadrado pequeño puede tener lados de 5 cm. El extremo superior de una tira fina de papel de seda puede pegarse a este cartón para indicar cuándo está cargado. Este colector se utilizará como un electroscopio habitual, pero esta vez con el extremo superior de la tira de papel de seda pegado en el lado opuesto del cartón, como se muestra en la figura 7.8 (a). Raspe el cartón con una pajita frotada o tóquelo con un electroforo cargado. Este colector está electrizado, como lo indica su tira levantada, figura 7.8 (b).

El colector debe estar inicialmente descargado, con su tira de papel de seda en posición vertical. Repita el experimento con una carcasa cilíndrica cargada negativamente, figura 7.9 (a).

Mientras sujeta el colector por la pajita, toque un borde del cartón en la pared interna de la carcasa cilíndrica electrizada, figura 7.9 (b). La tira del colector permanece hacia abajo. Permanece unida al cartón cuando el colector de carga sale de la carcasa,

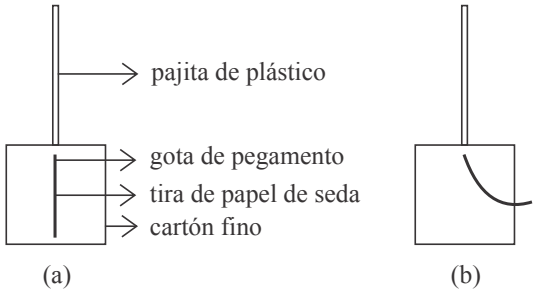


Figura 7.8: (a) Colector descargado. (b) Colector electrizado.

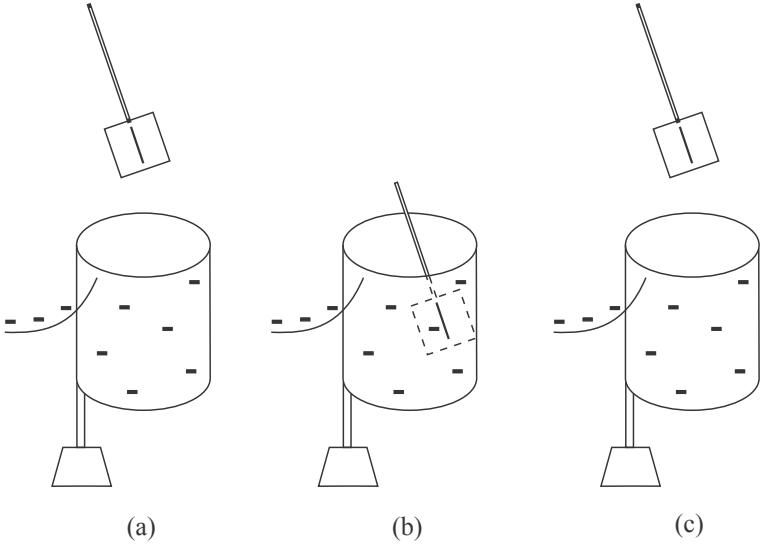


Figura 7.9: (a) Un colector descargado y una carcasa cilíndrica cargada negativamente. (b) Toque el borde del cartón en la pared interna de la carcasa cilíndrica cargada. (b) Al retirar el colector de carga, compruebe que permanece descargado.

figura 7.9 (c). Esto indica que el colector de carga permanece descargado.

Experimento 7.8 — *Recoger cargas en la pared externa de una carcasa cilíndrica electrizada mediante un pequeño electroscopio*

Repita el experimento 7.7 con un colector descargado y una carcasa cilíndrica cargada negativamente, figura 7.10 (a).

Toque un borde del cartón en la pared externa de la carcasa cilíndrica electrizada. La tira del colector se levanta, figura 7.10 (b). Observe que, a veces, la tira externa del electroscopio cargado desciende ligeramente. Cuando se retira el colector, su tira permanece levantada. Puede comprobar su carga acercándolo a un péndulo con carga positiva y, a continuación, a un péndulo con carga negativa. Atrae al péndulo positivo

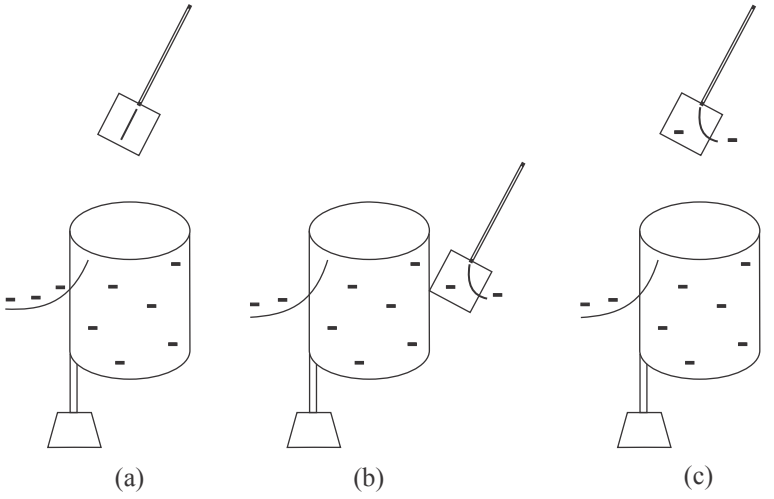


Figura 7.10: (a) Un colector descargado y una carcasa cilíndrica cargada negativamente. (b) Toque el borde del cartón en la pared externa de la carcasa cilíndrica cargada. (c) Al retirar el colector de carga, compruebe que ahora está cargado negativamente.

y repele al péndulo negativo, lo que demuestra que el colector tiene carga negativa, figura 7.10 (c).

7.1.3 Gray, Franklin y la distribución de cargas en conductores electrizados

Los experimentos descritos en las subsecciones 7.1.1 y 7.1.2 muestran que, en un conductor hueco electrizado, las cargas solo se distribuyen por su superficie *externa*. Stephen Gray fue el primer científico en llegar a esta conclusión, en 1731, cuando realizó otro tipo de experimento.[3] Colgó dos cubos de roble en los extremos de un cordón conductor (su línea de comunicación). Eran del mismo tamaño, pero uno era hueco y el otro macizo. El cordón estaba aislado del suelo, suspendido por cordones hechos de cabello. Se colocaron finas hojas de latón debajo de los cubos. Acercó un tubo de vidrio electrizado al centro del cordón conductor y observó que los dos cubos atraían la misma cantidad de hojas a la misma altura, como se ilustra en la figura 7.11.

A continuación presentamos las palabras de Gray describiendo su experiencia (nuestros comentarios están entre corchetes y pusimos en cursiva su conclusión):[4,5]

[3] Sección B.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[4] [Gra32d, p. 35], [Bos11, pp. 160–161] y [BAC12, pp. 154–155].

[5] *Some Time after, at Mr.* Wheler*'s, we made the following Experiment, in order to try whether the* Electrick Attraction *be proportional to the Quantity of Matter in Bodies.*

There were made two Cubes of Oak, of about six Inches Square [15 cm × 15 cm], the one solid, the other hollow: These were suspended by two Hair-Lines, nearly after the same Manner as in the Experiment above-mentioned; the Distance of the Cubes from each other, was by Estimation, about fourteen or fifteen Feet [4.6 m]; the Line of Communication being tied to each Hair-Line, and the Leaf-Brass placed under the

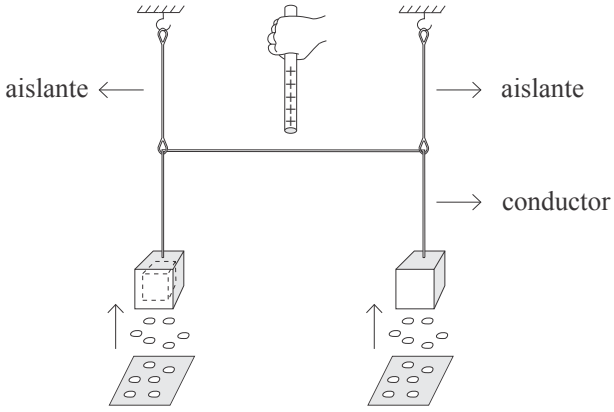


Figura 7.11: Dos cubos de roble, uno hueco y otro macizo, atraen las hojas de latón con la misma intensidad.

> *Poco después, en casa del Sr.* Wheler*, realizamos el siguiente experimento para comprobar si la* atracción eléctrica *era proporcional a la cantidad de materia contenida en los cuerpos.*
>
> Fabricamos dos cubos de roble de aproximadamente seis pulgadas cuadradas [15 cm × 15 cm], uno macizo y otro hueco. Estos se suspendieron de dos cordones hechos de cabello, casi de la misma manera que en el experimento mencionado anteriormente. La distancia entre los cubos era, según nuestras estimaciones, de unos catorce o quince pies [4.6 m]; con la línea de comunicación atada a cada línea y la hoja de latón colocada debajo de los cubos, se frotó el tubo [de vidrio] y se mantuvo sobre el centro de la línea [de comunicación], lo más cerca posible y a igual distancia de los cubos, cuando ambos atrajeron y repelieron la hoja de latón al mismo tiempo y a la misma altura; *de modo que parecía no haber más atracción en el cubo lleno que en el cubo hueco; sin embargo, me inclino a pensar que los efluvios eléctricos atraviesan todas las partes interiores del cubo lleno, aunque ninguna parte, salvo la superficie, atraiga*; pues varios experimentos demuestran que si otro cuerpo toca al que atrae, su atracción cesa hasta que se retira ese cuerpo y el otro vuelve a ser excitado por el tubo.

Benjamin Franklin fue el primer científico en realizar, alrededor de 1755, un experimento similar a los experimentos 7.5 y 7.7, aunque no fue capaz de explicar sus conclusiones (nuestros comentarios entre corchetes):[6,7]

Cubes, the [glass] Tube was rubbed and held over the Middle of the [communication] Line, and as near as could be guessed, at equal Distances from the Cubes, when both of them attracted and repelled the Leaf-Brass at the same Time, and to the same Hight; *so that it seemed to be no more Attraction in the solid than in the hollow Cube; yet I am apt to think that the Electrick Effluvia pass through all the interior Parts of the solid Cube, though no Part but the Surface attracts*; for from several Experiments it appears, that if any other Body touches that which attracts, its Attraction ceases till that Body be removed, and the other be again excited by the Tube.

[6] [Fra69, Letter XXIV, p. 334] y [Hei99, p. 464].

[7] I electrified a silver pint cann, on an electric stand [that is, on an insulating stand], and then lowered into it a cork-ball, of about an inch diameter, hanging by a silk string, till the cork touched the bottom of

> Electricé un recipiente de plata de una pinta, colocado sobre un soporte eléctrico [es decir, sobre un soporte aislante], y luego bajé una bola de corcho de aproximadamente una pulgada [2.5 cm] de diámetro, suspendida de un hilo de seda, hasta que el corcho tocó el fondo del recipiente. El corcho no fue atraído hacia el interior de la lata como lo habría sido hacia el exterior, y aunque tocó el fondo, cuando se retiró, no estaba electrizado por ese contacto, como lo habría estado si hubiera tocado el exterior. Este hecho es singular. Me preguntan la razón; yo la ignoro.

En 1775, Joseph Priestley (1733–1804) utilizó el experimento de Franklin para concluir que la atracción eléctrica varía como la inversa del cuadrado de la distancia entre los cuerpos en interacción, por analogía con lo que ocurre con la atracción gravitatoria:[8,9]

> ¿No podemos deducir de este experimento que la atracción eléctrica obedece a las mismas leyes que la gravedad y que, por lo tanto, es proporcional al cuadrado de la distancia, ya que es fácil demostrar que si la Tierra tuviera forma de concha, un cuerpo situado en su interior no sería atraído más por un lado que por el otro?

Priestley se refería aquí a dos famosos teoremas de Isaac Newton (1642–1727), figura 7.12.

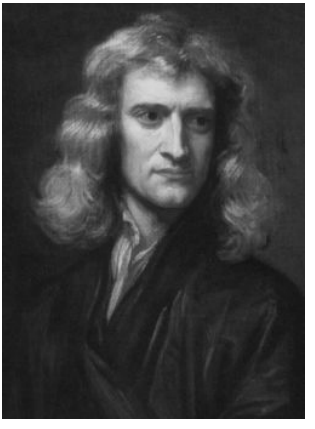


Figura 7.12: Isaac Newton (1642–1727). Se trata del retrato más famoso de Newton. Fue realizado por Godfrey Kneller (1646–1723) en 1689. Newton aparece con el cabello natural, en la cima de su carrera científica, dos años después de la publicación de los *Principia*.

---

the cann. The cork was not attracted to the inside of the cann as it would have been to the outside, and though it touched the bottom, yet, when drawn out, it was not found to be electrified by that touch, as it would have been by touching the outside. The fact is singular. You require the reason; I do not know it.

[8] [Pri75, pp. 372–374], [Pri66, pp. 372–374], [Whi73a, pp. 53–54] y [Hei99, p. 464].

[9] May we not infer from this experiment that the attraction of electricity is subject to the same laws with that of gravitation, and is therefore according to the squares of the distances; since it is easily demonstrated that were the earth in the form of a shell, a body in the inside of it would not be attracted to one side more than another.

Estos teoremas se incluyeron en la sección XII del libro I de su famosa obra, conocida por su nombre latino, *Principia*. Utilizaremos la traducción al castellano, realizada por Eloy Rada García, *Principios matemáticos de la filosofía natural*:[10]

Sección XII
DE LAS FUERZAS ATRACTIVAS DE CUERPOS ESFÉRICOS

PROPOSICIÓN LXX. TEOREMA XXX

Si hacia cada punto de una superficie esférica se dirigiesen fuerzas centrípetas iguales y decrecientes en razón del cuadrado de la distancia desde dichos puntos: digo que un corpúsculo situado en el interior de dicha superficie no es atraído hacia ningún lado por tales fuerzas. [...]

PROPOSICIÓN LXXI. TEOREMA XXXI

Con los mismos supuestos, digo que un corpúsculo situado fuera de una superficie esférica es atraído hacia el centro de la esfera con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de su distancia al centro de la esfera.

Los teoremas de Newton son válidos para una carcasa esférica. No son válidos para una carcasa cilíndrica con una densidad de masa superficial uniforme. Franklin, por otro lado, demostró que una caja electrizada no ejerce ninguna fuerza sobre una bola de corcho neutra colocada en cualquier lugar dentro de la caja. Existe una diferencia entre las configuraciones gravitacionales y eléctricas. En una caja conductora, las partículas electrizadas pueden moverse libremente. En equilibrio, se organizan de tal manera que todas las partes de la caja electrizada adquieren el mismo potencial electrostático. En esta configuración de equilibrio, la densidad de carga superficial varía de un punto a otro. Además, en equilibrio, la caja conductora electrizada no polarizará un conductor neutro colocado en cualquier lugar dentro de la caja, excepto cerca de su tapa abierta. Como el conductor interno no está polarizado por la caja electrizada, no será atraído hacia ningún lado de la caja, incluso si se acerca a ella.

7.1.4 Conductores electrizados que tocan las paredes internas y externas de otro conductor

En los experimentos 7.5 a 7.8, comenzamos con una carcasa cilíndrica electrizada y un colector descargado. Invierta este procedimiento. Comience con un colector electrizado que tocará una carcasa cilíndrica inicialmente descargada.

Experimento 7.9 — *Electrizar una carcasa cilíndrica al tocar su pared interna con un colector de carga electrizado*

Utilice la carcasa cilíndrica del experimento 7.1 sin tiras internas y con una sola tira de papel de seda externa. El cilindro está aislado del suelo por la pajita de plástico. También se puede aislar colocándolo sobre una placa de poliestireno. Inicialmente

[10] [New16], [New34, p. 193], [New90, p. 221], [Ass13, pp. 9–10] y [Ass14, pp. 10–11].

debe estar descargado, con la tira de papel de seda en posición vertical. Utilice un colector de carga compuesto por una carcasa esférica conductora conectada a un mango aislante, como se muestra en la figura 2.15 (b). En particular, suponga una bola de papel de aluminio en el extremo de una pajita. Se utilizará como colector de carga de un electroforo, cargándose mediante el procedimiento ilustrado en la figura 6.4. Es decir, una placa aislante rectangular se electriza inicialmente frotándola con una toalla de papel o un paño de algodón. Sujete el colector de carga por su mango, toque la parte inferior de la bola de aluminio sobre la placa electrizada, coloque un dedo sobre la parte superior de la bola, retire el dedo y, por último, retire la bola levantando el mango. El colector de carga quedará entonces electrizado. Esto se puede comprobar acercándolo a un péndulo eléctrico descargado y observando la atracción del disco del péndulo.

Sujete el colector de carga electrizado por su mango. Toque la bola de aluminio electrizada en la pared interna de la carcasa cilíndrica. Repita este procedimiento varias veces, electrizando siempre el colector del electroforo antes de cada contacto. Observe que la tira de papel de seda externa de la carcasa cilíndrica se levanta poco a poco con cada contacto con la bola electrizada. Al analizar la carga del cilindro, concluya que se electriza con una carga del mismo signo que la de la bola. Este hecho se puede visualizar cuando la bola del colector de carga se electriza de nuevo y se acerca a la tira externa levantada. Observe su repulsión.

Electrice de nuevo la bola del colector de carga. Toque de nuevo la pared interna del cilindro electrizado. Retire la bola y compruebe su carga cuando se acerque a un péndulo eléctrico descargado. Observe que no hay atracción entre ellos, lo que indica que la bola *se descargó completamente* al tocar la pared interna del cilindro. Tanto si el cilindro está completamente descargado como si tiene una carga inicial, la bola electrizada se descarga por completo cuando toca la pared interna de la carcasa cilíndrica, figura 7.13.

Experimento 7.10 — *Acercar una bola neutra o electrizada a la tira externa de una carcasa cilíndrica*

Observe otros hechos en el experimento 7.9. Supongamos que la carcasa cilíndrica está descargada. Electrice el colector de carga del electroforo. Acerque la bola electrizada del colector a la tira de papel de seda externa de la carcasa cilíndrica, sin que entren en contacto. Observe que la tira de papel de seda es atraída por la bola electrizada. Esta atracción se debe a la polarización de la carcasa cilíndrica producida por la presencia de la bola electrizada en las proximidades.

Repita el experimento 7.9 electrizando la carcasa cilíndrica. Con este fin, toque la bola electrizada en la pared interna de la carcasa, repitiendo este procedimiento varias veces hasta que la carcasa esté suficientemente electrizada, como lo indica su tira levantada.

Electrice de nuevo la bola del colector de carga del electroforo y acérquela a la tira levantada. Observe en este caso una repulsión de la tira. Esta repulsión indica que la bola y la tira están electrizadas con cargas del mismo signo.

Toque de nuevo la bola electrizada en la pared interna del cilindro electrizado. Este procedimiento descarga totalmente la bola, como se ve en el experimento 7.9. Retire la bola descargada y acérquela a la tira levantada, sin que entren en contacto.

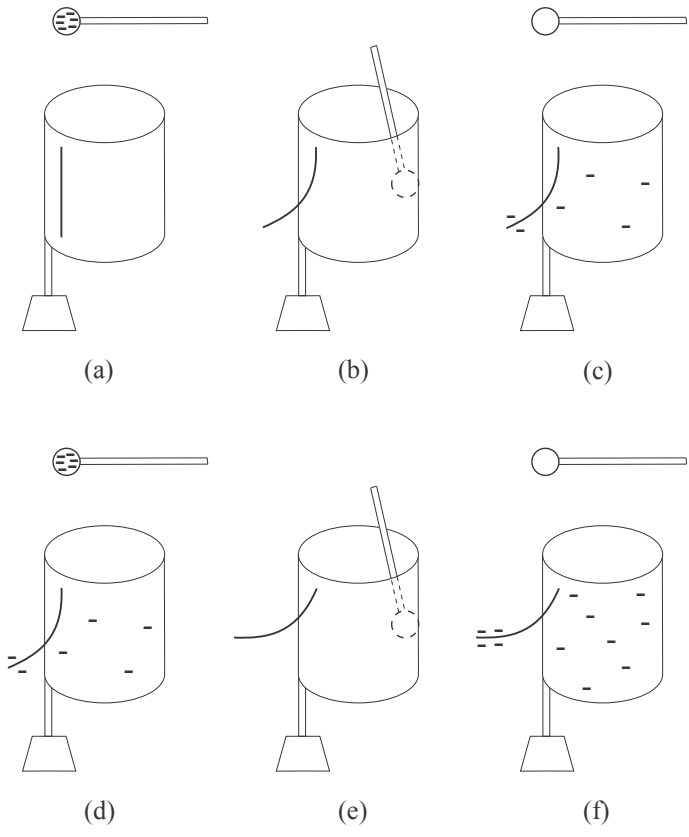


Figura 7.13: (a) Cilindro descargado y colector electrizado. (b) Toque el colector cargado en la pared interna del cilindro. Este procedimiento puede repetirse varias veces. (c) a (f): El colector siempre se descarga completamente después de cada contacto, mientras que el cilindro se electriza cada vez más.

Observe de nuevo cómo la tira es atraída por la bola. Esta vez, la atracción se debe a la polarización de la bola conductora causada por la electrización del cilindro y su tira levantada. La bola está aislada del suelo por su mango.

Experimento 7.11 — *Carcasa cilíndrica con tiras internas y externas*

El experimento 7.9 también se puede realizar cuando la carcasa cilíndrica tiene tiras finas de papel de seda en el interior y el exterior. Comience con una carcasa descargada con tiras verticales. En este caso, cuando la bola electrizada de papel de aluminio entra en la carcasa cilíndrica, la tira interna es atraída por ella. Deje que entren en contacto y luego sepárelas. Observe que la tira interna cae después de este contacto. Cuando vuelve a estar vertical, ya no es atraída hacia la bola que acaba de tocar. Retire el colector de carga. Compruebe su electrización. Concluya que se descargó completamente cuando la tira interna fue tocada por la bola.

Repita este procedimiento varias veces. Las tiras internas siempre son atraídas, tocan la bola electrizada y caen. Las tiras externas, por el contrario, se inclinan cada vez más con respecto a la superficie externa de la carcasa. Además, cada vez que comprobamos la electrización de la bola después de su contacto con la tira interna, concluimos que se descarga completamente.

Experimento 7.12 — *Electrizar una carcasa cilíndrica al tocar su pared externa con un colector de carga electrizado*

Realice una variante del experimento 7.9. Esta vez, la bola electrizada de papel de aluminio solo toca la pared externa de la carcasa cilíndrica. Después de cada contacto, la bola vuelve a electrizarse mediante el electroforo. Observe que la tira externa de papel de seda se levanta cada vez más después de cada contacto. La tira interna, por el contrario, permanece siempre vertical, independientemente del número de veces que la bola electrizada toque el cilindro. Compruebe también la electrización de la bola después de cada contacto con la pared externa del cilindro. Observe que siempre permanece ligeramente cargada. Este hecho puede verificarse cuando se acerca esta bola a otro electroscopio descargado. Observe que atrae su tira de papel de seda. Este hecho también se puede verificar cuando esta bola se acerca a la tira externa del cilindro electrizado que acaba de tocar. Observe que esta tira levantada es repelida por la bola, lo que indica que no se descargó completamente cuando tocó la pared externa. La carcasa cilíndrica, por el contrario, se electriza cada vez más con cada contacto con la bola electrizada, figura 7.14.

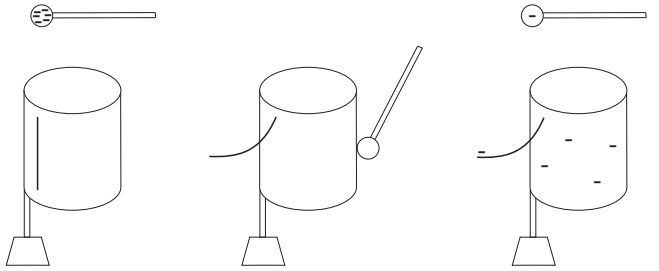


Figura 7.14: (a) Cilindro descargado y colector electrizado. (b) El colector toca la pared externa del cilindro. (c) El colector pierde parte de su carga, mientras que el cilindro se electriza ligeramente.

Experimento 7.13 — *Repetir estos experimentos con un pequeño electroscopio*

Los experimentos 7.9 y 7.12 pueden repetirse utilizando el colector de carga del experimento 7.7, figura 7.8. Este colector debe estar inicialmente electrizado, como indica su tira levantada.

Sujete el colector de carga electrizado por su mango y toque un borde del cartón en la pared interna de una carcasa cilíndrica inicialmente descargada. El colector se des-

carga inmediatamente, como indica su tira vertical. La tira externa del cilindro, por el contrario, se eleva ligeramente. Repita este proceso varias veces, electrizando siempre el colector antes de cada contacto. Entonces es posible electrizar considerablemente el cilindro, como indica su tira cada vez más alta. Cada vez que el colector electrizado toca la pared interna del cilindro, pierde casi toda su carga. A veces, su tira permanece ligeramente inclinada con respecto al cartón, lo que indica que no perdió toda su carga. Solo perdería completamente toda su carga si el cilindro estuviera completamente cerrado, con las tapas inferior y superior. Dado que al menos una de estas tapas debe estar ausente para permitir el paso del colector, este a veces conserva una pequeña parte de su carga incluso después de tocar la pared interna del cilindro. Pero incluso en este caso, se observa que perderá casi toda su electrización, independientemente de la cantidad de carga ya adquirida por la carcasa cilíndrica electrizada.

Supongamos ahora que el colector de carga electrizado toca la pared externa de una carcasa cilíndrica aislada inicialmente neutra. La tira del colector de carga se baja ligeramente, permaneciendo inclinada con respecto a su cartón. La tira externa del cilindro se eleva ligeramente con respecto a la carcasa cilíndrica. Repita este procedimiento varias veces, cargando siempre el colector antes de cada contacto. La tira externa de la carcasa cilíndrica se eleva poco a poco. La tira del colector de carga nunca desciende completamente después de cada contacto, permaneciendo siempre ligeramente inclinada con respecto a su cartón.

Después de una cierta electrización del cilindro, se alcanza un punto de saturación. Toque la pared externa del cilindro electrizado con el colector cargado. Observe que no ocurre nada. En otras palabras, el colector de carga permanece electrizado y la tira levantada del cilindro no cambia su ángulo de inclinación con respecto al cilindro. Ya no hay intercambio de cargas entre estos dos conductores electrizados, ya que ambas tiras mantienen sus ángulos de inclinación con respecto a sus cartones.

7.1.5 La distribución de cargas en conductores abiertos y cerrados

Las experiencias anteriores indican que, en un conductor curvado, las cargas se encuentran en el exterior, tal y como indica la inclinación de las tiras de la figura 7.4. Además, dado que las tiras externas de la figura 7.4 son más altas que las dos tiras de la figura 7.3, concluimos que las cargas que se encontraban en un lado del rectángulo se desplazaron al otro lado cuando lo deformamos en una carcasa cilíndrica.

La figura 7.15 (a) ilustra una distribución cualitativa de las cargas sobre el cartón rectangular de la figura 7.3 visto desde arriba.

La letra c designa al conductor, es decir, el cartón. Exageramos su grosor para indicar la distribución de las cargas en su superficie externa. Cuando adopta la forma de una carcasa cilíndrica, como en la figura 7.4, las cargas que se encontraban en un lado del rectángulo fluyen hacia el otro lado. Cuando el sistema alcanza un nuevo estado de equilibrio, ya no hay cargas dentro de la carcasa cilíndrica, todas las cargas se encuentran en el exterior, figura 7.15 (b).

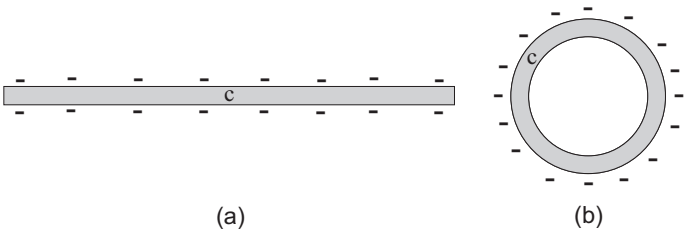


Figura 7.15: (a) Representación cualitativa de la distribución de cargas sobre el cartón rectangular de la figura 7.3 vista desde arriba. (b) Distribución de cargas sobre la carcasa cilíndrica de la figura 7.4 vista desde arriba.

7.2 Cargas inducidas en las paredes internas y externas de un conductor hueco

Experimento 7.14 — *Regla electrizada dentro de una carcasa cilíndrica*

Utilice una carcasa cilíndrica conductora recubierta en el exterior con finas tiras de papel de seda. El cilindro queda aislado del suelo cuando se coloca sobre pajitas de plástico o sobre un plato de poliestireno. Inicialmente debe estar descargado, con las tiras en posición vertical, figura 7.16 (a).

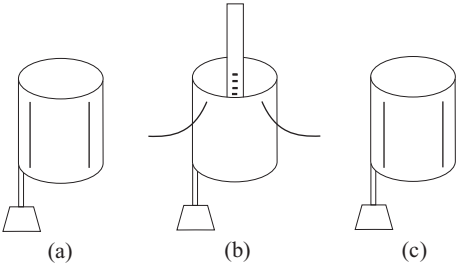


Figura 7.16: (a) Carcasa cilíndrica descargada y aislada. (b) Cuando se coloca una regla electrizada dentro de la carcasa, sin tocarla, las tiras se levantan. (c) Cuando se retira la regla electrizada, las tiras vuelven a caer.

Cargue negativamente una regla de plástico frotándola con el cabello o una toalla de papel. Introdúzcala en la carcasa cilíndrica sin que toque las paredes. Las tiras se alejan del cilindro, figura 7.16 (b). Cuando la regla sale, las tiras recuperan su orientación vertical inicial a lo largo de la carcasa cilíndrica, figura 7.16 (c).

Repita este experimento. Esta vez, mientras la regla electrizada se encuentra dentro del cilindro, acerque una segunda regla electrizada negativamente a una de las tiras levantadas, sin que entren en contacto. Observe que la tira levantada es repelida por la regla electrizada, ya que tiende a alejarse de ella, inclinándose hacia el cilindro, figura 7.17 (a). Por el contrario, cuando una regla cargada positivamente se acerca a esta tira, observe su atracción, figura 7.17 (b).

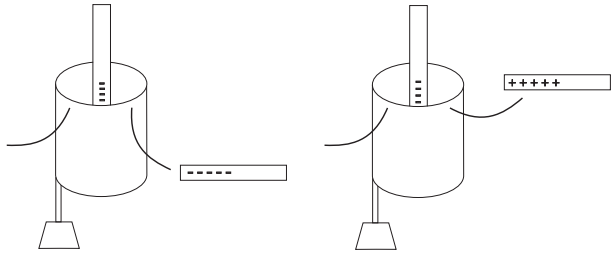


Figura 7.17: (a) Tira repelida por una regla con carga negativa. (b) Tira atraída por una regla con carga positiva.

Este experimento ilustra la polarización eléctrica. La carcasa cilíndrica está aislada del suelo. Cuando la regla negativa penetra en el interior, la pared interna del cilindro se carga positivamente, mientras que la pared externa se carga negativamente.

Experimento 7.15 — *Poner a tierra la carcasa cilíndrica con la regla eléctrica en su interior*

Repita el experimento 7.14. La figura 7.18 (a) muestra una carcasa cilíndrica descargada aislada del suelo.

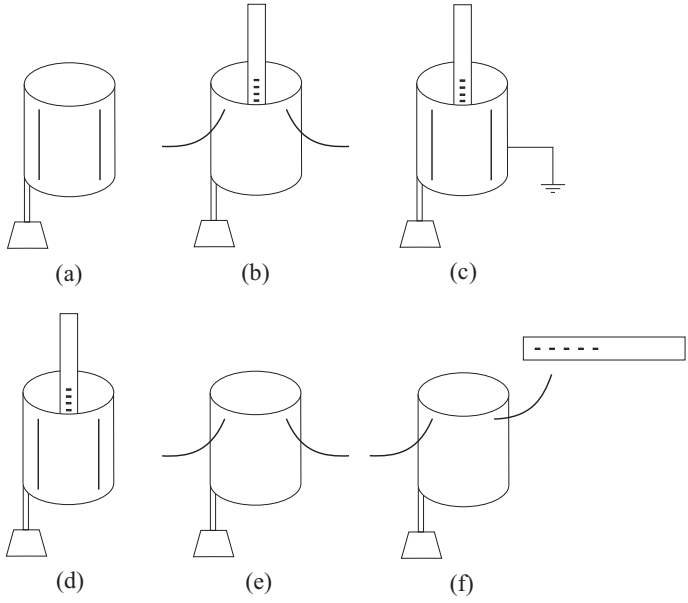


Figura 7.18: Electrización de la carcasa cilíndrica por inducción.

La figura 7.18 (b) muestra el comportamiento de las tiras cuando una regla ne-

gativa penetra en el interior de la carcasa. En esta ocasión, cuando la regla cargada negativamente se encuentra dentro del cilindro, conecte la carcasa a tierra. Sus tiras caen, figura 7.18 (c). Retire la conexión a tierra mientras la regla cargada permanece dentro del cilindro. Sus tiras permanecen abajo, figura 7.18 (d). Al retirar la regla, las tiras suben, permaneciendo inclinadas con respecto al cilindro, figura 7.18 (e). Acerque la regla cargada negativamente al cilindro. Atrae las tiras, figura 7.18 (f).

Este experimento ilustra la electrización por inducción. Al final de este procedimiento, el cilindro se electriza con una carga de signo opuesto al de la regla. Cuando la regla con carga negativa penetra en el cilindro, se produce una polarización de sus cargas. En concreto, la pared interna se electriza positivamente, mientras que la pared externa se electriza negativamente, figura 7.19 (a).

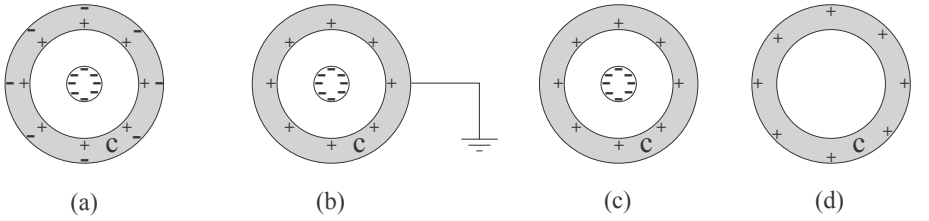


Figura 7.19: (a) Conductor hueco c aislado del suelo y polarizado debido a la presencia de un cuerpo cargado negativamente en su interior. (b) Conductor conectado a tierra con neutralización de su pared externa. (c) La distribución de las cargas no cambia cuando se elimina la conexión a tierra. (d) Cuando se retira el cuerpo interno, se produce una redistribución de las cargas. Ahora se encuentran únicamente en la pared externa.

Al conectar la carcasa a tierra, neutralizamos la electricidad de la pared externa. La pared interna permanece cargada positivamente debido a la atracción ejercida por las cargas negativas de la regla, figura 7.19 (b). Cuando se elimina la conexión a tierra, no cambia nada en la distribución de las cargas, figura 7.19 (c). Al retirar la regla, se produce una redistribución de las cargas en el cilindro. Las cargas positivas ahora solo se distribuyen en su pared externa, figura 7.19 (d).

7.3 Acciones ejercidas por un conductor hueco electrizado sobre cuerpos internos y externos

Experimento 7.16 — *Acción de una carcasa cilíndrica electrizada sobre un péndulo eléctrico interno*

Comience con una carcasa cilíndrica conductora aislada del suelo mediante pajitas o cuando esté sostenida por una placa aislante. Inicialmente debe estar descargada. La carcasa puede ser de papel o cartón. También puede ser una lata de refresco. El extremo superior de una fina tira de papel de seda se pega a la pared exterior. Utilice también un péndulo eléctrico compuesto por un pequeño disco de papel atado a un hilo de seda. Este péndulo también debe estar inicialmente neutro. A continuación, el

disco del péndulo se coloca dentro de la carcasa cilíndrica, cerca de su pared pero sin tocarla, entre sus bordes superior e inferior, figura 7.20 (a).

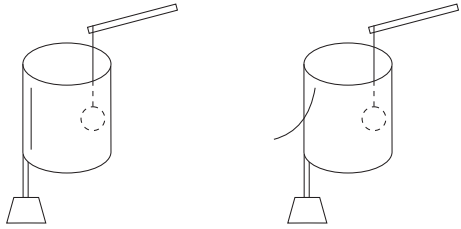


Figura 7.20: (a) Carcasa cilíndrica aislada con un péndulo eléctrico interno. (b) El disco de papel no se ve afectado cuando la carcasa cilíndrica se electriza.

El péndulo eléctrico debe permanecer dentro de la carcasa, sin tocarla. Electrice la carcasa raspando una pajita en su borde superior. También se puede electrizar tocando su borde superior con un colector de carga electrizado de un electroforo. La electrización de la carcasa se indica mediante su tira levantada. El péndulo interno no se ve afectado por la electrización de la carcasa cilíndrica. En otras palabras, no es atraído ni repelido por su pared, figura 7.20 (b).

Experimento 7.17 — *Acción de una carcasa cilíndrica electrizada sobre un péndulo eléctrico externo*

Repita el experimento 7.16, comenzando esta vez con el péndulo fuera de la carcasa cilíndrica. El disco debe estar cerca de la pared, sin tocarla, figura 7.21 (a).

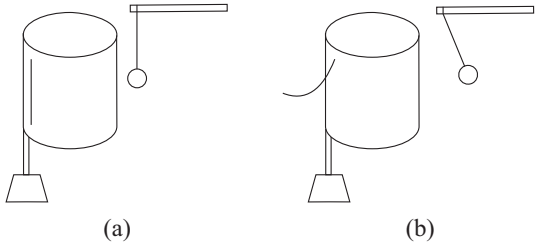


Figura 7.21: (a) Carcasa cilíndrica conductora aislada del suelo con un péndulo eléctrico en el exterior. (b) Cuando la carcasa se electriza, el disco de papel es atraído, toca la carcasa y luego es repelido por el cilindro gracias al mecanismo *ACR*.

Electrice la carcasa raspando un borde superior con una pajita o tocándola con un electroforo electrizado. El disco de papel será atraído por la carcasa. Se desplazará hacia ella y se adherirá a su pared. A veces, se desprende inmediatamente, repelido por la pared electrizada gracias al mecanismo *ACR*. Otras veces, esta repulsión solo se produce cuando la carcasa es electrizada de forma más significativa. Otras veces, es necesario golpear la pajita o soplar suavemente sobre el disco para despegarlo de la

pared. A continuación, observe su repulsión. Normalmente, se puede observar esta repulsión cuando la carcasa cilíndrica está suficientemente electrizada, como se muestra en la figura 7.21 (b).

7.4 El experimento del balde de hielo de Faraday

Michael Faraday (1791–1867) realizó en 1843 un experimento similar al experimento 7.9. Utilizó un balde de hielo metálico de 27 cm de alto y 18 cm de diámetro, aislado del suelo.[11] Su colector de carga era una bola redonda de latón suspendida de un hilo de seda de entre 90 y 120 cm de largo. En la figura 7.22, el balde está representado por la letra A, la bola de latón por la letra B, mientras que el aislamiento del balde y la bola está representado por las letras I. La pared exterior del balde estaba conectada por un hilo conductor a un delicado electrómetro de hoja de oro E.

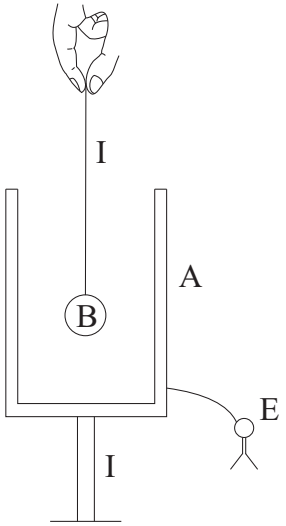


Figura 7.22: El experimento del balde de hielo de Faraday.

Cuando se vació el balde de hielo, las hojas del electroscopio permanecieron en posición vertical. Cuando se introdujo una bola con carga positiva en el balde, sin tocarlo, las hojas del electroscopio se separaron entre sí, lo que indicaba que la pared exterior del balde se había electrizado. Al estudiar la carga del electroscopio, Faraday concluyó que también estaba cargado positivamente. Al retirar la bola electrizada, las hojas del electroscopio se hundieron. Al introducir lentamente la bola electrizada, observó que la divergencia del electroscopio aumentaba hasta que la esfera se encontraba a unos 7.5 cm por debajo de la superficie del balde, manteniéndose con una apertura constante para cualquier depresión mayor. Este hecho indicó a Faraday que toda la acción inductiva de la esfera se ejercía sobre la pared interna del balde y no sobre los objetos externos. Cuando la bola electrizada tocaba el fondo del balde,

[11] [Far43b].

observaba que la esfera se descargaba por completo. De ello dedujo que la carga inducida por la bola electrizada en el exterior del balde tenía el mismo valor y el mismo signo que la carga inicialmente presente en la bola. Del mismo modo, la carga inducida en la pared interna del balde tenía la misma intensidad que la de la bola, pero con signo opuesto. Cuando la bola electrizada tocaba el fondo del recipiente, se producía una neutralización entre las cargas de la bola y las situadas en la pared interna del recipiente.

Sustituyó la bola de bronce por trozos electrizados de goma laca, un material aislante. Estos actuaban exactamente igual que los soportes metálicos, produciendo los mismos efectos. Solo había una excepción, y es que su carga no se transmitía al recipiente metálico cuando entraban en contacto entre sí.

Además, observó que la bola metálica electrizada interna podía colocarse cerca de cualquier lado del recipiente sin afectar a la divergencia del electroscopio. Este hecho indicó a Faraday que la distribución de las cargas en la pared externa del balde no se veía afectada por la posición del cuerpo electrizado en su interior. Esta conclusión se ilustra en la figura 7.23.

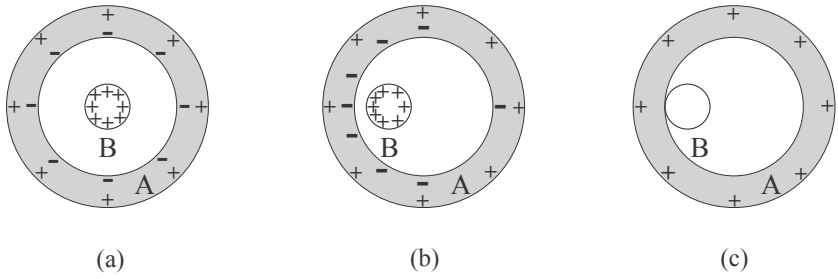


Figura 7.23: (a) Balde aislado polarizado debido a la presencia de un cuerpo electrizado en su centro. Las cargas distribuidas en las paredes interna y externa del balde tienen la misma intensidad que la de B. (b) Redistribución de las cargas distribuidas en la pared interna del balde cuando B está cerca de uno de sus lados. (c) Cuando B toca el balde, se produce una neutralización entre su carga y las distribuidas por la pared interna del balde.

La figura 7.23 (a) muestra un cuerpo con carga positiva B en el centro de un balde aislado A. Las cargas inducidas en el balde se distribuyen simétricamente entre las paredes internas y externas. La figura 7.23 (b) muestra B más cerca de un lado del balde. En este caso, se produce una redistribución de las cargas únicamente en la pared interna. Las cargas de la pared externa no se ven afectadas. En esta figura también representamos la redistribución de las cargas en el conductor B. La figura 7.23 (c) ilustra la neutralización que se produce cuando B toca el balde. Sus cargas se neutralizan por las cargas iguales y opuestas que se distribuyeron por la pared interna del balde de hielo. Una vez más, las cargas de la pared externa no se ven afectadas.

James Clerk Maxwell (1831–1879), Joseph John Thomson (1856–1940) y James H. Jeans (1877–1946) utilizaron este experimento para cuantificar el concepto de carga.[12]

[12] [Max54a, artículos 27–36, pp. 32–41], [Tho21, pp. 5–6] y [Jea27, pp. 7–10].

El ángulo de apertura de las hojas del electroscopio sería un indicador de la cantidad de carga del cuerpo situado dentro del balde. Supongamos que el cuerpo A produce un ángulo de apertura θ_A cuando está solo dentro del balde. Supongamos que el cuerpo B produce un ángulo de apertura θ_B cuando está solo dentro del balde. Cuando $\theta_A = \theta_B$, decimos que los cuerpos A y B tienen cargas de la misma magnitud. Dos cuerpos tendrían cargas iguales y opuestas si, al introducirlos simultáneamente en el balde, no produjeran ninguna divergencia en el electroscopio. Siguiendo este procedimiento, también podríamos definir cargas positivas y negativas, así como múltiplos de cualquier carga. Por ejemplo, supongamos que un cuerpo C produce un ángulo de apertura θ_C cuando está solo dentro del balde. Si θ_C es igual al ángulo de apertura del electroscopio cuando solo A y B se encuentran juntos en el balde, y A y B tienen cargas de igual magnitud y signo, se dice que la carga de C es dos veces mayor que la del cuerpo A. Y así sucesivamente.

Capítulo 8

Blindaje eléctrico

8.1 Colocar un conductor o un aislante entre un cuerpo electrizado y un cuerpo ligero

Experimento 8.1 — *Intentar atraer trozos de papel con una regla electrizada cuando hay un tamiz metálico entre ellos*

Repita el experimento del efecto del ámbar. Frote una pajita o una regla acrílica con el cabello, una servilleta de papel o un paño de algodón. Supongamos que la regla acrílica frotada atrae trozos de papel sobre una mesa cuando la distancia entre ellos es igual o inferior a 5 cm.

Coloque un tamiz metálico sobre los trozos de papel. Acerque la regla frotada al tamiz. Esta vez, los trozos de papel no se desplazan hacia la regla, incluso cuando la distancia entre la regla y los trozos de papel es inferior a 5 cm.

Experimento 8.2 — *Intentar atraer trozos de papel con una regla electrizada cuando hay un tamiz de plástico entre ellos*

Ahora utilice un tamiz de plástico. Compruebe primero que el tamiz actúa correctamente como aislante. Es decir, no debe descargar un electroscopio cargado. A partir de ahora, considérelo como un aislante. Cubra los trozos de papel con este tamiz de plástico. Coloque una regla acrílica frotada sobre el tamiz. Los trozos de papel son atraídos por la regla frotada cuando su distancia es igual o inferior a 5 cm. A veces, la atracción es ligeramente más débil que en la situación sin tamiz de plástico, por lo que la distancia entre la regla y los trozos de papel debe ser ahora inferior a 5 cm para producir una atracción perceptible.

Definición 8.1

Estos experimentos demuestran que, al colocar un conductor conectado a tierra entre un cuerpo electrizado y trozos de papel, estos últimos permanecen inmóviles incluso cuando el cuerpo electrizado se acerca a ellos. Este fenómeno se denomina «blindaje electrostático», «blindaje eléctrico», «pantalla electrostática» o «pantalla eléctrica».
El blindaje deja de funcionar si se sustituye el conductor conectado a tierra por un aislante. En este caso, los trozos de papel se desplazan hacia el cuerpo electrizado cuando están cerca unos de otros.

Experimento 8.3 — *Intentar atraer el disco de papel de un péndulo eléctrico con una regla electrizada cuando hay una hoja de papel entre ambos*

Utilice un péndulo eléctrico clásico compuesto por un disco de papel o papel de aluminio suspendido de un hilo de seda. Inicialmente debe estar descargado. Se acerca al péndulo una pajita o una regla de plástico frotada. El disco de papel comienza a desplazarse hacia la pajita frotada cuando la distancia entre ambos es de aproximadamente 10 cm, figura 8.1 (a).

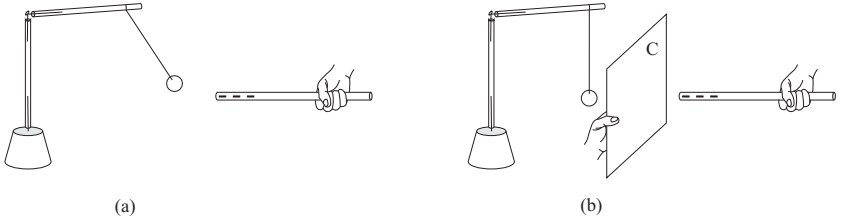


Figura 8.1: (a) Un plástico frotado atrae el disco de papel de un péndulo eléctrico situado cerca. (b) La atracción desaparece al colocar una hoja de papel conductor C entre el péndulo y el plástico frotado.

No permita que el disco de papel entre en contacto con la pajita frotada. Sin embargo, a veces se tocan y el péndulo comienza a ser repelido por la pajita debido al mecanismo *ACR*. Si esto ocurre, descargue el péndulo tocándolo con el dedo.

Vuelva a empezar con un péndulo descargado. Esta vez, coloque una hoja de papel A4 entre el péndulo y la pajita frotada. El papel debe estar vertical y no debe tocar el disco, cuyo centro debe estar a unos 5 cm del disco del péndulo. Acerque lentamente la pajita o la regla de plástico frotada al péndulo, dejando el papel entre ambos. El disco no se desplaza hacia la pajita frotada, incluso cuando la distancia entre ambos es igual o inferior a 10 cm, figura 8.1 (b). A veces, la hoja de papel es atraída por la pajita frotada. Incluso cuando se produce esta atracción, el péndulo permanece en reposo en posición vertical al otro lado del papel.

No habrá ninguna fuerza neta sobre el disco de papel si se sustituye la hoja de papel por un tamiz metálico del mismo tamaño. El disco de papel permanecerá en reposo cuando haya un conductor conectado a tierra entre el disco y el plástico frotado

al otro lado. Este conductor conectado a tierra no tiene por qué ser continuo. Puede tener agujeros como una red clásica, siempre que estos agujeros no sean muy grandes.

Experimento 8.4 — *Intentar atraer el disco de papel de un péndulo eléctrico con una regla electrizada cuando hay una lámina de plástico entre ambos*

Reemplaza la hoja de papel por una lámina de plástico transparente del mismo tamaño. Sostenga una pajita o una regla acrílica frotada al otro lado de la lámina de plástico. El disco del péndulo ahora es atraído por la pajita frotada cuando están cerca uno del otro, figura 8.2.

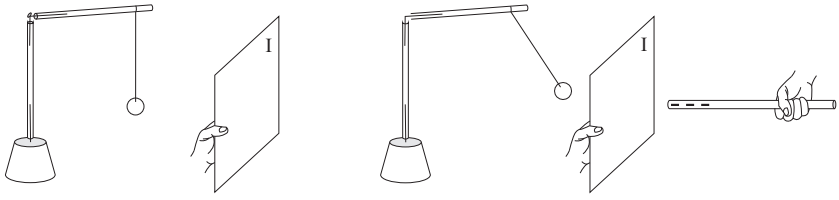


Figura 8.2: (a) Una lámina aislante de plástico cerca de un péndulo descargado. (b) El disco es atraído por una pajita frotada situada cerca, al otro lado de la lámina de plástico.

Experimento 8.5 — *Intentar atraer el disco de papel de un péndulo eléctrico con una regla electrizada cuando el péndulo se encuentra dentro de un vaso de plástico o vidrio*

Podemos realizar otro experimento sencillo e interesante con dos vasos transparentes del mismo tamaño y forma, uno de plástico y otro de vidrio. Supongamos que tenemos vasos de entre 6 y 8 cm de diámetro y entre 7 y 10 cm de altura. El plástico debe comportarse como un buen aislante y el vidrio como un buen conductor. Antes de comenzar el experimento, se deben comprobar las propiedades aislantes y conductoras del plástico y del vidrio siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.1. Cargue un electroscopio. Sostenga el vaso de plástico en la mano y toque el cartón con ella. Si el electroscopio permanece electrizado durante más de 20 segundos, este vaso de plástico puede utilizarse en el experimento. Repita el procedimiento con el vaso de vidrio. Si el electroscopio se descarga en menos de 3 segundos después del contacto, este vaso de vidrio puede utilizarse en el experimento.

El experimento debe comenzar con el vaso de plástico. Fije un pequeño disco de papel al extremo de un hilo de seda de 5 cm de largo. Fije el extremo libre del hilo dentro del vaso. Utilice pegamento o un pequeño trozo de cinta adhesiva para fijarlo al fondo del vaso. El hilo debe colgar a 1 o 2 cm de un lado del vaso, es decir, no debe estar situado en el centro. A continuación, se coloca el vaso boca abajo sobre una mesa. El péndulo cuelga verticalmente y el disco de papel no debe tocar ni la mesa ni el vaso. Electrice una regla acrílica por fricción. Cuando la regla electrizada se aleja del vaso, el péndulo permanece vertical, figura 8.3 (a). Acerque la regla electrizada al

vaso, a la misma altura que el disco de papel. El péndulo se desplaza hacia la regla, tocando el lateral del vaso, figura 8.3 (b). Al retirar la regla, el péndulo vuelve a la posición vertical, figura 8.3 (c).

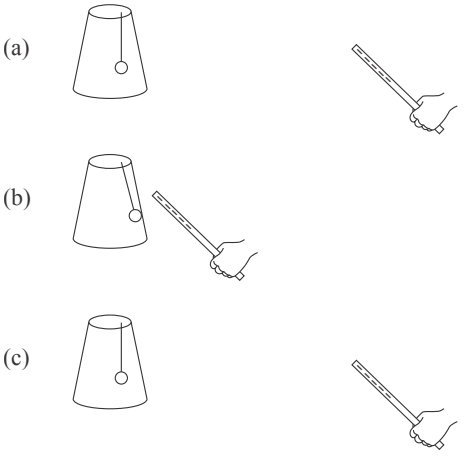


Figura 8.3: Vaso de plástico invertida con un péndulo eléctrico en su interior. (a) Regla electrizada alejada del péndulo. (b) Cuando la regla se acerca al vaso, el disco es atraído y toca el lateral del vaso. (c) Al retirar la regla, el péndulo vuelve a la posición vertical.

Cuando este experimento haya tenido éxito, podemos continuar. Repita este procedimiento con el vaso de vidrio. Esta vez, el péndulo permanece en reposo en posición vertical, independientemente de si la regla electrizada está cerca o lejos, figura 8.4.

El péndulo también permanece en reposo si se sustituye el vaso de vidrio por un tamiz metálico del mismo tamaño y forma que el vaso. En este caso, la mano debe moverse lentamente al acercarse a la regla electrizada del tamiz, para evitar que las corrientes de aire perturben el péndulo. A veces, el péndulo se mueve ligeramente cuando la regla electrizada se acerca al tamiz, aunque no toque el lateral del tamiz, como ocurre en la figura 8.3 (b).

8.1.1 Algunas investigaciones anteriores sobre el tamiz

Girolamo Cardano (1501–1576) presentó un catálogo de las diferencias entre los fenómenos eléctricos y magnéticos en su obra de 1550. Observó que el imán natural atrae el hierro a través de objetos interpuestos, mientras que el ámbar frotado no atrae los cuerpos ligeros a través de objetos interpuestos.[1] William Gilbert abordó estos fenómenos en su obra publicada en 1600:[2,3]

[1] [Hei99, p. 174].

[2] [Gil78, p. 30], [Gil00, pp. 52–53] y [Hei99, p. 174].

[3] In all bodies everywhere are presented two causes or principles whereby the bodies are produced, to wit, matter (*materia*) and form (*forma*). Electrical movements come from the *materia*, but magnetic from the prime *forma*; and these two differ widely from each other and become unlike,—the one ennobled by

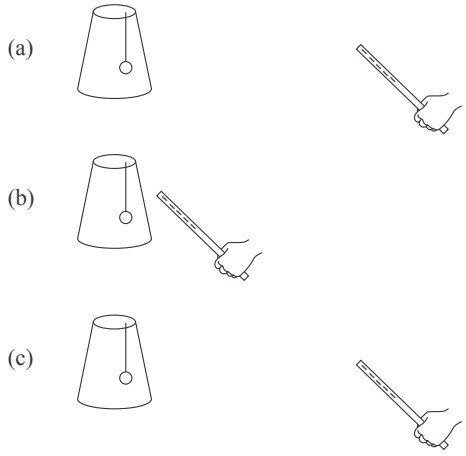


Figura 8.4: Vaso de vidrio invertido que contiene un péndulo eléctrico. (a) Regla electrizada alejada del péndulo. (b) Cuando la regla se acerca al vaso, el péndulo permanece vertical. (c) Al retirar la regla, el péndulo permanece en reposo en posición vertical.

> En todos los cuerpos, en todas partes, se presentan dos causas o principios por los que se producen los cuerpos, a saber, la «materia» y la «forma». Los movimientos eléctricos provienen de la «materia», pero los movimientos magnéticos provienen de la «forma» primaria; y estos dos difieren mucho entre sí y se vuelven disímiles, uno ennoblecido por numerosas virtudes y preponderante, el otro humilde, menos poderoso y confinado en ciertas prisiones, por así decirlo; por lo que su fuerza debe ser despertada por fricción hasta que la sustancia alcance un calor moderado, desprenda un aroma y su superficie brille. El aire húmedo soplado con la boca o una corriente de aire húmedo procedente de la atmósfera sofoca sus poderes; y si se interpone una hoja de papel o un paño de lino, no hay movimiento. Pero el magnetismo, sin ser frotado ni calentado, e incluso si está empapado de líquido, ya sea en el aire o en el agua, atrae los cuerpos magnéticos, incluso si hay cuerpos sólidos o tablas, o gruesas losas de piedra o placas de metal, interpuestos entre ellos.

Honoré Fabri (1607–1688) y los científicos de la Accademia del Cimento (Academia del Experimento) desarrollaron estos experimentos entre 1657 y 1667:[4,5]

many virtues, and prepotent; the other lowly, of less potency, and confined in certain prisons, as it were; wherefore its force has to be awakened by friction till the substance attains a moderate heat, and gives out an effluvium, and its surface is made to shine. Moist air blown upon it from the mouth or a current of humid air from the atmosphere chokes its powers; and if a sheet of paper or a linen cloth be interposed there is no movement. But loadstone, neither rubbed nor heated, and even though it be drenched with liquid, and whether in air or water, attracts magnetic bodies, and that, though solidest bodies or boards, or thick slabs of stone or plates of metal, stand between.

[4] [Hei99, p. 201].

[5] The motive for the investigation of screens was, the Diarist says, to discover 'the resistance sufficient to impede the attraction of amber.' The academicians began by interposing sheets of paper punctured first with a fine needle, then with the points of scissors, finally with a large nail. The holes grew; the attraction did not.

> Según el cronista, el objetivo del estudio de las pantallas era descubrir «la resistencia suficiente para impedir la atracción del ámbar». Los académicos comenzaron interponiendo hojas de papel perforadas primero con una aguja fina, luego con las puntas de unas tijeras y, por último, con un clavo grande. Los agujeros se hicieron más grandes, pero la atracción no aumentó.

Fabri y otros científicos también estudiaron el blindaje de los líquidos. Mencionaron que el ámbar frotado pierde su electricidad cuando se humedece con agua, pero la conserva cuando se cubre con aceite.[6]

Stephen Gray mencionó en 1731 un importante experimento realizado por su amigo Granville Wheler (1701–1770). Un tubo de vidrio frotado atraía un hilo (probablemente de algodón o lino, es decir, un material conductor) a través de cinco capas de vidrio superpuestas.[7] Cabe destacar una vez más que los objetos de vidrio utilizados por Gray y sus colaboradores se comportaban como buenos aislantes.

Gianfrancesco Cigna (1734–1790) menciona en su tesis doctoral de 1757 que se producen atracciones entre cuerpos cargados sumergidos en aceite. Este hecho también fue discutido por Alessandro Volta.[8]

Todos estos importantes hechos constituían argumentos convincentes contra las teorías de los efluvios emitidos por el ámbar frotado. Estos hechos también ponían en duda la supuesta existencia de atmósferas alrededor de los cuerpos electrizados.[9]

Estos experimentos no se comprendieron plenamente hasta el descubrimiento de los conductores y los aislantes, la existencia de dos tipos de electricidad y los efectos de la polarización eléctrica en los conductores y los aislantes. El agua, por ejemplo, se comporta como un conductor en electrostática. El aceite, por el contrario, se comporta como un aislante.

8.2 Experimentos con conductores huecos

Ahora realice algunos experimentos con conductores huecos, como los descritos en la sección 7.2.

Experimento 8.6 — *Intentar atraer la tira externa de una carcasa cilíndrica con ayuda de una regla electrizada*

Comience con una carcasa cilíndrica aislada y descargada. Debe tener una o varias tiras finas de papel de seda cuyos extremos superiores estén pegados a la pared externa del cilindro, figura 8.5 (a).

Una pajita o una regla de plástico se carga negativamente frotándola con el cabello, una servilleta de papel o un paño de algodón. La pajita frotada se acerca al cilindro. Por el momento, no debe tocar el cilindro ni sus tiras. La tira más cercana es atraída por la pajita frotada, figura 8.5 (b). Incluso cuando el cilindro está conectado a tierra

[6] [Hei99, pp. 195–196 y 200–201].
[7] [Gra32c, p. 399], [Bos11, pp. 253–255], [BAC12, pp. 194–199] y [Hei99, p. 249].
[8] [Hei99, pp. 406, 413 y 415].
[9] [Hei99, capítulos V y XVII].

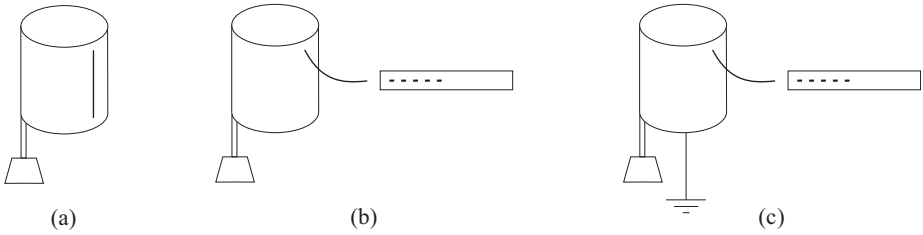


Figura 8.5: (a) Carcasa cilíndrica descargada. (b) La tira externa es atraída por una regla acrílica frotada cerca. (c) Al conectar el cilindro a tierra, la atracción persiste.

(tocando su borde superior con un dedo, por ejemplo), la tira sigue siendo atraída por la pajita frotada, figura 8.5 (c).

La tira de papel de seda también es atraída por la pajita cuando se invierte este procedimiento. Es decir, primero hay que conectar el cilindro a tierra. A continuación, se acerca la pajita frotada al cilindro.

Experimento 8.7 — *Intentar atraer la tira interna de una carcasa cilíndrica con ayuda de una regla electrizada*

Repita el experimento 8.6, pero esta vez pegando las tiras en la pared interna de una carcasa cilíndrica aislada, figura 8.6 (a).

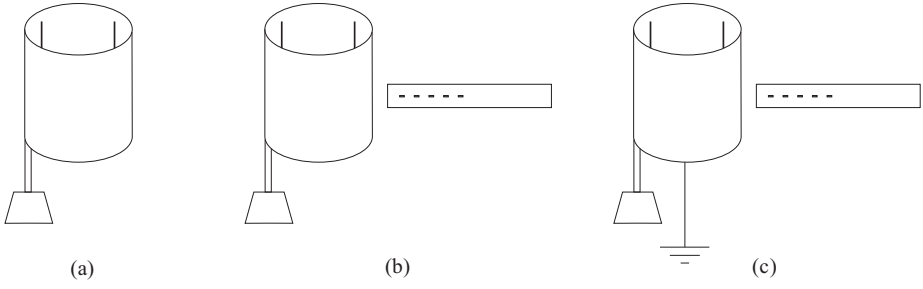


Figura 8.6: (a) Carcasa cilíndrica descargada. (b) Las tiras internas permanecen inmóviles cuando se acerca al cilindro una pajita o una regla acrílica frotada. (c) Permanecen verticales cuando el cilindro se conecta a tierra.

Acerque una pajita o una regla acrílica frotada al cilindro. Sus tiras internas permanecen en reposo en posición vertical, figura 8.6 (b). Permanecen en reposo cuando el cilindro está conectado a tierra, figura 8.6 (c).

Las tiras internas permanecen en reposo cuando se invierte el procedimiento. Es decir, conecte el cilindro a tierra y luego acerque la pajita frotada al mismo.

Experimento 8.8 — *Intentar atraer un péndulo eléctrico al interior de una carcasa cilíndrica*

Utilice una carcasa cilíndrica conductora y aislada inicialmente descargada. El disco de papel conductor de un péndulo eléctrico se coloca en el interior, cerca de la pared pero sin tocarla, entre sus bordes superior e inferior. Se acerca al disco desde el exterior una pajita o una regla acrílica frotada. El disco no se desplaza hacia la pajita frotada, incluso cuando están muy cerca el uno del otro, figura 8.7 (a). A veces, el borde superior del cilindro atrae ligeramente el hilo de seda del péndulo. Incluso en este caso, observe que la atracción actúa sobre el hilo y no sobre el disco de papel interno.

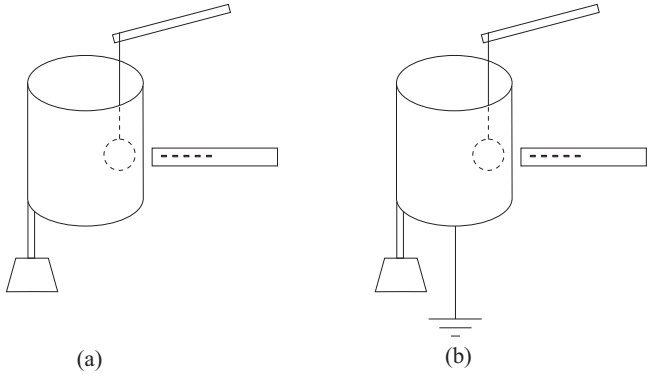


Figura 8.7: (a) El disco de papel de un péndulo eléctrico no se desplaza hacia una pajita o una regla acrílica frotada cerca. (b) Al conectar el cilindro a tierra, el péndulo permanece inmóvil en posición vertical.

Al conectar la carcasa cilíndrica a tierra, el péndulo permanece inmóvil en posición vertical, figura 8.7 (b).

Experimento 8.9 — *Intentar atraer un péndulo eléctrico fuera de una carcasa cilíndrica*

Repita el experimento 8.8, pero esta vez con el péndulo fuera de la carcasa. El cilindro debe estar inicialmente descargado y aislado del suelo. El péndulo debe estar muy cerca de la carcasa, pero sin tocarlo. El disco de papel debe colocarse a mitad de camino entre los bordes superior e inferior. Se acerca lentamente una pajita o una regla acrílica frotada negativamente al otro lado del cilindro, con la parte frotada a la misma altura que el disco de papel. Cuando está muy cerca de la carcasa, sin tocarla, el disco es atraído por la carcasa, la toca y luego es repelido por el mecanismo *ACR*, figura 8.8.

Al estudiar la carga del disco electrizado, descubrimos que tiene el mismo signo que la carga de la regla electrizada. A veces, el disco permanece adherido al cilindro después del contacto. Se puede desprender golpeando suavemente la pajita que sostiene el cilindro o soplando suavemente sobre el disco. También se puede desprender retirando la pajita frotada y acercándola al otro lado del cilindro.

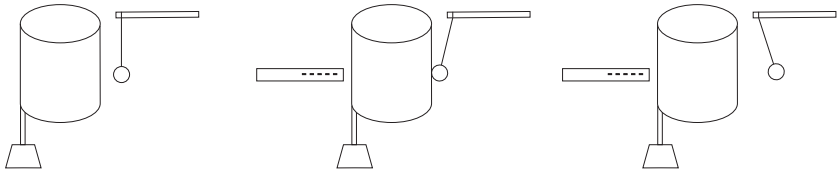


Figura 8.8: (a) Un péndulo eléctrico externo cerca de una carcasa cilíndrica. (b) y (c): Acerque una pajita o una regla acrílica frotada al otro lado del cilindro. El disco es atraído por el cilindro, lo toca y luego es repelido.

Por el contrario, cuando la carcasa cilíndrica está inicialmente conectada a tierra, el mecanismo *ACR* no se produce. Acerque la regla acrílica frotada a la carcasa. Observe que el péndulo cercano al otro lado permanece en reposo vertical, figura 8.9.

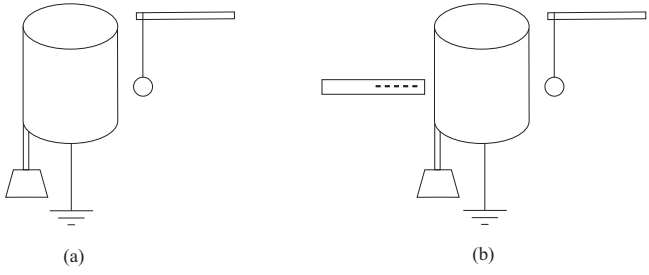


Figura 8.9: El mecanismo *ACR* no se produce cuando se acerca una regla acrílica frotada al otro lado de una carcasa cilíndrica inicialmente conectada a tierra.

Experimento 8.10 — *Regla electrizada dentro de una carcasa cilíndrica y péndulo eléctrico fuera de la misma*

Utilice de nuevo una carcasa cilíndrica conductora. Está aislada y inicialmente descargada. La parte frotada de una regla de plástico cargada negativamente se coloca dentro de la carcasa. Debe estar cerca de la pared, pero sin tocarla. El disco del péndulo eléctrico debe estar fuera de la carcasa, alejado de ella y a la misma altura que la regla electrizada, figura 8.10 (a).

Sujete el péndulo por su soporte o su pajita, acercándolo lentamente al cilindro. Cuando está muy cerca de la carcasa, su disco es atraído hacia la regla acrílica frotada, toca la carcasa y luego es repelido por ella gracias al mecanismo *ACR*, figura 8.10 (b) y (c). Al estudiar su carga, obtenemos que ahora está electrizado con cargas del mismo signo que las de la regla interna.

Repita este experimento, pero esta vez con la carcasa cilíndrica inicialmente conectada a tierra. Acerque el péndulo a la regla acrílica frotada. Observe que el péndulo permanece vertical. En otras palabras, su disco no sufre el mecanismo *ACR*, figura 8.11.

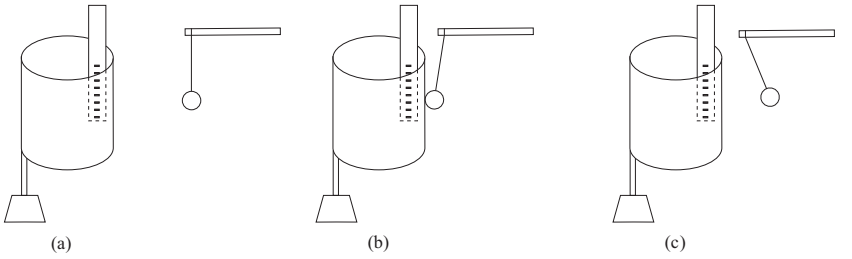


Figura 8.10: (a) Péndulo eléctrico alejado de una carcasa cilíndrica aislada con una regla acrílica electrizada en su interior. (b) y (c): Cuando el péndulo se acerca a la regla, es atraído hacia la carcasa, la toca y luego es repelido.

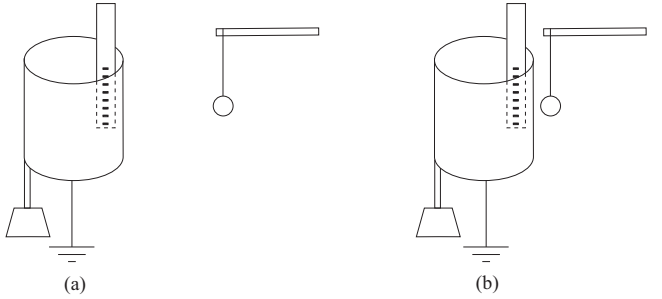


Figura 8.11: (a) Péndulo eléctrico alejado de una carcasa cilíndrica conectada a tierra con una regla acrílica electrizada en su interior. (b) Cuando el péndulo se acerca a la regla, no es atraído hacia ella.

8.3 Condiciones suficientes para un blindaje eficaz

Esta subsección trata algunas situaciones en las que existe un blindaje eficaz y otras en las que no lo hay.

El experimento 7.15 utilizó una carcasa cilíndrica aislada y conductora. La figura 7.18 (b) mostró que cuando se coloca una regla electrizada en el interior, las tiras situadas en el exterior del cilindro se levantan. Sin embargo, cuando el cilindro se conecta a tierra, las tiras vuelven a caer, a pesar de la presencia de la regla electrizada en el interior, figura 7.18 (c). Por lo tanto, un conductor cerrado y conectado a tierra protege en el exterior los efectos que produciría el cuerpo electrizado interno si la carcasa estuviera aislada de la tierra.

El mismo comportamiento se puede observar en el experimento 8.10 comparando las figuras 8.10 y 8.11. Un conductor cerrado tiene una carga interna. Cuando el conductor está aislado, afecta al disco de un péndulo que se aproxima a él, produciendo el mecanismo *ACR*. Sin embargo, cuando el conductor está conectado a tierra, el mecanismo *ACR* no se produce, incluso cuando el péndulo eléctrico está cerca del cilindro.

En el experimento 8.6, figuras 8.5 y 8.6, hay una carcasa cilíndrica conductora con una carga externa (la regla acrílica frotada). Cuando la regla electrizada se acerca al

cilindro, las tiras de papel de seda externas se ven afectadas por ella, independientemente de si el cilindro está aislado o conectado a tierra. Las tiras internas, por el contrario, no se ven afectadas, independientemente de si el cilindro está aislado o conectado a tierra.

Este comportamiento también se puede observar con el péndulo eléctrico del experimento 8.8. Tenemos una carcasa cilíndrica conductora con la regla acrílica frotada en el exterior. El péndulo eléctrico se encuentra dentro del cilindro. Su disco está cerca de uno de sus lados, sin tocarlo, situado a mitad de camino entre los bordes superior e inferior. Incluso cuando la regla electrizada se acerca al cilindro, no hay fuerza neta sobre el disco, ya que permanece en reposo, figura 8.7. Tanto si el cilindro está aislado como si está conectado a tierra, no hay fuerza neta sobre el disco interno.

En el experimento 8.9, la regla acrílica frotada se encuentra fuera de una carcasa conductora aislada. Afecta a un péndulo eléctrico externo situado al otro lado del cilindro. Cuando la regla frotada se acerca al cilindro, el disco del péndulo sigue el mecanismo *ACR*, figura 8.8. Por el contrario, en el caso de una carcasa cilíndrica conectada a tierra, el mecanismo *ACR* no se produce, figura 8.9.

Concluimos diciendo que no hay efectos netos sobre los cuerpos electrizados en el exterior cuando hay cargas situadas en el interior de un conductor cerrado y conectado a tierra (por efecto neto entendemos un efecto resultante o total). En esta situación, se produce un blindaje eléctrico eficaz. Tampoco hay efectos netos sobre las cargas internas cuando hay cuerpos electrizados en el exterior de un conductor cerrado, ya sea aislado o conectado a tierra.

Sin embargo, hay efectos netos sobre las cargas externas cuando hay cuerpos electrizados en el interior de un conductor aislado y cerrado.

Estos comportamientos pueden explicarse por la distribución de cargas repartidas entre las superficies internas y externas de los conductores huecos. Consideremos primero el blindaje que se produce en el exterior de un conductor cerrado y aislado con una carga interna. Consideremos el conductor como una esfera hueca inicialmente descargada y aislada de la tierra. Supongamos que hay una carga negativa neta $-Q$ dentro de la carcasa. La presencia de esta carga polariza la carcasa. Su pared interna se electriza positivamente, mientras que su pared externa se electriza negativamente, figura 8.12 (a). Al conectar el conductor a tierra, neutralizamos la distribución de cargas en su pared externa, figura 8.12 (b).

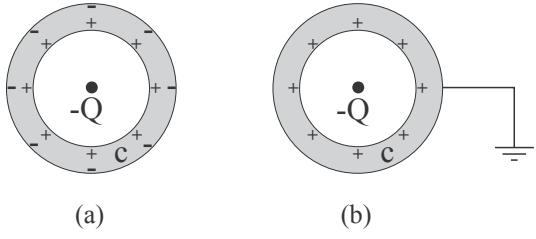


Figura 8.12: (a) Conductor aislado polarizado debido a la presencia de una carga negativa interna $-Q$. (b) Conductor conectado a tierra con pared externa neutralizada.

Supongamos la presencia de un cuerpo con carga positiva q situado fuera del conductor conectado a tierra de la figura 8.12 (b). Supongamos que $q \ll Q$ y descuidemos la polarización de las cargas inducidas en el conductor debido a la presencia de esta carga externa q. Dos fuerzas actúan sobre el cuerpo externo, a saber, la fuerza de atracción F_A ejercida por el cuerpo interno cargado negativamente con la carga $-Q$ y la fuerza de repulsión F_R ejercida por todas las cargas distribuidas en la pared interna del conductor. Estas dos fuerzas tienen la misma intensidad, pero actúan en direcciones opuestas. Se anulan mutuamente, figura 8.13.

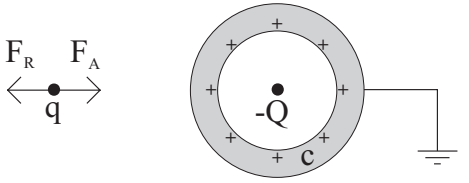


Figura 8.13: Fuerzas de atracción y repulsión, F_A y F_R, que actúan sobre el cuerpo cargado con una carga q.

Importante: solo la «fuerza neta o resultante» que actúa sobre la carga q situada fuera del conductor conectado a tierra tiende a cero. A pesar de ello, la presencia del conductor no elimina la fuerza de atracción F_A ejercida por la carga interna $-Q$. Cuando el conductor está conectado a tierra, también existe una fuerza de repulsión F_R debida a las cargas positivas distribuidas en la pared interna de la carcasa esférica. Estas dos fuerzas tienen la misma intensidad pero direcciones opuestas, por lo que se anulan mutuamente.

La figura 8.14 (a) muestra la fuerza de atracción F_A ejercida por $-Q$ sobre q separados por una distancia d cuando no hay otros cuerpos entre estas cargas. Cuando hay un conductor conectado a tierra alrededor de $-Q$, como en la figura 8.14 (b), la fuerza de atracción ejercida por $-Q$ sobre q sigue siendo exactamente la misma que antes, con la misma intensidad y la misma dirección, siempre que $-Q$ y q permanezcan a la misma distancia d. Sin embargo, la «fuerza resultante» que actúa sobre q se vuelve nula en la última situación debido a la presencia de la fuerza repulsiva F_R ejercida por las cargas positivas distribuidas en la pared interna del conductor. Esta fuerza repulsiva F_R no se representó en la figura 8.14 (b). La fuerza de reacción ejercida por q sobre $-Q$ viene dada por $-F_A$, donde F_A se representó en la figura 8.14 (a) y (b). La fuerza de reacción $-F_A$ no se representó en esta figura.

Consideremos el blindaje que se produce en el interior de un conductor cerrado cuando hay un cuerpo electrizado en el exterior, estando el conductor aislado o conectado a tierra. Supongamos de nuevo un conductor esférico inicialmente descargado y aislado. Consideramos la situación en la que un cuerpo electrizado negativamente con una carga $-Q$ se encuentra fuera de la carcasa. Este cuerpo externo polariza la pared externa de la carcasa aislada, figura 8.15 (a). Al conectar la carcasa a tierra, neutralizamos las cargas inicialmente distribuidas en la pared externa cerca de la posición de conexión a tierra. Además, las demás cargas que permanecen en la superficie de la

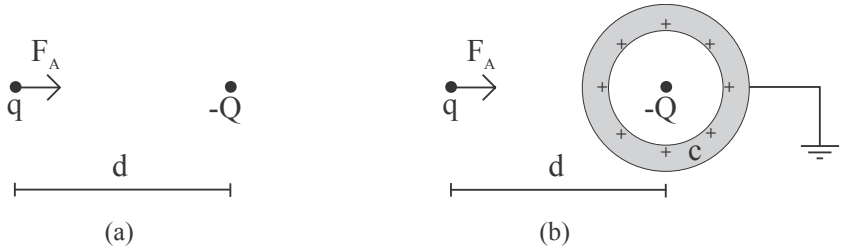


Figura 8.14: (a) Fuerza de atracción F_A ejercida por $-Q$ sobre q separados por una distancia d cuando no hay ningún cuerpo entre ellos. (b) La fuerza de atracción F_A ejercida por $-Q$ sobre q sigue siendo la misma cuando hay un conductor conectado a tierra alrededor de $-Q$, siempre que $-Q$ y q sigan estando separados por la misma distancia d.

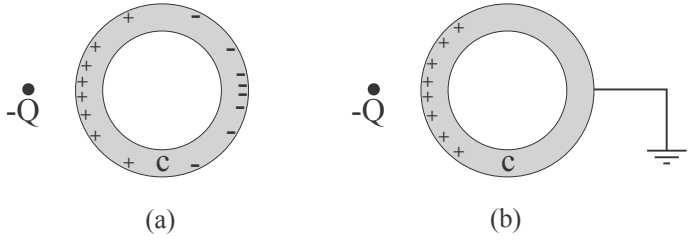


Figura 8.15: (a) Conductor aislado c cuya pared externa está polarizada debido a la presencia de un cuerpo negativo $-Q$ en el exterior. (b) Conductor conectado a tierra que muestra la neutralización de las cargas cerca del punto de conexión a tierra y una redistribución de las cargas restantes.

carcasa se reorganizan (en comparación con la distribución anterior de las cargas en la esfera aislada), figura 8.15 (b).

Supongamos ahora la presencia de un cuerpo cargado positivamente con una carga q dentro del conductor de la figura 8.15 (a). Una vez más, suponemos que $q \ll Q$ y descuidamos la polarización inducida en la carcasa por la presencia de esta carga interna q. Tres fuerzas actúan sobre el cuerpo cargado positivamente con la carga q, a saber, la fuerza de atracción F_A dirigida hacia la izquierda y ejercida por el cuerpo negativo externo cargado con la carga $-Q$, la fuerza repulsiva F_1 apuntando hacia la derecha y ejercida por las cargas positivas distribuidas en la pared externa del conductor, así como la fuerza de atracción F_2 apuntando hacia la derecha y ejercida por las cargas negativas distribuidas en la pared externa del conductor. Estas tres fuerzas se equilibran mutuamente, de modo que $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_1 + \vec{F}_2|$, lo que no produce ninguna fuerza resultante sobre la carga interna q, figura 8.16 (a).

En cuanto al conductor conectado a tierra de la figura 8.15 (b), existen dos fuerzas iguales y opuestas que actúan sobre la carga interna q, a saber, la fuerza de atracción F_A que apunta hacia la izquierda y es ejercida por la carga externa $-Q$, y la fuerza de repulsión F_3 apuntando hacia la derecha y ejercida por las cargas positivas

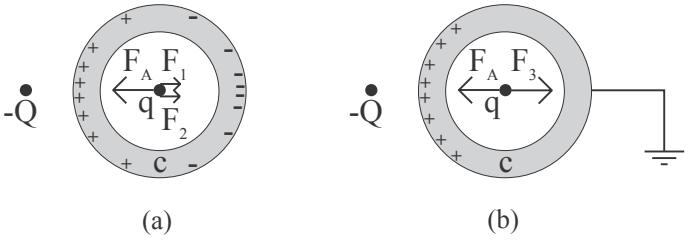


Figura 8.16: (a) Fuerzas que actúan sobre la carga q situada en el interior del conductor aislado de la figura 8.15 (a), $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_1 + \vec{F}_2|$. (b) Fuerzas que actúan sobre la carga q situada en el interior del conductor conectado a tierra de la figura 8.15 (b), $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_3|$.

distribuidas en la pared externa del conductor, figura 8.16 (b). Estas dos fuerzas tienen la misma intensidad pero direcciones opuestas, anularse mutuamente, $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_3|$.

La «fuerza neta o resultante» que actúa sobre la carga interna q tiende a cero en las dos situaciones de la figura 8.16. Sin embargo, es importante destacar aquí que la fuerza de atracción ejercida por $-Q$ sobre q sigue siendo la misma, independientemente de la presencia o ausencia del conductor alrededor de q. La fuerza de atracción F_A ejercida por $-Q$ sobre q siempre tiene el mismo valor, independientemente de la distribución de las cargas en la pared externa del conductor. El conductor puede estar aislado o conectado a tierra, eso no importa. La fuerza de atracción entre $-Q$ y q siempre es la misma. La presencia del conductor no elimina esta fuerza de atracción ejercida por $-Q$ sobre q. Sin embargo, la presencia del conductor permite una redistribución de las cargas en su pared exterior. La fuerza ejercida por estas cargas superficiales sobre q tiene la misma intensidad que la fuerza ejercida por $-Q$ sobre q, pero actúa en la dirección opuesta, de modo que se anulan mutuamente.

La figura 8.17 (a) muestra la fuerza de atracción F_A ejercida por $-Q$ sobre q separados por una distancia d cuando no hay otros cuerpos entre ellos. Esta fuerza sigue siendo la misma cuando hay un conductor aislado alrededor de q, figura 8.17 (b). La fuerza de atracción F_A ejercida por $-Q$ sobre q también sigue siendo la misma que antes cuando hay un conductor conectado a tierra alrededor de q, figura 8.17 (c). Esta figura no muestra las fuerzas que actúan sobre q debido a las cargas distribuidas en la pared externa del conductor. La fuerza de reacción ejercida por q sobre $-Q$ viene dada por $-F_A$ en las situaciones (a), (b) y (c) de la figura 8.17. Esta fuerza de reacción tampoco se representa en la figura.

Las figuras 8.13 y 8.14 muestran que la presencia de un conductor conectado a tierra produce un «blindaje eficaz». No hay ninguna «fuerza neta o resultante» que actúe sobre una partícula electrizada situada fuera de un conductor conectado a tierra cuando hay un cuerpo electrizado dentro de él. Sin embargo, no hay un «blindaje real» de la fuerza ejercida por el cuerpo electrizado interno que actúa sobre el cuerpo externo. Esta fuerza sigue siendo la misma, independientemente de si el conductor conectado a tierra está presente o no. Se puede llegar a la misma conclusión comparando las figuras 8.16 y 8.17. En esta última situación, también existe un «blindaje

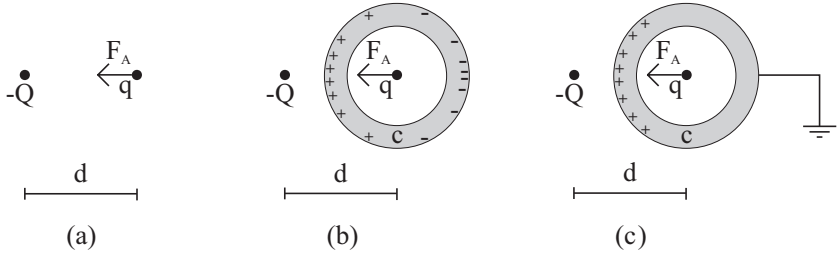


Figura 8.17: (a) Fuerza de atracción F_A ejercida por $-Q$ sobre q separados por una distancia d cuando no hay otros cuerpos entre ellos. (b) Esta fuerza permanece igual cuando hay un conductor aislado alrededor de q. (c) Esta fuerza permanece exactamente igual cuando hay un conductor conectado a tierra alrededor de q.

eficaz», ya que la «fuerza neta o resultante» que actúa sobre un cuerpo dentro de un conductor conectado a tierra tiende a cero. Sin embargo, una vez más, no existe un «blindaje real» de la fuerza ejercida por la carga externa que actúa sobre el cuerpo electrizado en el interior. Esta última fuerza actúa siempre con la misma intensidad, independientemente de si el conductor conectado a tierra está presente o no.[10]

8.4 La jaula de Faraday

Michael Faraday realizó experimentos muy interesantes utilizando un dispositivo comúnmente conocido como «jaula de Faraday». Se trata de un conductor hueco. Estas son sus propias palabras para describir sus observaciones:[11,12]

> 1173. Realicé estos experimentos con aire a gran escala. Mandé construir una cámara cúbica de doce pies [3.6 m × 3.6 m × 3.6 m]. Se construyó un ligero marco cúbico de madera y se colocó alambre de cobre en diferentes direcciones, de modo que formara una gran red en los lados, luego se cubrió todo con papel, se colocó

[10] [Roc89].

[11] [Far38, paragraphes 1173–1174, pp. 442–443].

[12] 1173. I carried these experiments on with air to a very great extent. I had a chamber built, being a cube of twelve feet. A slight cubical wooden frame was constructed, and copper wire passed along and across it in various directions, so as to make the sides a large net-work, and then all was covered in with paper, placed in close connexion with the wires, and supplied in every direction with bands of tin foil, that the whole might be brought into good metallic communication, and rendered a free conductor in every part. This chamber was insulated in the lecture-room of the Royal Institution; [...]

1174. I put a delicate gold-leaf electrometer within the cube, and then charged the whole by an *outside* communication, very strongly, for some time together; but neither during the charge or after the discharge did the electrometer or air within show the least signs of electricity. I charged and discharged the whole arrangement in various ways, but in no case could I obtain the least indication of an absolute charge; or of one by induction in which the electricity of one kind had the smallest superiority in quantity over the other. I went into the cube and lived in it, and using light candles, electrometers, and all other tests of electrical states, I could not find the least influence upon them, or indication of anything particular given by them, though all the time the outside of the cube was powerfully charged, and large sparks and brushes were darting off from every part of its outer surface. The conclusion I have come to is that non-conductors, as well as conductors, have never yet had an absolute and independent charge of one electricity communicated to them, and that to all appearance such a state of matter is impossible.

> en contacto estrecho con los hilos y se equipó en todas las direcciones con tiras de estaño, para que el conjunto pudiera establecer una buena comunicación metálica y se convirtiera en un conductor libre en todas sus partes. Esta cámara estaba aislada en la sala de conferencias de la Royal Institution; [...]
>
> 1174. Coloqué un delicado electrómetro de hoja de oro dentro del cubo y luego cargué el conjunto mediante una comunicación *externa*, muy fuertemente, durante un cierto tiempo; pero ni durante la carga ni después de la descarga, el electrómetro o el aire del interior mostraron el menor signo de electricidad. Cargué y descargué el conjunto de diversas maneras, pero nunca pude obtener la más mínima indicación de una carga absoluta, ni de una carga por inducción en la que la electricidad de un tipo tuviera la más mínima superioridad cuantitativa sobre la otra. Entré en el cubo y viví en él, y utilizando velas encendidas, electrómetros y todas las demás pruebas de estados eléctricos, no pude encontrar la más mínima influencia sobre ellos, ni ninguna indicación particular dada por ellos, a pesar de que el exterior del cubo estuvo fuertemente cargado durante todo ese tiempo y de que grandes chispas y pinceladas brotaban de todas las partes de su superficie exterior. La conclusión a la que llegué es que los no conductores, al igual que los conductores, nunca recibieron una carga eléctrica absoluta e independiente, y que, a primera vista, tal estado de la materia es imposible.

Los experimentos de la sección 8.1 están relacionados con estos fenómenos observados por Faraday. En particular, no hay «efectos netos, totales o resultantes» dentro de un conductor cerrado debido a la presencia de cargas en la superficie del conductor o situadas fuera del conductor.

Capítulo 9

El efecto punta

Existen varios efectos eléctricos que son más intensos en las regiones puntiagudas de los conductores que en las regiones romas o menos puntiagudas. Algunos de estos efectos reciben una denominación genérica, a saber, «el efecto punta». A continuación enumeramos algunos de estos fenómenos:

1. Las partículas electrizadas se acumulan con una mayor densidad superficial en las regiones puntiagudas de los conductores electrizados o polarizados.

2. Los cuerpos ligeros situados en las regiones puntiagudas de los conductores son atraídos con mayor fuerza por otro cuerpo electrizado.

3. Las regiones puntiagudas de los conductores son atraídas o repelidas con mayor intensidad por otros cuerpos electrizados.

Ilustramos estas propiedades con algunos experimentos sencillos.

9.1 Ilustrar el efecto punta con ayuda de electroscopios

Puede visualizar el efecto punta utilizando electroscopios sencillos fabricados con cartón fino. Su forma debe parecerse a la de una raqueta de tenis, una tabla de cortar o un sombrero de payaso puntiagudo.[1] Aquí sugerimos un tamaño específico, aunque lo más importante para estos experimentos es la forma asimétrica del cartón y no su tamaño. El cartón se fija a una pajita de plástico con dos trozos de cinta adhesiva, como en un electroscopio simple. Recorte dos tiras muy pequeñas de papel de seda, de 1 a 3 mm de ancho y de 6 a 9 cm de largo. Deben tener el mismo tamaño y grosor. Pegue los extremos superiores de estas tiras en el electroscopio. Una de ellas se pega en la parte puntiaguda del cartón y la otra en su parte más ancha, figura 9.1.

[1] [FM91, pp. 60–61], [Fersdb, Poder das pontas, p. 39] y [Gas03, pp. 239–243].

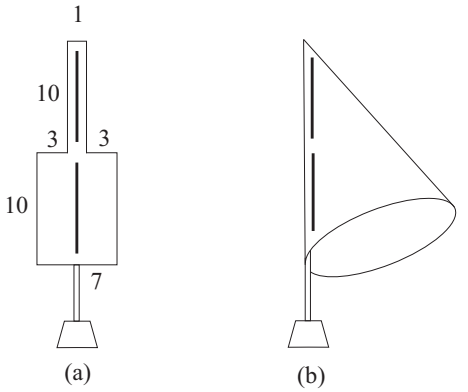


Figura 9.1: (a) Electroscopio con forma de tabla de cortar. Dimensiones aproximadas en centímetros. (b) Electroscopio con forma de sombrero de payaso.

Experimento 9.1 — *Cargar un electroscopio asimétrico*

Frote enérgicamente una pajita o una regla acrílica con el cabello o una hoja de papel. Raspe varias veces con la pajita así cargada el borde superior de estos electroscopios hasta que adquieran una carga eléctrica suficiente, como indican las tiras levantadas. Aleje la pajita frotada del electroscopio. Observe que las tiras de papel de seda situadas en las partes puntiagudas de los electroscopios son más altas que las demás tiras. En otras palabras, adquieren ángulos de inclinación más altos con respecto a su cartón que las demás tiras situadas en los mismos electroscopios, figura 9.2.

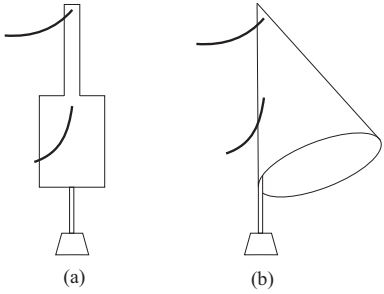


Figura 9.2: Electroscopios cargados. Las tiras situadas en las regiones puntiagudas están más inclinadas que las demás tiras.

El volumen 1 de esta obra demostró que el ángulo de inclinación de la tira de papel de seda de un electroscopio es un indicador cualitativo de la electrización del electroscopio, es decir, de su densidad de carga superficial.[2] Cuanto más electrizado esté, más se levantará la tira.

[2]Experimento 6.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

A partir del presente experimento, concluimos que la densidad de carga superficial en la región puntiaguda de un electroscopio cargado es mayor que la densidad de carga superficial en la región roma, como se muestra en la figura 9.3.

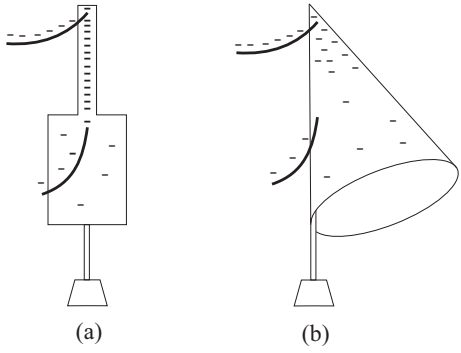


Figura 9.3: Cargas concentradas en las puntas de los electroscopios electrizados.

Experimento 9.2 — *Cargar una tira larga de papel rectangular*

Corte un trozo de cartón de 10 cm de ancho y de 1 a 2 m de largo. En lugar de cartón, también puede utilizar rectángulos, proveniendo de papel A4, de 10 cm de ancho grapados entre sí para obtener una longitud de 1 a 2 m. Las pajitas deben fijarse a este rectángulo largo con cinta adhesiva, de modo que la mitad de su longitud sobresalga del rectángulo. A continuación, las pajitas se fijan a soportes adecuados para que el cartón permanezca en posición vertical. Pegue los extremos superiores de unas tiras de papel de seda fino a lo largo de todo el cartón, como se muestra en la figura 9.4.

Figura 9.4: Rectángulo de cartón de 10 cm de ancho y 1 m de largo con varias tiras de papel de seda fino.

Electrice este rectángulo raspando varias veces con una regla de plástico el borde superior del cartón. Una vez retirada la regla, observe que las tiras situadas en los bordes del rectángulo son más altas que las del centro, figura 9.5 (a). Esto indica que hay una mayor concentración de cargas en los bordes del rectángulo, figura 9.5 (b).

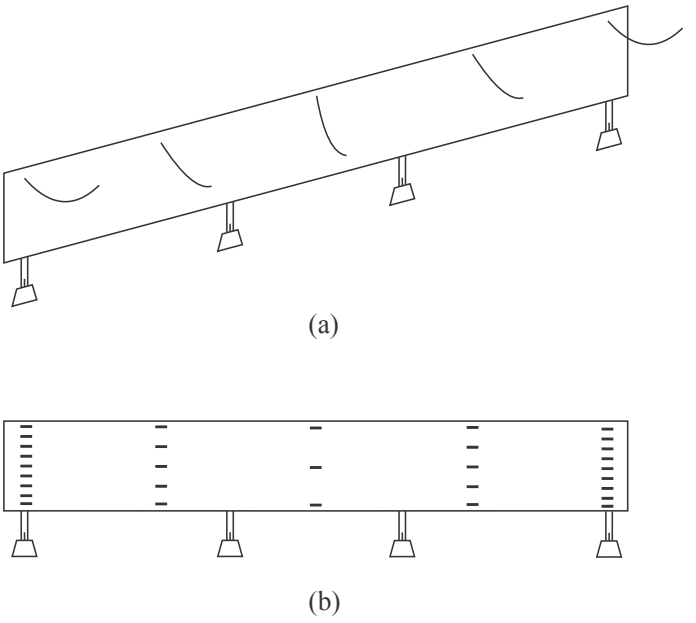


Figura 9.5: (a) Las tiras situadas en los bordes son más altas que las situadas en el centro del rectángulo. (b) Distribución cualitativa de las cargas sobre el rectángulo.

9.2 La recogida y la comparación de densidades de carga superficial

Experimento 9.3 — *Recoger cargas superficiales de un electroscopio asimétrico*

Se pueden comparar más fácilmente las densidades de carga superficial situadas en diferentes regiones de un electroscopio cargado utilizando colectores de carga adecuados. Un ejemplo es el plano de prueba de Coulomb representado en la figura 2.17 de la sección 2.6. Puede tratarse de un disco de cartón de 1 cm de diámetro al que se une, en el centro, una pajita de plástico de 4 cm de largo con pegamento o plastilina. Estime cualitativamente la cantidad de carga recogida por el plano de prueba comparando la distancia mínima a la que debe acercarse para afectar a las tiras levantadas de otros dos electroscopios, uno cargado positivamente y otro negativamente. Estos dos electroscopios deben estar separados entre sí y alejados del conductor asimétrico aislado y electrizado. Después de recoger las cargas de diferentes regiones de este conductor asimétrico, acerque lentamente el plano de prueba a las tiras levantadas de los electroscopios. Estime la distancia crítica a la que estas tiras comienzan a ser atraídas o repelidas por el plano de prueba. Cuanto mayores sean estas distancias críticas, más electrizado estará el plano de prueba.

Como conductor asimétrico, utilice el electroscopio de tabla de cortar de la figura 9.1 (a). Retire sus tiras de papel de seda, como en la figura 9.6 (a).

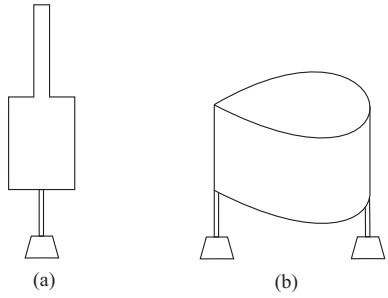


Figura 9.6: Conductores asimétricos aislados del suelo mediante pajillas de plástico.

Otro ejemplo de conductor asimétrico es un rectángulo de papel de 10 cm de ancho y 60 cm de largo sostenido por tres o cuatro pajitas de plástico fijadas a soportes adecuados. Pegue o fije los dos bordes de esta tira flexible para darle forma de gota, figura 9.6 (b).

Electrice el electroscopio de tabla de cortar raspando su cartón con una regla acrílica o una pajita frotada. Comience por recoger las cargas del mango de este electroscopio con ayuda del plano de prueba, como se muestra en la figura 9.7 (a). Sujete el plano de prueba cargado únicamente por su pajita aislante. A continuación, acérquelo a un electroscopio cargado positivamente. Mida la distancia crítica entre el plano de prueba cargado y este electroscopio para influir en su tira levantada. Repita este procedimiento, pero esta vez acercando el plano de prueba cargado a un electroscopio cargado negativamente.

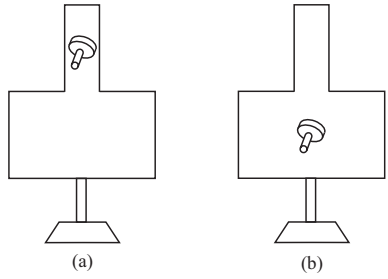


Figura 9.7: (a) Recogida de cargas desde el mango de un conductor asimétrico. (b) Recogida de cargas desde el centro de la tabla.

Ahora recoja las cargas en el centro de la tabla, como se muestra en la figura 9.7 (b). Acerque el plano de prueba cargado a los electroscopios cargados positiva y negativamente, midiendo de nuevo las distancias críticas necesarias para afectar a sus tiras levantadas.

Compare las distancias críticas en la primera situación (carga recogida del mango del electroscopio) y en la segunda situación (carga recogida del centro de la tabla). Compruebe que las distancias críticas en la primera situación son mayores que en la

segunda. Esto indica que la densidad de carga superficial es mayor en el mango del electroscopio que en su placa, como se muestra en la figura 9.3 (a).

La misma conclusión se aplica al conductor asimétrico en forma de gota. En otras palabras, la cantidad de carga recogida de la parte puntiaguda de la gota es mayor que la recogida de la parte roma, figura 9.8. La densidad de carga superficial es mayor en la parte puntiaguda de la gota que en la parte roma.

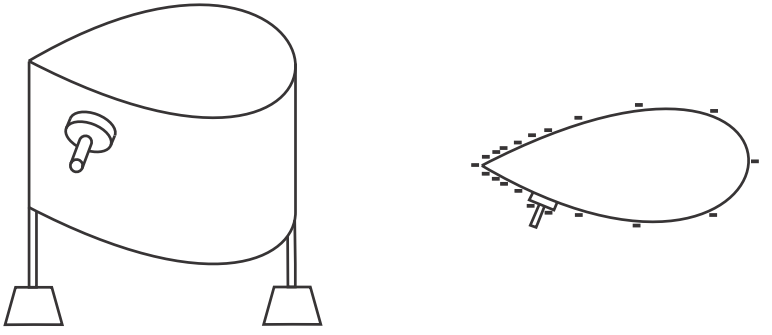


Figura 9.8: (a) Esquema de prueba en un conductor asimétrico. (b) Distribución cualitativa de las cargas en este conductor.

Experimento 9.4 — *Recoger cargas superficiales de una tira larga de papel*

El plano de prueba también puede recoger directamente las cargas procedentes de diferentes regiones del rectángulo de 10 cm de ancho y de 1 a 2 m de largo del experimento 9.2. Las finas tiras de papel de seda de este rectángulo impiden la recolección de cargas. Para evitar este problema, elimine todas las tiras de papel de seda. También puede eliminar solo la mitad de las tiras, es decir, las situadas en el lado derecho del rectángulo donde se colocará el colector. Conserve las tiras situadas a la izquierda del rectángulo para indicar cuándo este adquirió suficiente electrización. Después de acumular las cargas de cualquier región del rectángulo, acerque el colector a un electroscopio cargado positivamente y mida la distancia mínima necesaria para afectar a la tira de este electroscopio. Este procedimiento también se puede repetir con un electroscopio cargado negativamente. Compare estas distancias críticas para los planos de prueba cargados procedentes de diferentes regiones del rectángulo. Concluya que los colectores electrizados procedentes de los bordes del rectángulo adquirieron una mayor cantidad de carga que los procedentes de las regiones centrales del rectángulo electrizado, figura 9.5 (b).

A veces, los resultados de estos experimentos no son muy claros. En primer lugar, las densidades de carga superficial de varias regiones de un mismo conductor asimétrico pueden no ser muy diferentes entre sí. Además, no es fácil medir con precisión la

distancia crítica entre el plano de prueba cargado y un electroscopio electrizado para atraer o repeler su tira levantada. Para facilitar la medición de esta distancia, mueva lentamente el colector cargado de manera vaivén delante de la tira levantada del electroscopio cargado. De este modo, podrá observar más fácilmente cuándo se producen los movimientos coordinados de vaivén.

9.3 Gray y el efecto punta

Stephen Gray presentó en 1731 la primera descripción de lo que se conoce como «efecto punta».[3] Colocó finas hojas de latón en tres lugares diferentes: en el suelo, sobre un cilindro de madera de 30 cm de diámetro y 30 cm de altura, y también en la parte superior de un soporte cónico de 30 cm de altura, con un diámetro superior de 7.5 cm y un diámetro inferior de 11.4 cm. Intentó atraer estas hojas de latón con un tubo de vidrio electrizado que acercó a ellas. Cuando las hojas de latón estaban colocadas sobre este soporte cónico, observó que eran atraídas a una altura mucho mayor que cuando estaban colocadas sobre una mesa, y al menos tres veces más alta que cuando estaban colocadas sobre el suelo de una habitación. La figura 9.9 representa una descripción cualitativa de este experimento.

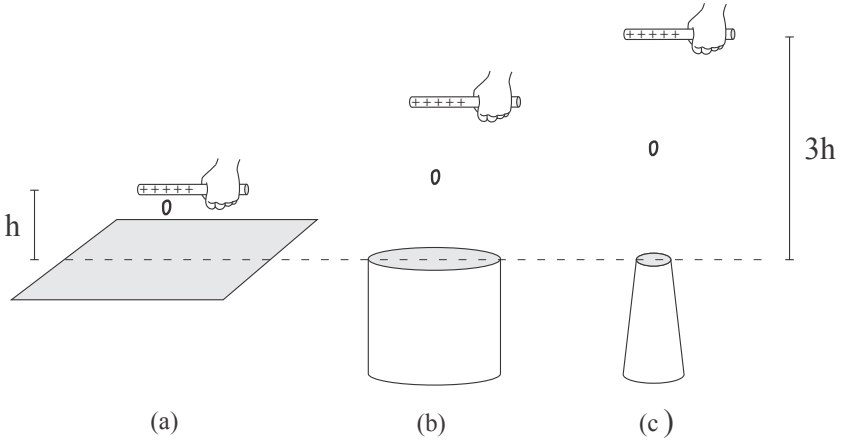


Figura 9.9: (a) Una hoja de latón ligera es atraída a una altura h desde su posición inicial en el suelo. (b) Se eleva más cuando se coloca sobre una mesa o sobre un cilindro conductor de 30 cm de diámetro. (c) Cuando se encuentra en la parte superior de un conductor cónico, es atraída tres veces más alto que cuando está en el suelo.

Experimento 9.5 — *Reproducir el experimento de Gray*

El experimento de Gray se puede reproducir fácilmente. Acerque una regla acrílica frotada con trozos de papel y mida la distancia crítica a la que los trozos de papel son

[3] Sección B.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

atraídos por la regla. En la primera situación, se colocan en el centro de una hoja de papel A4. En la segunda situación, se colocan en el centro de un cilindro de papel de 4 cm de diámetro y 10 cm de altura. En la tercera situación, se colocan en la parte superior de un cono de papel de 6 cm de base y 10 cm de altura. Corta la punta del cono y sustitúyela por un pequeño disco horizontal de papel de aproximadamente 0.5 cm de diámetro. Este disco se pega al cono. A continuación, puede colocar los trozos de papel sobre la parte superior plana de este cono para realizar el experimento. El cono y el cilindro deben estar hechos del mismo papel A4 que la hoja de papel plana de la primera situación. La hoja de papel de la primera situación debe colocarse sobre tres o cuatro columnas de papel o sobre tres o cuatro cilindros de papel. Para comenzar el experimento, esta hoja de papel, la parte superior del cilindro y la parte superior del cono deben estar a la misma altura, es decir, situadas en el mismo plano horizontal. Estos tres soportes deben estar separados entre sí.

Frote una regla acrílica y acérquela lentamente a los trozos de papel colocados sobre la hoja de papel plana. La regla debe estar en posición horizontal. Observe que comienzan a desplazarse hacia la regla cuando esta se encuentra a unos 2 cm por encima de la hoja de papel. Cuando los trozos de papel se colocan sobre el cilindro, comienzan a moverse cuando la regla se encuentra a 4 cm de la parte superior del cilindro. Cuando los trozos de papel se colocan sobre el cono, comienzan a moverse a una distancia crítica de aproximadamente 6 cm entre la regla y la punta del cono.

Estas distancias son solo aproximadas. Dependen del grado de electrización de la regla, de la humedad del aire, así como de la forma, el tamaño y el peso de los trozos de papel. En cualquier caso, este experimento muestra claramente que el movimiento de los trozos de papel se produce a distancias mayores cuando se colocan sobre superficies puntiagudas. Por el contrario, cuando se colocan sobre una hoja de papel plana, la regla acrílica frotada debe estar mucho más cerca de ellos para producir el movimiento de los trozos de papel. En estas tres situaciones, los trozos de papel se colocaron sobre soportes fabricados con el mismo material, es decir, una hoja de papel A4 conductora. Los diferentes valores de las distancias críticas necesarias para producir el movimiento solo pueden deberse a las diferentes formas de estos soportes.

Experimento 9.6 — *Regla eléctrica colocada debajo de una hoja, un cilindro y un cono de papel*

Coloque tres láminas de plástico (del tamaño de una hoja de papel A4) sobre 3 o 4 cilindros de papel de 10 cm de altura. Las tres láminas de plástico deben estar a la misma altura sobre el suelo. Coloque los tres soportes del experimento 9.5 (es decir, la hoja de papel, el cilindro de papel y el cono de papel) sobre estas tres láminas de plástico, de manera que sus bases estén a la misma altura, figura 9.10.

Coloque trozos de papel en el centro de estos tres soportes de papel. Frote la regla acrílica y colóquela debajo de la primera lámina de plástico. Muévala lentamente hacia arriba, siempre en posición horizontal. Los trozos de papel no se mueven, incluso cuando la regla acrílica frotada se acerca mucho a la lámina de plástico. Los trozos de papel situados en la parte superior del cilindro tampoco se mueven cuando la regla frotada situada debajo del cilindro se acerca a ellos. Sin embargo, cuando la regla

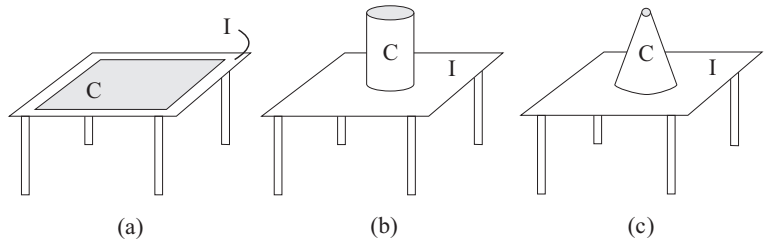


Figura 9.10: (a) Una hoja de papel conductor C colocada sobre una lámina de plástico aislante I. (b) Un cilindro conductor C colocado sobre una hoja aislante I. (c) Un cono conductor C colocado sobre una hoja aislante I.

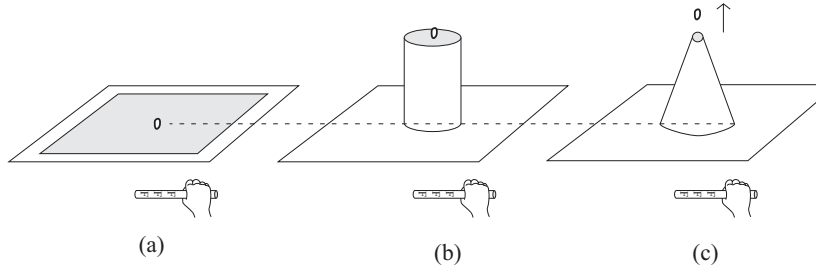


Figura 9.11: (a) Una regla eléctrica debajo de una hoja de papel. (b) Debajo de un cilindro de papel. (c) Debajo de un cono de papel. Los trozos de papel no se mueven en los casos (a) y (b), pero salen disparados del cono en el caso (c).

frotada situada debajo del cono se acerca a su base, los trozos de papel situados en su extremo salen disparados del cono, figura 9.11.

Los experimentos 9.5 y 9.6 pueden explicarse suponiendo que las partículas electrizadas se acumulan con densidades superficiales más altas en los extremos de los conductores. Supongamos que la regla acrílica frotada está electrizada negativamente. El papel se comporta como un conductor en los experimentos electrostáticos, mientras que el plástico se comporta como un aislante. Consideremos los trozos de papel que salieron disparados del cono en el experimento 9.6. El cono está polarizado por la regla electrizada situada debajo, volviéndose positivo en sus partes inferiores y negativo en sus partes superiores, figura 9.12 (a).

La densidad de carga superficial es mayor en la punta del cono que en su base. Un pequeño trozo de papel colocado en la punta del cono se carga negativamente. Es repelido por la regla negativa, atraído por las cargas positivas en la base del cono y repelido por las otras cargas negativas situadas en la punta del cono. La fuerza eléctrica neta que se ejerce sobre él se dirige hacia arriba. El componente principal de esta fuerza se debe a la acción repulsiva ejercida por las otras cargas negativas situadas cerca, en la punta del cono. En la situación ilustrada en la figura 9.12 (a), esta fuerza repulsiva neta es menor que el peso del trozo de papel, por lo que no sale disparado del cono. Cuando la regla se acerca aún más a la base del cono, la intensidad de su polarización aumenta. Hay más cargas positivas en su base, más cargas negativas en

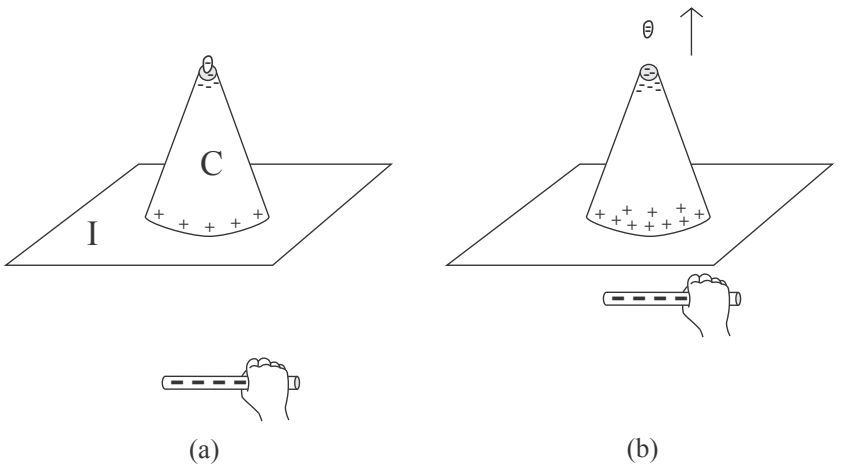


Figura 9.12: (a) Un cono conductor C sobre un soporte aislante I. El cono está polarizado debido a la presencia de un cuerpo negativo debajo. La densidad de carga superficial es mayor en el extremo que en la base. (b) Cuando la regla se acerca aún más al soporte aislante, el trozo de papel sale disparado del cono.

su vértice y también más cargas negativas en cada trozo de papel. Por lo tanto, la fuerza eléctrica neta hacia arriba que actúa sobre el trozo de papel también aumenta. Más allá de una distancia crítica de la regla, la fuerza eléctrica repulsiva neta que actúa sobre el trozo de papel será mayor que su peso. Entonces sale disparado del cono, figura 9.12 (b). Aunque el trozo de papel negativo es repelido por la regla negativa, la componente principal de la fuerza que lo proyecta fuera del cono proviene de la repulsión ejercida por las otras partículas con carga negativa situadas en la punta del cono. Estas cargas negativas están mucho más cerca del trozo de papel que la regla negativa.

Consideremos el cilindro de la figura 9.11 (b). Incluso cuando la regla se acercó a su base, el trozo de papel no fue proyectado. La razón de este comportamiento es que la densidad de carga superficial en la parte superior del cilindro no tenía la misma magnitud que la densidad de carga superficial en la parte superior del cono de la figura 9.11 (c) cuando la regla se encontraba a la misma distancia de su base. Por lo tanto, la fuerza repulsiva que actuaba sobre el trozo de papel cargado negativamente no era suficiente para superar su peso.

La situación es diferente que por el experimento 9.5. El cono de papel está ahora conectado a tierra debido a su contacto con el suelo. Cuando la regla electrizada se acerca, el cono tiende a polarizarse. Como está conectado a tierra, parte de su carga polarizada se neutraliza. Entonces adquiere una carga neta de signo opuesto al de la regla, figura 9.13 (a).

Esta electrización se concentra en la parte superior del cono y, por lo tanto, en los trozos de papel situados en el extremo del cono. Un trozo de papel electrizado positivamente se ve entonces sometido a la acción de dos fuerzas, a saber, una fuerza de atracción ejercida por la regla negativa y una fuerza de repulsión ejercida por las

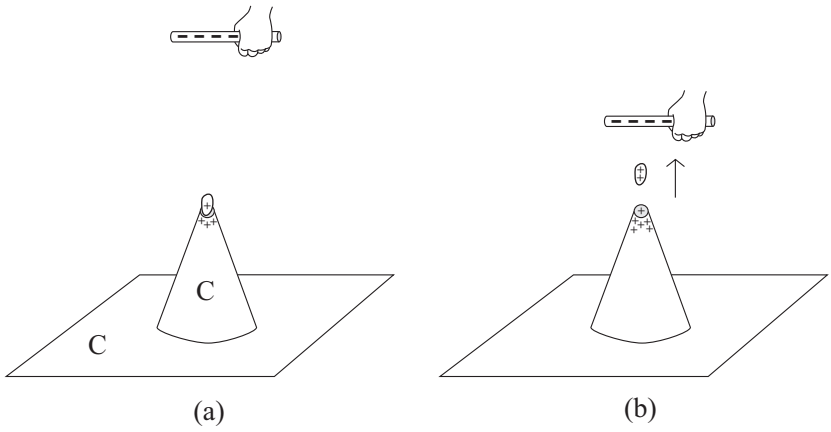


Figura 9.13: (a) Un cono conductor C colocado sobre una superficie conductora C, que conecta el cono a tierra. El trozo de papel positivo es atraído por la regla negativa y repelido por la punta positiva del cono conectado a tierra. (b) Cuando la regla se acerca al cono, la cantidad de cargas positivas en el papel aumenta, al igual que la cantidad de cargas positivas en la punta del cono. El trozo de papel se desplaza hacia la regla.

otras partes positivas de la parte superior del cono. Estas dos fuerzas se dirigen hacia arriba, mientras que el peso del trozo de papel se dirige hacia abajo. A medida que la regla negativa se acerca al cono, su extremo se vuelve cada vez más positivo. Lo mismo ocurre con los trozos de papel situados en su extremo. Por debajo de una cierta distancia crítica, las dos fuerzas ascendentes superan el peso descendente del trozo de papel. Este se desplaza entonces hacia la regla, figura 9.13 (b).

9.4 La intensificación del efecto del ámbar

El experimento más antiguo de electrostática es el denominado «efecto del ámbar», similar al experimento 1.1. Existen varios procedimientos que permiten aumentar su magnitud. Estos procedimientos se deducen de lo visto en el volumen 1 de esta obra y en los experimentos anteriores del volumen 2. A continuación enumeramos algunos de estos procedimientos que pueden hacer que este efecto sea más visible, alcance mayores distancias o se produzca con mayor intensidad, a saber:

- Realizar el experimento en un clima frío y seco.
- El material que se frotará para atraer cuerpos ligeros debe ser aislante. De esta manera, no se descargará al entrar en contacto con las manos. Cuando este material es conductor, debe aislarse para evitar la pérdida de la carga adquirida debido a la conexión a tierra con las manos. Por ejemplo, puede fijarse previamente a un mango aislado. Entonces, sujetaremos el material únicamente por este mango, evitando tocarlo directamente con las manos.

- Pruebe varios materiales aislantes diferentes. Frota con el cabello, por ejemplo, una pajita de plástico, una regla de acrílico, un tubo de PVC, un plato de poliestireno, etc. Identifica qué cuerpo, después de haber sido frotado, atraerá una mayor cantidad de trozos de papel.

- Pruebe diferentes sustancias utilizadas para frotar cada uno de estos cuerpos. Frote, por ejemplo, un tubo de PVC con el cabello, una servilleta de papel, una bolsa de plástico, un paño de algodón, etc. Identifique la sustancia que producirá una mayor electrización del cuerpo.

- Aumente tanto como sea posible la amplitud de la densidad de carga superficial del material que se va a frotar. Para ello, lo más importante es frotarlo enérgicamente con el cabello o una hoja de papel. Cuanto más rápido se frote, mayor será la densidad de carga adquirida en su superficie.[4]

- Los cuerpos ligeros que se van a atraer deben, preferiblemente, comportarse como conductores. Ejemplos de cuerpos conductores para experimentos electrostáticos son trozos de papel, pequeñas piezas de papel de aluminio, un hilo de algodón, etc. Consideremos una regla de plástico electrizada que atrae dos cuerpos ligeros del mismo peso, forma y tamaño, a saber, un conductor y un aislante. La fuerza ejercida por la regla sobre el conductor es mucho mayor que la ejercida sobre el aislante, suponiendo que ambos se encuentren a la misma distancia de la regla. Esta atracción más fuerte se puede observar al notar que el conductor se acelera más que el aislante cuando ambos se sueltan en reposo. Además, el plástico electrizado debe acercarse al aislante en lugar del conductor para que cada uno de ellos comience a moverse hacia el plástico frotado.

- Los cuerpos que serán atraídos por el plástico frotado deben colocarse preferiblemente sobre una superficie conductora. De hecho, un pequeño trozo de papel es atraído con mayor fuerza cuando se encuentra sobre un conductor que cuando se encuentra sobre un aislante.

- Los cuerpos ligeros deben colocarse inicialmente sobre un soporte puntiagudo. Un pequeño trozo de papel es atraído con mayor fuerza cuando se encuentra sobre un soporte puntiagudo que cuando se encuentra sobre un soporte romo.

[4] [SGS31] y [Hei99, p. 451, nota 6].

Capítulo 10

El equilibrio eléctrico y el instrumento que indica la diferencia de potencial

10.1 El conductor en equilibrio eléctrico

Los cuerpos naturales pueden dividirse o clasificarse en dos grupos fundamentales denominados conductores y aislantes. La principal diferencia entre estos cuerpos radica en que los conductores poseen partículas electrizadas móviles que pueden desplazarse a través del conductor y a lo largo de su superficie. Los aislantes, por el contrario, no tienen partículas electrizadas libres que puedan desplazarse a través de todo el volumen del material. Sus partículas móviles solo pueden desplazarse dentro de las moléculas que componen el aislante. Por lo tanto, los aislantes no permiten el paso o el flujo de partículas electrizadas a través de su cuerpo ni a lo largo de su superficie. Recordamos una vez más al lector que el comportamiento conductor o aislante de un cuerpo depende no solo de su naturaleza o composición química, sino también de la diferencia de potencial que se puede aplicar a sus extremos.

Supongamos un conductor C en reposo con respecto al suelo. Puede estar aislado eléctricamente del suelo o de otros conductores. También puede estar conectado al suelo o a otros conductores mediante sustancias conductoras. El conductor puede tener una carga neta positiva, una carga neta negativa o una carga neta nula. Puede estar solo o sometido a la acción de otros cuerpos electrizados cercanos (por ejemplo, puede estar polarizado debido a un cuerpo cargado cercano). En esta sección se presenta la definición de equilibrio eléctrico para este conductor, válida en todas estas situaciones.

Definición 10.1

Consideremos un conductor electrizado en reposo con respecto al suelo, sometido a la acción eléctrica de otros cuerpos o totalmente aislado. Cuando la distribución de su carga permanece constante en el tiempo, se dice que la electricidad que hay en él está «en equilibrio» y que el conductor está «en equilibrio eléctrico». Por el contrario, cuando la distribución de su carga cambia con el tiempo, se dice que la electricidad que se ejerce sobre él está «en desequilibrio» o «desequilibrada», mientras que se dice que el conductor está en «desequilibrio eléctrico» o «eléctricamente desequilibrado».

William Thomson (1824–1907), o Lord Kelvin, presentó una definición similar en 1848:[1,2]

Equilibrio eléctrico.

66. Cuando un cuerpo en reposo se electriza y, sometido a la acción eléctrica de otros cuerpos o totalmente aislado, la distribución de su carga permanece inalterada, se dice que la electricidad que lo recubre está en equilibrio.

La densidad de carga superficial en cada punto de un conductor puede indicarse indirectamente mediante una fina tira de papel de seda conectada a ese punto. Cuanto mayor sea la desviación de la tira, mayor será la densidad de carga superficial. Cuando los ángulos de inclinación con respecto a la vertical de todas las tiras conectadas al cuerpo permanecen constantes en el tiempo, se dice que está en equilibrio eléctrico. Por el contrario, cuando la inclinación de una tira varía en función del tiempo, se dice que el conductor está en desequilibrio eléctrico o que está desequilibrado.

Ejemplos de desequilibrio eléctrico:

- Cuando un conductor se está cargando. Tomemos, por ejemplo, un electroscopio inicialmente descargado. Se encuentra en desequilibrio eléctrico cuando se raspa una regla de plástico electrizada sobre el borde del cartón y se levanta su tira de papel de seda.

- Cuando un conductor se descarga. Tomemos, por ejemplo, un electroscopio inicialmente cargado. Toque su cartón con un dedo. El electroscopio se descarga debido a la conexión a tierra. Se encuentra en desequilibrio cuando su tira se baja.

- Tomemos un conductor aislado de la tierra. El conductor se polariza por la presencia de un cuerpo electrizado cercano. El grado o la intensidad de esta polarización varía con el tiempo cuando el cuerpo electrizado se acerca o se aleja del conductor. El conductor está desequilibrado durante estos movimientos del cuerpo electrizado cercano.

[1] [Tho84d, p. 46, §66].

[2] *Electrical Equilibrium.* 66. When a body held at rest is electrified, and when, being either subject to electrical action from other bodies, or entirely isolated, the distribution of its charge remains permanently unaltered, the electricity upon it is said to be in equilibrium.

- Cuando dos electroscopios están conectados por un conductor defectuoso o imperfecto, como en los experimentos de la sección 3.3. Supongamos, por ejemplo, dos electroscopios inicialmente descargados conectados por un alambre conductor imperfecto. Cuando se raspa un plástico frotado en el borde del cartón de un electroscopio, su tira se levanta casi inmediatamente, mientras que la tira del otro conductor se levanta lentamente.

- Consideremos un electroscopio inicialmente electrizado y aislado de otro electroscopio inicialmente descargado. Conectemos sus cartones mediante un alambre conductor imperfecto. Los dos electroscopios se desequilibrarán, mientras que la tira del primer electroscopio bajará y la del segundo subirá.

10.2 El potencial eléctrico de un conductor

La temperatura es la magnitud que caracteriza el equilibrio en física térmica o termología. El instrumento que mide la temperatura se llama termómetro. En lo que respecta a la estática de líquidos, gases y fluidos, la magnitud que caracteriza el equilibrio mecánico se llama presión. La presión atmosférica se mide con un barómetro, mientras que un manómetro mide las presiones en general.

En electrostática, la magnitud que caracteriza el equilibrio se denomina «potencial eléctrico» o «potencial electrostático», y se representa con la letra griega ϕ. Podemos entonces presentar otra definición:

Definición 10.2

Todos los puntos dentro y en la superficie de un conductor homogéneo en equilibrio eléctrico tienen el mismo potencial eléctrico, representado por la letra ϕ. Además, este potencial eléctrico es constante en el tiempo para un conductor en equilibrio.

A continuación presentamos una breve información sobre el potencial.[3] El concepto de potencial eléctrico fue introducido por Cavendish (1731–1810) en 1771, aunque no utilizó el término «potencial». La función potencial fue introducida como concepto matemático en la gravitación por Lagrange (1736–1813) en 1777. Laplace (1749–1827) obtuvo en 1782 la ecuación que satisfacía esta función potencial en el espacio vacío, publicando sus resultados en 1785. Poisson (1781–1840) introdujo la función potencial en el electromagnetismo en 1811. En 1813, generalizó la ecuación de Laplace, obteniendo una ecuación más general que también era válida para regiones que contenían materia y cargas libres. El nombre «potencial» fue introducido por Green (1793–1841) en 1828.

Esta obra analiza el instrumento que permite indicar la igualdad o la diferencia de potencial entre dos conductores. También aborda los aspectos prácticos relacionados con el funcionamiento de este instrumento. Esta obra no tratará las propiedades matemáticas de la función potencial.

[3] [Tho84b, p. 367], [Max54a, artículo 16, p. 15], [Whi73a, pp. 54–55 y 61], [Roc89], [Ass92a, p. 18], [Hei99, pp. 449 y 498–500] y [Ass15a, p. 22].

10.3 Electroscopio con caja conductora

Esta sección presenta un instrumento que indica cuándo dos conductores tienen el mismo potencial electrostático o cuándo tienen potenciales diferentes.[4] Cuando este aparato está bien calibrado, también permite medir esta diferencia de potencial.

Supongamos dos conductores C_1 y C_2 aislados entre sí y de la tierra. Supongamos además que cada conductor está en equilibrio eléctrico con potenciales ϕ_1 y ϕ_2, respectivamente. ¿Qué instrumento es capaz de indicar que $\phi_1 = \phi_2$ o que $\phi_1 \neq \phi_2$? El electroscopio utilizado en el volumen 1 de esta obra, representado en la sección 2.2, figuras 2.2 y 2.3, indica la densidad de carga superficial. No indica el potencial eléctrico. Cuanto mayor sea la densidad de carga superficial en la ubicación de la fina tira de papel de seda, mayor será en relación con el cartón. Una tira caída o vertical indica una densidad de carga superficial nula o muy baja.

El capítulo 7 analizó la distribución de las cargas en las paredes internas y externas de un conductor hueco. Se trataba de un análisis indirecto mediante finas tiras de papel de seda. Cuanto mayor era la desviación de la tira, mayor era la densidad de carga superficial en su ubicación. El capítulo 7 también presentaba un análisis directo de las densidades de carga superficial. Recogimos parte de la electricidad situada en las paredes interna y externa de un conductor. Para ello, se utilizaron colectores de carga o planos de prueba.

En el caso del experimento 7.1, figura 7.1, por ejemplo, las cargas se distribuyen únicamente en la pared externa de una carcasa cilíndrica electrizada. No hay ninguna carga en la pared interna. Este conductor electrizado de papel o cartón está en equilibrio. Sus paredes interna y externa están en contacto eléctrico a través del propio papel. A pesar de la existencia de este material conductor que conecta las paredes interna y externa, no hay densidad de carga superficial en la pared interna, mientras que la pared externa tiene una densidad de carga diferente de cero. ¿Qué instrumento podría indicar que las paredes interna y externa tenían el mismo potencial?

Este importante instrumento consta de dos partes conductoras, A y B, aisladas eléctricamente entre sí, figura 10.1.

Normalmente, las partes A y B están compuestas únicamente por materiales conductores. El instrumento indicará la diferencia de potencial entre sus partes A y B. La parte A contiene el indicador de diferencia de potencial. La parte B es una carcasa, jaula o caja conductora que rodea la parte A.

El indicador de diferencia de potencial situado en la parte A suele ser el ángulo de apertura entre dos tiras o hojas móviles. También puede ser el ángulo de apertura entre una parte fija del instrumento y una tira o hoja móvil. La parte A en esta última configuración puede ser, por ejemplo, el electroscopio habitual de las figuras 2.2 y 2.3. La diferencia de potencial entre las partes A y B vendrá indicada por el ángulo de apertura de la fina tira de papel de seda con respecto al cartón fijo.

Este instrumento se denominará aquí «electroscopio de caja conductora». La figura 10.1 ilustra un modelo de este instrumento. La parte A del instrumento se representa en la figura 10.1 (a). Consta de un disco horizontal, una varilla o eje vertical y dos tiras móviles que se pueden abrir. La parte B del instrumento se representa en

[4] [Tho84a], [Tho84c], [Per44] y [TP11].

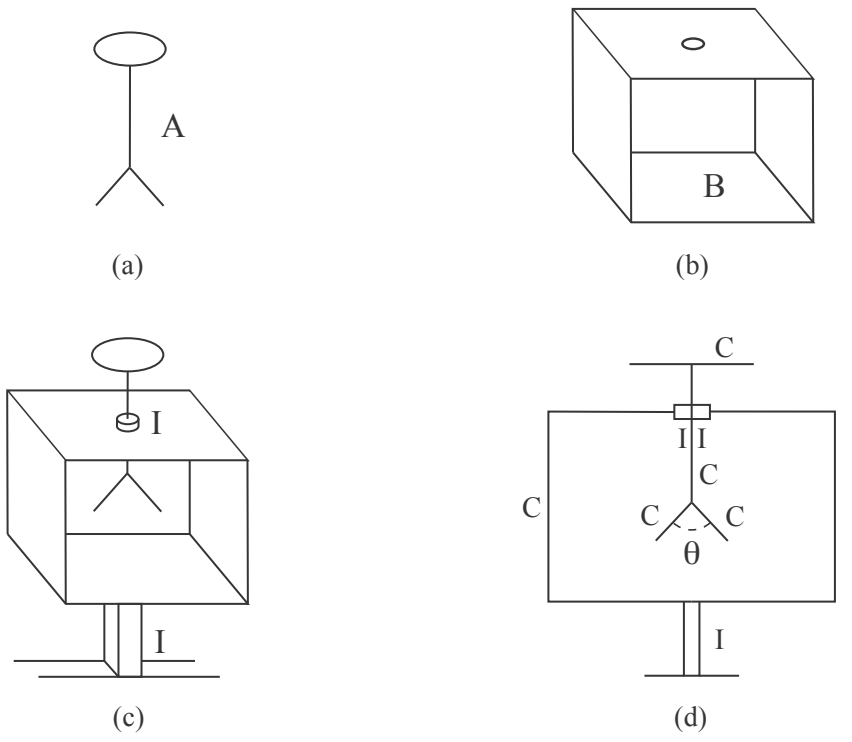


Figura 10.1: Electroscopio con caja conductora. (a) Parte conductora A. (b) Parte conductora B. (c) Vista en perspectiva. Hay un aislante I entre las partes A y B. Hay otro aislante I entre la parte B y la tierra. (d) Instrumento visto de perfil. Las letras C indican los conductores, las letras I los aislantes, mientras que la letra θ indica el ángulo de apertura entre las tiras móviles.

la figura 10.1 (b). Se trata de una caja conductora con un orificio en la tapa superior. Las partes A y B están fabricadas únicamente con materiales conductores. La figura 10.1 (c) representa el instrumento construido. Cuenta con un aislante I que conecta la parte A con la parte B, manteniendo su aislamiento eléctrico. Hay otro aislante I que aísla eléctricamente la parte B del suelo. La figura 10.1 (d) ilustra el instrumento visto de perfil. Las letras C indican los conductores, las letras I los aislantes, mientras que la letra θ indica el ángulo de apertura indicado por este electroscopio.

Los experimentos de los capítulos 7 y 8 presentan los principios que justifican el mecanismo de funcionamiento de este aparato. Es un instrumento adecuado para indicar la diferencia de potencial entre sus partes A y B.

La figura 10.2 ilustra un electroscopio con caja conductora construido a partir de los electroscopios simples de las figuras 2.2 y 2.3. La carcasa es una tira cilíndrica conductora de papel o cartón, sostenida por pajitas aislantes. El aislante entre las partes A y B de este electroscopio es simplemente aire. Las dos partes están aisladas del suelo por pajitas de plástico.

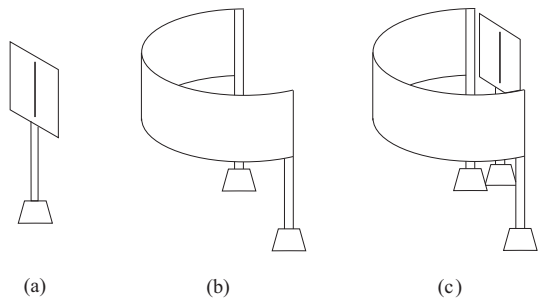


Figura 10.2: Electroscopio con caja conductora. (a) La parte A es un electroscopio simple compuesto por una tira de papel de seda pegada a un cartón. Se sostiene con una pajita de plástico. (b) La parte B es una carcasa cilíndrica abierta de papel o cartón. Se sostiene con pajitas de plástico. (c) Electroscopio montado.

La figura 10.3 representa otro electroscopio con una caja conductora construido a partir del electroscopio simple de las figuras 2.2 y 2.3. La carcasa es ahora una caja de zapatos hecha de cartón conductor. Se eliminaron dos lados y medio de la caja. Hay una parte aislante A entre la parte B. La parte A está aislada del suelo por la pajita de plástico, mientras que la parte B está aislada por una placa de poliestireno.

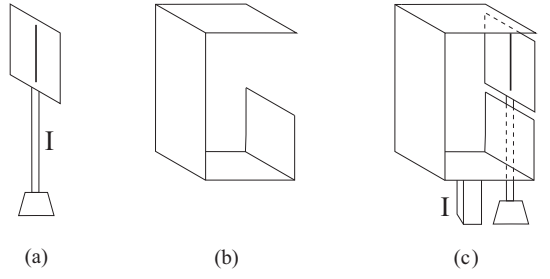


Figura 10.3: Otro ejemplo de electroscopio con caja conductora. (a) La parte A es un electroscopio simple compuesto por una tira de papel de seda pegada a un cartón. Se sostiene mediante una pajita de plástico I. (b) La parte B es una caja de zapatos a la que le faltan dos lados y medio. (c) Electroscopio montado sostenido por una placa aislante I.

La figura 10.4 ilustra otro electroscopio con una caja conductora. La letra C designa los conductores, I los aislantes y θ el ángulo de apertura.

La figura 10.5 (a) y (b) representa un electroscopio clásico con una caja conductora. Tiene dos tiras o hojas móviles. La figura 10.5 (c) y (d) ilustra un electroscopio con una caja conductora que tiene una sola tira móvil. Los conductores se representan con las letras C, los aislantes con las letras I, mientras que el ángulo de apertura se indica con la letra θ.

El aislante entre las partes A y B puede ser aire, un trozo de poliestireno, plástico o PVC. Algunos manuales mencionan un tapón de vino que conecta las partes A y B. No

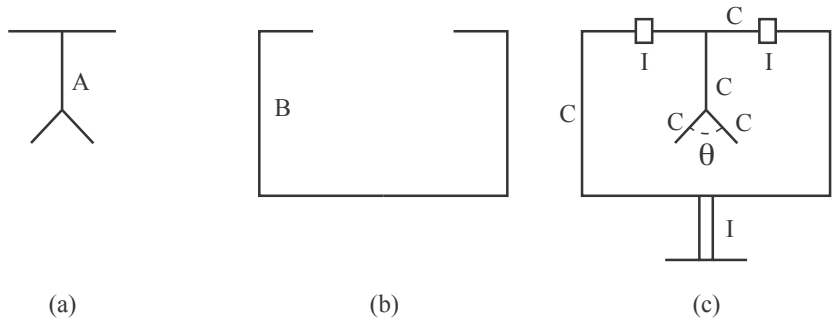


Figura 10.4: Electroscopio con caja conductora visto de perfil. (a) Parte conductora A. (b) Parte conductora B. (c) Instrumento montado. Los conductores se representan con las letras C, los aislantes con las letras I, mientras que el ángulo de apertura se indica con θ.

es una buena opción, ya que el corcho se comporta como un conductor electrostático, tal y como se indica en la sección 3.1. Cualquier sustancia que conecte las partes A y B de este electroscopio debe someterse a pruebas previas. Solo deben utilizarse aislantes. Muchos tipos de caucho, por ejemplo, se comportan como conductores y no deben utilizarse como aislantes en este aparato.

En muchos electroscopios comerciales o educativos, las partes conductoras son de metal. En este libro, el instrumento se fabricará con papel, cartón y tiras de papel de seda.

En un instrumento de precisión, la parte B debe envolver o cubrir casi por completo la parte A. Sin embargo, para poder ver el ángulo de apertura, debe haber un agujero o una abertura en la parte B. Lo ideal es que el tamaño de este agujero sea pequeño, para que no afecte a la diferencia de potencial indicada por el instrumento. En este libro, utilizaremos este aparato únicamente como indicador cualitativo de las diferencias de potencial, sin preocuparnos por las mediciones cuantitativas. Por lo tanto, los electroscopios pueden tener grandes aberturas en la parte B.

Normalmente, dos electrodos conductores están conectados a las partes A y B de cualquier electroscopio con caja conductora. El electrodo denominado principal, *PE*, conecta la parte A a un determinado conductor C_1, mientras que el electrodo denominado secundario, *SE*, conecta la parte B a otro conductor C_2, figura 10.6.

En este ejemplo, el ángulo de apertura θ de la parte A indicará la diferencia de potencial entre los conductores C_1 y C_2. Cuando $\theta = 0$, los conductores C_1 y C_2 tendrán el mismo potencial. Cuando $\theta \neq 0$, los conductores C_1 y C_2 tendrán potenciales diferentes. Cuanto mayor sea el valor de θ, mayor será su diferencia de potencial. Lo ideal sería que las partes A y B del electroscopio tuvieran una superficie pequeña en comparación con la de los conductores C_1 y C_2. En este caso, no tendrán una influencia significativa en los potenciales que se van a medir.

Estos dos electrodos también pueden conectarse a diferentes partes de un mismo conductor para verificar que todos los puntos de este conductor tienen el mismo potencial.

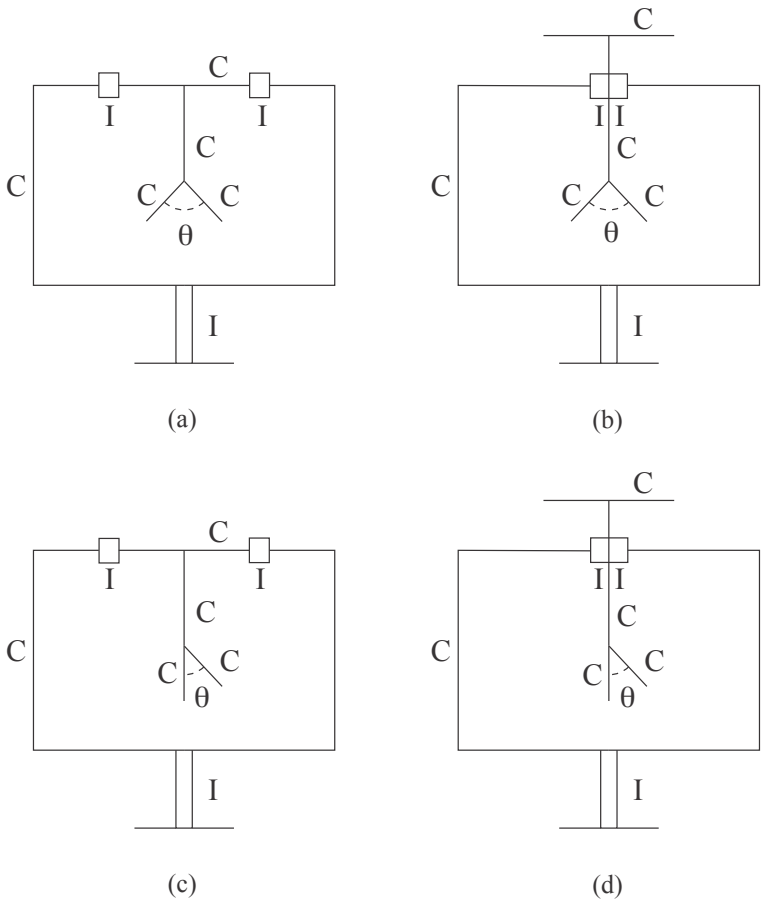


Figura 10.5: Electroscopio con cajas conductoras. (a) y (b): Electroscopio con dos tiras móviles. (c) y (d): Electroscopio con una sola tira móvil que se puede abrir con respecto a una parte fija.

En muchas situaciones, el conductor C_2 será la propia Tierra, de modo que la caja conductora del electroscopio estará conectada a tierra. En este caso, el ángulo de apertura indicará la diferencia de potencial entre el conductor C_1 y la tierra. El potencial de la Tierra se define generalmente como cero. La parte B puede conectarse a tierra mediante el electrodo secundario, como se muestra en la figura 10.7 (a). Cuando la parte B está soportada por una placa conductora conectada a tierra, se conectará automáticamente a tierra. El electrodo secundario ya no será necesario, como se muestra en la figura 10.7 (b).

Normalmente, los electrodos que conectan el electroscopio a los conductores C_1 y C_2 son alambres metálicos. Debemos manipularlos para realizar estas conexiones. Para ello, los electrodos deben estar aislados del suelo para evitar la descarga de los conductores. El aislamiento de los alambres de cobre trenzados que se venden

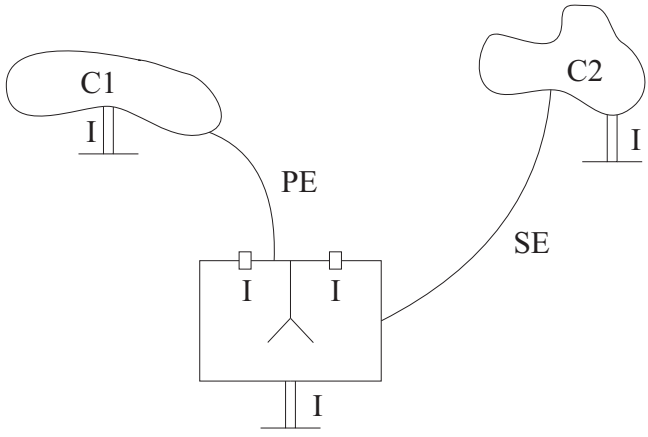


Figura 10.6: El electrodo principal *PE* conecta la parte A del electroscopio al conductor C_1, mientras que el electrodo secundario *SE* conecta la parte B al conductor C_2.

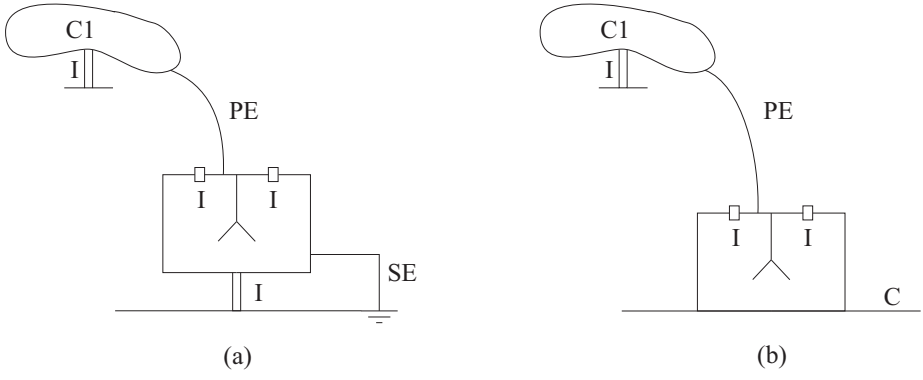


Figura 10.7: Electroscopio con carcasa conectada a tierra. (a) Electrodo secundario conectado a tierra. (b) Carcasa sobre una placa conductora C conectada a tierra.

habitualmente en las tiendas de electricidad suele ser de polietileno o PVC. Son buenos aislantes para diferencias de potencial de hasta unos 300 V. En los experimentos electrostáticos, sin embargo, nos enfrentamos a tensiones que pueden alcanzar los 1000 V o 10 000 V. Estos plásticos flexibles que recubren los alambres de cobre no son buenos aislantes para los experimentos electrostáticos. Por lo tanto, cuando utilice estos alambres aislados como electrodos, no los toque directamente con las manos. Manipule estos electrodos con cuidado. Lo ideal es fijar una parte de estos alambres con una regla acrílica o un tubo de PVC. Enrolle, por ejemplo, una parte del alambre en la regla de plástico, como se muestra en la figura 10.8 (a). De este modo, la mano solo tocará la regla o el tubo de PVC, pero no el alambre. Conecte de esta manera la parte A del electroscopio al conductor C_1 sin descargar este conductor.

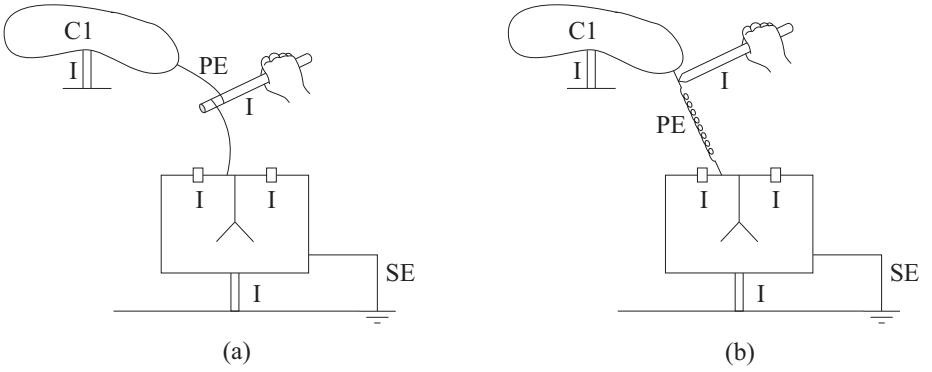


Figura 10.8: Electroscopio con una carcasa conectada a tierra y cuyo electrodo principal está conectado a un tubo aislante. (a) Alambre conductor enrollado alrededor del tubo. (b) Resorte conductor conectado al tubo.

También puede manipular estos electrodos mediante otro procedimiento. Para ello, utilice alambres conductores enrollados, como resortes, que se pueden comprimir o estirar. Fije el extremo de este alambre a una regla acrílica o a un tubo de PVC,[5] como se muestra en la figura 10.8 (b).

Para convertir este electroscopio en un electrómetro, sería necesario calibrarlo, de modo que cada ángulo de apertura correspondiera a una diferencia de potencial conocida. En este trabajo no trataremos este problema. El electroscopio se utilizará únicamente para saber si dos puntos tienen el mismo potencial o potenciales diferentes. También indicará de forma cualitativa la amplitud de la diferencia de potencial mediante el tamaño del ángulo de apertura. Un ángulo grande indica una gran diferencia de potencial, mientras que un ángulo pequeño indica una pequeña diferencia de potencial.

10.4 Experimentos con el electroscopio con caja conductora

10.4.1 El electroscopio muestra que todas las partes de un conductor en equilibrio tienen el mismo potencial

Esta subsección describe algunos experimentos relacionados con la igualdad de potencial entre diferentes partes de un único conductor electrizado en equilibrio. Los experimentos que realizamos utilizaron el electroscopio simple rodeado por una carcasa cilíndrica conductora abierta como la de la figura 10.2, o el electroscopio simple rodeado por una caja de zapatos conductora como la de la figura 10.3. La diferencia de potencial se indicaba cualitativamente mediante el ángulo de apertura entre la tira de papel de seda y el cartón del electroscopio. Sin embargo, las imágenes de los experimentos de esta sección se realizaron con el electroscopio de la figura 10.6. Este último

[5] [Per44, Fig. 1277, p. 1421].

electroscopio tiene dos tiras móviles, mientras que el que utilizamos solo tenía una. En cualquier caso, es más fácil y didáctico representar los resultados de los experimentos con el electroscopio de la figura 10.6 que con el de la figura 10.3.

Primero realizamos algunos experimentos que muestran que este instrumento indica que dos partes arbitrarias de un único conductor electrizado en equilibrio tienen realmente el mismo potencial. Más adelante, mostramos algunas condiciones experimentales que hacen que el potencial de la parte A del electroscopio sea diferente del potencial de su parte B.

Experimento 10.1 — *Tocar las paredes internas y externas de una carcasa cilíndrica electrizada*

Comience con una carcasa cilíndrica electrizada como la de la figura 7.1 (b). Las cargas netas se distribuyen únicamente sobre la superficie externa del cilindro, como indican las tiras de papel de seda levantadas. Este hecho también se pone de manifiesto cuando un plano de prueba toca sus superficies interna y externa. A continuación, puede comprobar la carga adquirida por este colector. Supongamos que en el presente experimento no hay tiras de papel de seda en la pared interna de la carcasa cilíndrica y solo hay una tira en su pared externa. Cuando la carcasa se electriza, esta tira se levanta. Conecte el electrodo principal del electroscopio de la figura 10.6 a la pared interna del cilindro electrizado, mientras que el electrodo secundario se conecta a la pared externa. Las tiras de papel de seda de la parte A del electroscopio permanecen abajo, con $\theta = 0$. Por lo tanto, las paredes interna y externa de una carcasa cilíndrica electrizada tienen el mismo potencial, figura 10.9.

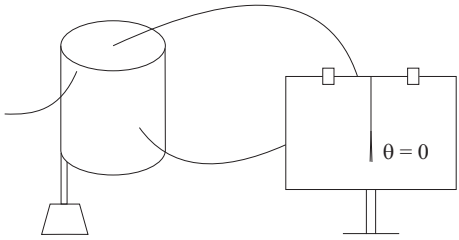


Figura 10.9: La parte A del electroscopio está conectada a la pared interna de una carcasa cilíndrica electrizada y la parte B está conectada a la pared externa. El electroscopio no presenta ningún ángulo de apertura, lo que indica que estas dos paredes tienen el mismo potencial.

Este hecho también se puede demostrar utilizando el electroscopio conectado a tierra de la figura 10.7. Para ello, conecte el conductor principal a la pared interna del cilindro electrizado y observe el ángulo de apertura θ_1 de las tiras de la parte A, figura 10.10 (a). A continuación, conecte el electrodo principal a la pared externa del cilindro electrizado y observe el ángulo de apertura θ_2 de las tiras de la parte A, figura 10.10 (b). Después de realizar este experimento, se observa que $\theta_1 = \theta_2 \equiv \theta$. El símbolo «≡» indica una definición. Por lo tanto, las paredes interna y externa del cilindro electrizado tienen el mismo potencial con respecto al suelo. No hay diferencia

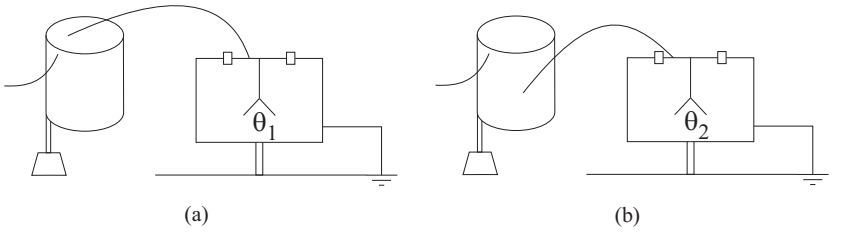


Figura 10.10: (a) Electroscopio conectado a tierra cuya parte A está conectada a la pared interna de una carcasa cilíndrica electrizada. Ángulo de apertura θ_1. (b) Misma configuración, pero con la parte A conectada a la pared externa. Ángulo de apertura θ_2. La apertura es idéntica en ambos casos, es decir, $\theta_1 = \theta_2$.

de potencial entre las paredes interna y externa, es decir, $\theta_1 - \theta_2 = 0$. Por lo tanto, se encuentran en equilibrio eléctrico.

También puede demostrar este hecho de otra manera. Para ello, invierta el electrodo que está conectado a tierra. Conecte la parte A a tierra a través del electrodo principal. El electrodo secundario se conecta primero a la pared interna de la carcasa cilíndrica electrizada. Observe el ángulo de apertura θ_1, figura 10.11 (a). A continuación, el electrodo secundario se conecta a la pared externa de la carcasa. Observe el ángulo de apertura θ_2, figura 10.11 (b). Al comparar estos dos ángulos, concluimos que en ambas situaciones el ángulo de apertura es el mismo, es decir, $\theta_1 = \theta_2 = \theta$. Por lo tanto, las paredes interna y externa están en equilibrio al mismo potencial, ya que observamos que $\theta_1 - \theta_2 = 0$.

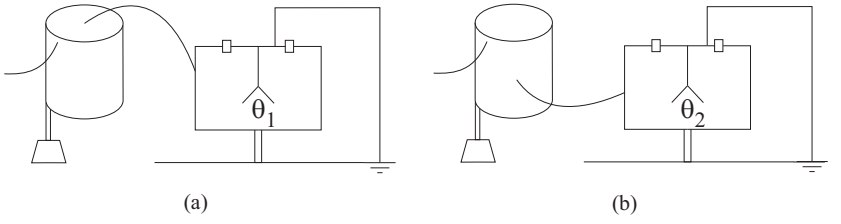


Figura 10.11: (a) Electroscopio conectado a tierra por la parte A, mientras que la parte B está conectada a la pared interna de una carcasa cilíndrica electrizada. Ángulo de apertura θ_1. (b) Misma configuración con la parte B conectada a la pared externa. Ángulo de apertura θ_2. En ambos casos, el ángulo de apertura es idéntico, es decir, $\theta_1 = \theta_2$.

La configuración de la figura 10.11 es muy interesante. Muestra un ángulo de apertura $\theta \neq 0$ para las tiras móviles de la parte A incluso cuando esta parte A está conectada a tierra, siempre que la parte B tenga un potencial diferente al de la parte A. Aunque la parte A conectada a tierra tiene un potencial nulo, la parte B del electroscopio está conectada a una carcasa cilíndrica electrizada que tiene un potencial diferente de cero.

Experimento 10.2 — *Tocar diferentes puntos de un conductor asimétrico*

Otra experiencia de este tipo utiliza una tira conductora asimétrica, como el conductor en forma de gota de la figura 9.6 (b). Cuando este conductor se electriza, se forma un gradiente de densidad de carga superficial a lo largo de su superficie, más importante en las regiones puntiagudas y más débil en las regiones romas, como se muestra en un plano de prueba, véase la figura 9.8. Pegue el extremo superior de una tira de papel de seda en la pared externa de este conductor para indicar cuándo está electrizado. Una vez cargada, esta tira se levanta. Conecte el electrodo principal de un electroscopio conectado a tierra a cualquier punto de la pared externa del conductor, observando siempre el mismo ángulo de apertura θ. Las densidades de carga superficial σ son diferentes en los puntos 1, 2 o 3, es decir, $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$. A pesar de ello, el ángulo de apertura es el mismo en todos estos puntos, es decir, $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 \equiv \theta$, figura 10.12.

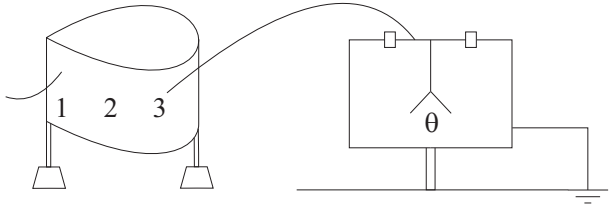


Figura 10.12: Electroscopio conectado a tierra que indica el mismo ángulo de apertura θ, independientemente de si el electrodo principal está conectado al punto 1, 2 o 3 del conductor en forma de gota electrizado.

Experimento 10.3 — *Tocar diferentes puntos de un largo rectángulo electrizado*

Realice una prueba similar utilizando el rectángulo electrizado de los experimentos 9.2 y 9.4, figura 9.4. Comience por electrizar fuertemente el rectángulo, de manera que las tiras de papel de seda se levanten visiblemente. La densidad de carga superficial es mayor en los bordes del rectángulo que en el centro, figura 9.5. Conecte el electrodo principal de un electroscopio conectado a tierra a cualquier punto del rectángulo. Observe que el ángulo de apertura θ del electroscopio será siempre el mismo, independientemente del lugar al que se conecte el electrodo. Esto indica que todos estos puntos tienen el mismo potencial eléctrico. Existe un gradiente de densidad de carga superficial, mayor en los bordes del rectángulo y menor en sus regiones centrales. Pero el potencial eléctrico es el mismo en todos los puntos, figura 10.13.

Este procedimiento también se puede invertir. Conecte la parte A del electroscopio a tierra y conecte el electrodo secundario a los puntos 1, 2 o 3 del rectángulo electrizado. El ángulo de apertura θ será siempre el mismo, independientemente de la ubicación en la que se conecte el electrodo secundario, figura 10.14 (a).

Aísle este electroscopio del suelo. Conecte su parte A a un punto específico del rectángulo electrizado, mientras que su parte B se conecta a cualquier otro punto del rectángulo. Observe que las hojas del electroscopio permanecen cerradas, $\theta = 0$,

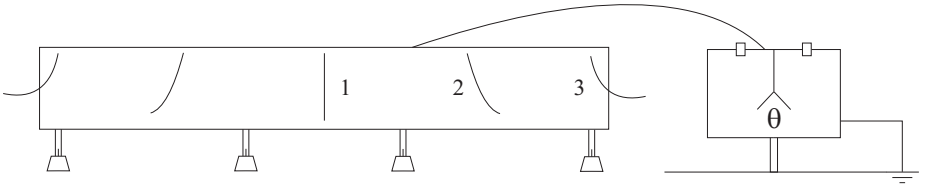


Figura 10.13: Electroscopio conectado a tierra que siempre indica el mismo ángulo de apertura θ, independientemente de si su electrodo toca los puntos 1, 2 o 3 del rectángulo electrizado.

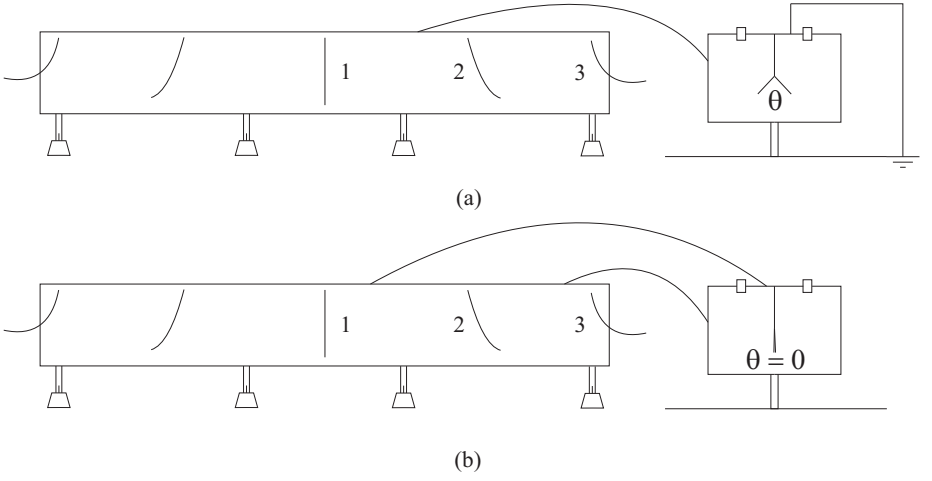


Figura 10.14: (a) Electroscopio conectado a tierra por la parte A, que siempre indica el mismo ángulo de apertura θ, independientemente de la ubicación en la que se conecte el electrodo secundario. (b) Electroscopio aislado cuya parte A está conectada a un punto del rectángulo electrizado, mientras que la parte B está conectada a otro punto del rectángulo. No hay ángulo de apertura del electroscopio.

figura 10.14 (b). Esto indica que todos los puntos del rectángulo electrizado tienen el mismo potencial. A pesar de ello, existen diferentes densidades de carga superficial en diferentes puntos del rectángulo, como indican sus tiras elevadas o la recolección de cargas procedentes de diferentes regiones del rectángulo mediante un plano de prueba.

10.4.2 Procesos que permiten modificar el potencial de un conductor con respecto al potencial de otro conductor

Esta subsección describe algunos experimentos relacionados con la igualdad o la diferencia de potencial entre dos conductores electrizados aislados. Hasta ahora, vimos cómo un electroscopio con caja conductora indica que dos partes de un mismo conductor en equilibrio tienen el mismo potencial. Esta subsección describe cómo

modificar el potencial de un conductor en relación con el potencial de otro conductor. También presenta algunos procedimientos que permiten modificar el potencial de la parte A de este electroscopio en relación con el potencial de su parte B.

Experimento 10.4 — *Acercar un cuerpo electrizado a una de las partes del electroscopio*

Comience con un electroscopio cuya caja conductora esté conectada a tierra por su parte B. Al principio, la parte A también debe estar a potencial cero, de modo que no haya ningún ángulo de apertura entre sus tiras, figura 10.15 (a). Electrice negativamente una regla de plástico frotándola con el cabello, un trozo de papel o un paño de algodón. A continuación, acerque la regla acrílica frotada a la parte A del electroscopio conectado a tierra. Ahora hay un ángulo de apertura θ_1 entre sus tiras, lo que indica que la parte A tiene un potencial distinto de cero, figura 10.15 (b). Cuanto más se acerque la regla, mayor será este ángulo de apertura.

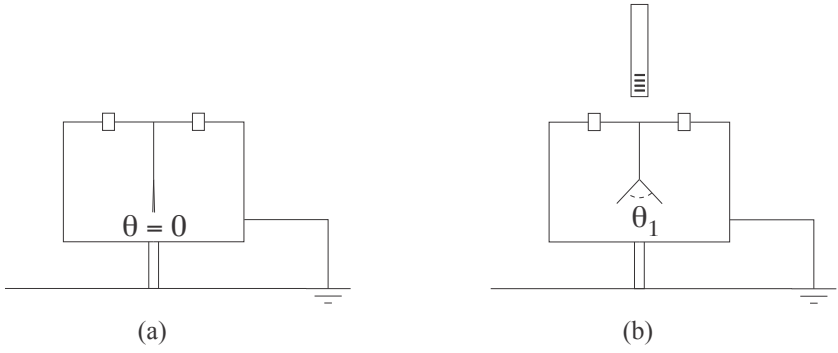


Figura 10.15: Electroscopio conectado a tierra por la parte B. (a) Las partes A y B tienen inicialmente un potencial cero. (b) Cuando se acerca una regla acrílica frotada a la parte A, las tiras se levantan.

Al retirar la regla, el ángulo de apertura se vuelve nulo.

Conecte a tierra la parte A del electroscopio. Cuando las partes A y B tienen un potencial nulo, las tiras del electroscopio permanecen bajadas, sin ángulo de apertura, figura 10.16 (a). Acerque la misma regla acrílica frotada a la parte B del electroscopio. Ahora hay un ángulo de apertura θ_2 en su tira, lo que indica que la parte B vuelve a tener un potencial distinto de cero, mientras que la parte A se mantuvo en el potencial de tierra, figura 10.16 (b). Cuanto más cerca esté la regla frotada de la parte B, mayor será el ángulo de apertura.

Experimento 10.5 — *Acercar un cuerpo electrizado a una de las partes del electroscopio, suponiendo que las partes A y B están conectadas por un alambre conductor*

Supongamos ahora un electroscopio con una caja conductora aislada del suelo. Conecte sus partes A y B con un alambre conductor. Cuando se acerca la regla acrílica frotada a la parte A, las tiras del electroscopio permanecen cerradas,

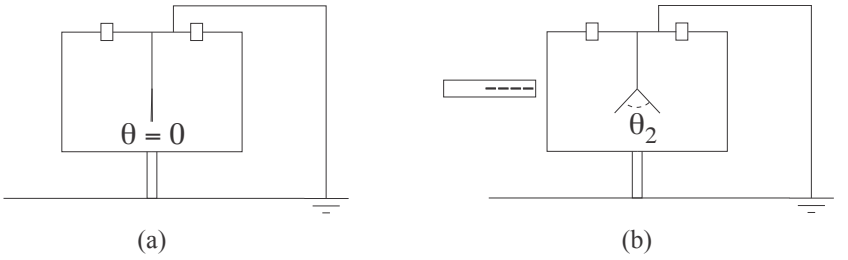


Figura 10.16: (a) Electroscopio conectado a tierra por la parte A. Al principio, las partes A y B tienen un potencial nulo. (b) Cuando se acerca una regla acrílica frotada a la parte B, las tiras se levantan.

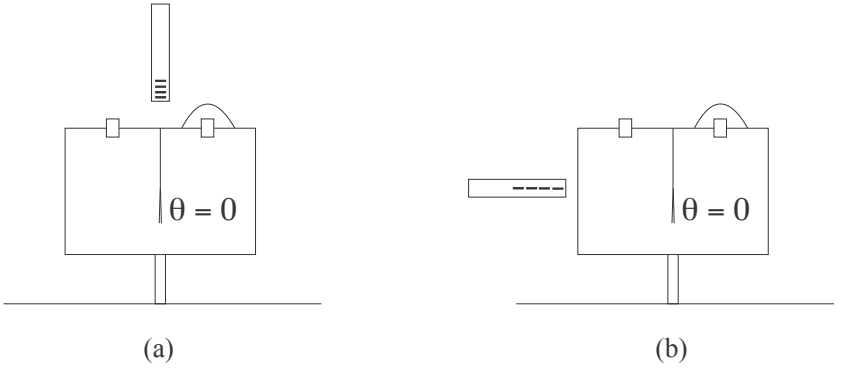


Figura 10.17: Electroscopio aislado del suelo, cuyas partes A y B están conectadas por un alambre conductor. (a) Sus tiras permanecen cerradas cuando se acerca una regla acrílica frotada a su parte A. (b) Tampoco hay ángulo de apertura cuando se acerca la regla frotada a la parte B.

figura 10.17 (a). Tampoco hay ángulo de apertura cuando la regla frotada se acerca a la parte B, figura 10.17 (b).

Este comportamiento puede justificarse. Cuando la regla acrílica frotada se acerca al electroscopio, los potenciales de las partes conectadas A y B aumentan por igual con respecto al potencial cero de la tierra. En otras palabras, cuando la regla frotada está cerca del electroscopio, $\phi_A \neq 0$ y $\phi_B \neq 0$, aunque $\phi_A - \phi_B = 0$, independientemente de la posición o la distancia de la regla con respecto al electroscopio.

Experimento 10.6 — *Electrizar una de las partes del electroscopio*

El experimento 10.4 mostró cómo crear una diferencia de potencial entre las partes A y B de un electroscopio aislado cuando se acerca un cuerpo electrizado a una de sus partes. También se puede crear una diferencia de potencial electrizando por separado la parte A o la parte B. Comience con un electroscopio aislado del suelo. Sus partes A y B deben estar inicialmente descargadas. No habrá ángulo de apertura

en el electroscopio. Electrice la parte A. Esto se puede hacer, por ejemplo, raspando una regla acrílica en el borde del cartón del electroscopio de la parte A, como se muestra en la figura 10.2 (a). También se puede electrizar la parte A tocando su cartón con un colector de carga rectangular electrizado como un electroforo. Cuando la parte A se electriza, su tira se levanta, como en el electroscopio de tira móvil única de la figura 10.18 (a), o sus tiras se abren, como en el electroscopio de dos tiras móviles de la figura 10.18 (b).

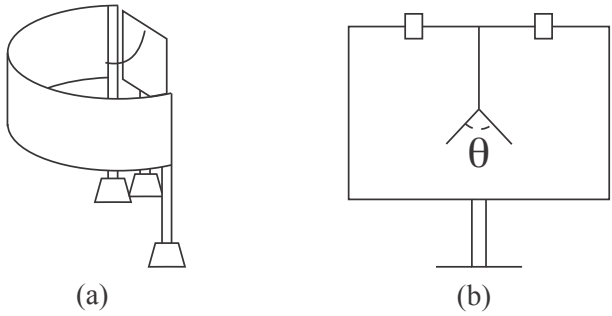


Figura 10.18: Electroscopio aislado del suelo. Electrice únicamente la parte A. (a) Cuando el electroscopio tiene una sola tira móvil, esta se eleva. (b) Cuando el electroscopio tiene dos tiras móviles, estas se separan.

Descargue la caja del electroscopio, de modo que las dos partes A y B tengan una carga nula y estén a un potencial nulo. Electrice solo la parte B. Para ello, puede raspar una regla acrílica sobre el cartón cilíndrico de la figura 10.2 (b), o tocar este cartón cilíndrico con un electroforo electrizado. La electrización de la parte B puede indicarse mediante una tira externa levantada, figura 10.19 (a). Cuando hay un electroscopio con una sola tira móvil interna en la parte A, esta se levanta, como en la figura 10.19 (b). Cuando el electroscopio tiene dos tiras móviles, estas se abren, como se muestra en la figura 10.19 (b).

Aunque la parte A no se electrizó en este último experimento, su tira interna se levantó (o sus dos tiras se abrieron). Este ángulo de apertura se debe a que, cuando solo se electrizó la parte B, se creó una diferencia de potencial entre las partes A y B de este electroscopio.

Experimento 10.7 — *Electrizar una de las partes del electroscopio, suponiendo que las partes A y B están conectadas por un alambre conductor*

Supongamos ahora que las partes A y B están conectadas por un alambre conductor y que el electroscopio está aislado de la tierra. Cuando este electroscopio se electriza, su tira interna permanece bajada, como en la figura 10.20 (a), o sus dos tiras permanecen cerradas, como en la figura 10.20 (b). Las tiras levantadas en las paredes externas de los electroscopios de las figuras 10.20 (a) y (b) se dibujaron únicamente para indicar que este electroscopio aislado se electrizó en su conjunto.

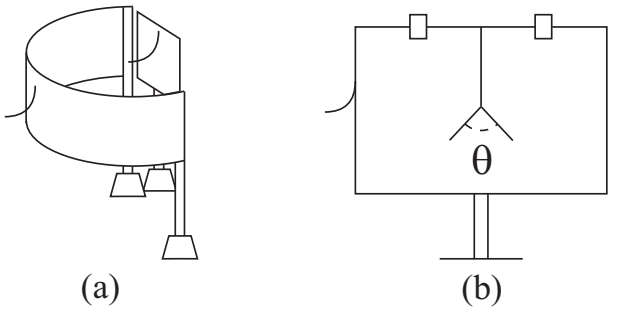


Figura 10.19: Electrice únicamente la parte B. (a) La tira externa de la parte B se levanta, lo que indica que esta parte fue electrizada. La tira interna de la parte A también se levanta, lo que indica una diferencia de potencial entre las partes A y B. (c) Las tiras móviles de la parte A se abren en otro modelo de electroscopio.

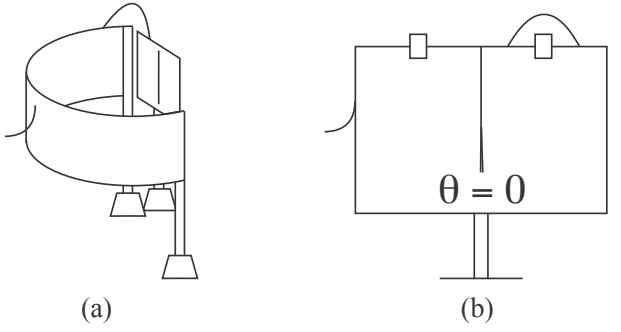


Figura 10.20: Electroscopio aislado cuyas partes A y B están conectadas por un alambre conductor. (a) Cargue el electroscopio y su tira interna permanecerá bajada. (b) Electrice otro modelo de electroscopio y sus dos tiras internas permanecerán cerradas.

10.5 Kelvin y el electrómetro para medir la diferencia de potencial

En 1860, Kelvin dejó claro que un electroscopio o un electrómetro con una carcasa conductora es un instrumento adecuado para indicar la igualdad o la diferencia de potencial entre dos conductores:[6,7]

> Se dice que dos cuerpos conductores tienen el mismo potencial eléctrico cuando, al ponerlos en comunicación conductora con los dos electrodos de un electrómetro, no se produce ningún efecto eléctrico. Por el contrario, cuando el electrómetro

[6] [Tho84a, Note sur la p. 192].

[7] Two conducting bodies are said to be of the same electric potential when, if put in conducting communication with the two electrodes of an electrometer, no electric effect is produced. When, on the other hand, the electrometer shows an effect, the amount of this effect measures the difference of potentials between the two bodies thus tested.

> indica un efecto, la amplitud de este efecto mide la diferencia de potencial entre los dos cuerpos así probados.

El «efecto» mencionado aquí por Kelvin es normalmente el ángulo de apertura entre las dos tiras de la parte A del electrómetro con caja conductora. El electrodo principal conecta la parte A al primer cuerpo conductor, mientras que el electrodo secundario conecta la parte B del electrómetro al segundo cuerpo conductor.

Citaremos aquí otra obra de Kelvin que data de 1860, con nuestros comentarios entre corchetes:[8,9]

> 336. *Interpretación de las mediciones realizadas con un electrómetro.*—Todo tipo de electrómetro se compone de una jaula o caja que contiene un conductor móvil y un conductor fijo, de los cuales al menos uno está aislado [eléctricamente de la tierra] y conectado metálicamente, por lo que llamaré el electrodo principal, que pasa a través de una abertura en la caja o jaula, con el conductor cuya electricidad se va a medir. En cualquier electrómetro correctamente construido, la fuerza eléctrica que sufre la parte móvil en una posición determinada solo puede verse influida eléctricamente por la modificación de la diferencia de potencial entre el electrodo principal y el conductor no aislado o el sistema conductor del electrómetro. Incluso los mejores electrómetros ordinarios construidos hasta ahora no cumplen esta condición, ya que la superficie interior del vidrio con el que se

[8] [Tho84c, pp. 258–259].

[9] 336. *Interpretation of measurement by electrometer.*—Every kind of electrometer consists of a cage or case containing a moveable and a fixed conductor, of which one at least is insulated [electrically from the ground] and put in metallic communication, by what I shall call the principal electrode passing through an aperture in the case or cage, with the conductor whose electricity is to be tested. In every properly constructed electrometer, the electric force experienced by the moveable part in a given position cannot be electrically influenced except by changing the difference of potentials between the principal electrode and the uninsulated conductor or conducting system in the electrometer. Even the best ordinary electrometers hitherto constructed do not fulfil this condition, as the inner surface of the glass of which the whole or part of the enclosing case is generally made, is liable to become electrified, and inevitably does become so when any high electrification is designedly or accidentally introduced, even for a very short time; the consequence of which is that the moving body will generally not return to its zero position when the principal electrode is perfectly disinsulated. Faraday long ago showed how to obviate this radical defect by coating the interior of the glass case with a fine network of tinfoil; and it seems strange that even at the present day electrometers for scientific research, as, for instance, for the investigation of atmospheric electricity, should be constructed with so bad and obvious a defect uncured by so simple and perfect a remedy. When it is desired to leave the interior of the electrometer as much light as possible, and to allow it to be clearly seen from any external position with as little embarrassment as possible, a cage made like a bird's cage, with an extremely fine wire on a metal frame, inside the glass shade used to protect the instrument from currents of air, etc., may be substituted with advantage for the tinfoil network lining of the glass. It appears, therefore, that a properly constructed electrometer is an instrument for measuring, by means of the motions of a moveable conductor, the difference of potentials of two conducting systems insulated from one another, of one of which the case or cage of the apparatus forms part. It may be remarked in passing, that it is sometimes convenient in special researches to insulate [from the ground] the case or cage of the apparatus, and allow it to acquire a potential differing from that of the earth, and that then, as always, the subject of measurement is the difference of potentials between the principal electrode and the case or cage, while in the ordinary use of the [grounded] instrument the potential of the latter is the same as that of the earth. Hence we may regard the electrometer merely as an instrument for measuring differences of potential between two conducting systems mutually insulated; and the object to be aimed at in perfecting any kind of electrometer (more or less sensitive as it may be, according to the subjects of investigation for which it is to be used), is, *that accurate evaluations in absolute measure, of differences of potential, may be immediately derivable from its indications.*

> fabrica generalmente toda o parte de la caja es susceptible de electrizarse, y lo hace inevitablemente cuando se introduce una fuerte electrización de forma intencionada o accidental, incluso durante un tiempo muy breve; como resultado, el cuerpo móvil no suele volver a su posición cero cuando el electrodo principal está perfectamente desaislado. Faraday demostró hace mucho tiempo cómo remediar este defecto radical cubriendo el interior de la carcasa de vidrio con una fina red de hoja de estaño; parece extraño que, aún hoy en día, los electrómetros destinados a la investigación científica, por ejemplo para el estudio de la electricidad atmosférica, se fabriquen con un defecto tan grave y evidente, que podría corregirse con un remedio tan sencillo y perfecto. Cuando se desea dejar el interior del electrómetro lo más claro posible y permitir verlo claramente desde cualquier posición exterior con el menor obstáculo posible, una jaula similar a una jaula de pájaros, con un alambre extremadamente fino sobre un marco metálico, dentro de la pantalla de vidrio utilizada para proteger el instrumento de las corrientes de aire, etc., puede sustituir ventajosamente a la red de hoja de estaño que recubre el vidrio. Por lo tanto, parece que un electrómetro correctamente construido es un instrumento que permite medir, mediante los movimientos de un conductor móvil, la diferencia de potencial entre dos sistemas conductores aislados entre sí, uno de los cuales forma parte de la caja o jaula del aparato. Cabe señalar, de paso, que a veces resulta práctico, en determinadas investigaciones especiales, aislar [de la tierra] la caja o la jaula del aparato y permitirle adquirir un potencial diferente al de la tierra y que, como siempre, el objeto de la medición es la diferencia de potencial entre el electrodo principal y la carcasa o la jaula, mientras que en el uso normal del instrumento [conectado a tierra], el potencial de este último es el mismo que el de la tierra. Por lo tanto, podemos considerar el electrómetro simplemente como un instrumento que permite medir las diferencias de potencial entre dos sistemas conductores mutuamente aislados; y el objetivo que se debe alcanzar para perfeccionar cualquier tipo de electrómetro (más o menos sensible según los temas de estudio para los que se vaya a utilizar) es que *se puedan derivar inmediatamente de sus indicaciones evaluaciones precisas en medida absoluta de las diferencias de potencial.*

Kelvin se refería aquí a los trabajos de Faraday de 1838, en los que utilizaba el péndulo de torsión de Coulomb como electrómetro. Aportó una mejora a este aparato, consistente en recubrir el interior de la caja de vidrio con un material conductor conectado a tierra. Esta caja de vidrio se colocaba originalmente alrededor de los cuerpos que se atraían o se repelían para evitar las perturbaciones causadas por las corrientes de aire. Al recubrirla con un material conductor, Faraday pudo evitar la influencia de los cuerpos electrizados externos sobre los cuerpos internos:[10,11]

> Para que la acción inductiva dentro del electrómetro sea uniforme en todas las posiciones de la bola repelida y en todos los estados del aparato, se fijaron dos tiras

[10] [Far38, article 1180, p. 368].

[11] That the inductive action within the electrometer might be uniform in all positions of the repelled ball and in all states of the apparatus, two bands of tin foil, about an inch wide each, were attached to the inner surface of the glass cylinder, going entirely round it, at the distance of 0.4 of an inch from each other, and at such a height that the intermediate clear surface was in the same horizontal plane with the lever and ball. These bands were connected with each other and with the earth, and, being perfect conductors, always exerted a uniform influence on the electrified balls within, which the glass surface, from its irregularity of condition at different times, I found, did not.

de hoja de estaño, de aproximadamente una pulgada [2.5 cm] de ancho cada una, a la superficie interior del cilindro de vidrio, alrededor de todo el perímetro, a una distancia de 0.4 pulgadas [1 cm] entre sí y a una altura tal que la superficie clara intermedia quedara en el mismo plano horizontal que la palanca y la bola. Estas tiras estaban conectadas entre sí y a tierra y, al ser perfectos conductores, ejercían siempre una influencia uniforme sobre las bolas electrizadas del interior, lo que no ocurría con la superficie de vidrio, debido a su estado irregular en diferentes momentos, como pude comprobar.

Capítulo 11

Descargas eléctricas en el aire

En el capítulo 9, describimos lo que se conoce como el efecto punta, es decir, ciertos efectos asociados a las puntas de los conductores electrizados. Estas puntas tienen otros efectos extremadamente importantes relacionados con las descargas eléctricas y las chispas en el aire. Algunos de estos fenómenos se tratarán en este capítulo:

1. El aire se ioniza más fácilmente cerca de las regiones puntiagudas de los conductores electrizados que cerca de sus partes romas. Cuando se ioniza, el aire se comporta como un conductor.
2. Entonces es más fácil electrizar un conductor a través del aire ionizado cerca de sus puntas. Acerque un cuerpo electrizado a una zona puntiaguda de un conductor aislado. No es necesario que el cuerpo y el conductor estén en contacto. El intercambio de sus partículas electrizadas se produce a través del aire conductor entre ellos.
3. También es posible descargar un conductor inicialmente electrizado por sus regiones puntiagudas cuando estas puntas están cerca de un conductor conectado a tierra. En otras palabras, el conductor electrizado no necesita tocar el conductor conectado a tierra para descargarse.

11.1 Chispas

Realice experimentos muy sencillos e interesantes fijando una aguja, un alfiler o un alambre metálico en un electroscopio simple.[1] La aguja o el alambre se pueden fijar a la parte posterior del electroscopio con cinta adhesiva. Una pequeña parte de esta, de 1 a 2 cm, debe sobresalir del cartón, figura 11.1.

Experimento 11.1 — *Electrizar un electroscopio a distancia*

Cargue negativamente una pajita de plástico o una regla acrílica frotándola con el cabello, una servilleta de papel o un paño de algodón. Sosténgala horizontalmente

[1] [FM91, p. 62], [Fersdb, Pára-raios: Igrejinha, p. 40], [Gas03, pp. 239–243] y [LSB08].

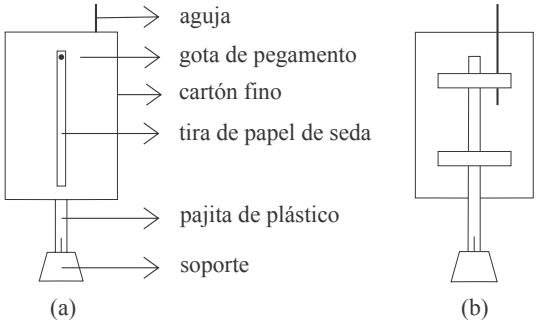


Figura 11.1: (a) Electroscopio visto de frente con una aguja fijada en la parte posterior. (b) Vista posterior.

a unos centímetros por encima de la punta de la aguja. No ocurre nada. Cuando se acerca aún más al electroscopio, a aproximadamente 1 cm de la punta, la fina tira de papel del electroscopio se levanta. Al retirar la pajita, la tira vuelve a caer.

Repita este procedimiento con el electroscopio inicialmente descargado, fig.11.2 (a).

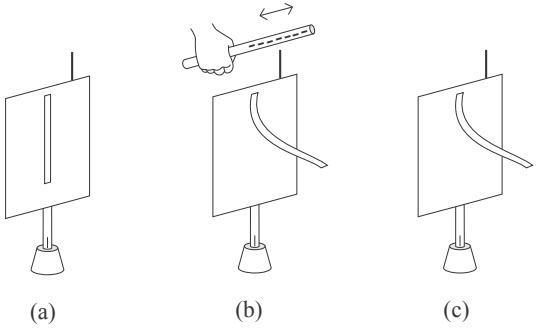


Figura 11.2: (a) Un electroscopio descargado con una aguja en la parte posterior. (b) Raspar una pajita muy cerca de la punta de la aguja, realizando un movimiento horizontal de vaivén. La tira se levanta del electroscopio. (c) Al retirar la pajita, ¡la tira permanece alejada del cartón!

Esta vez, la pajita electrizada debe acercarse aún más a la aguja, a una distancia de entre 1 y 3 mm de su punta, *sin tocarla*. La tira de papel de seda se levantará. La pajita frotada debe moverse horizontalmente de manera vaivén por encima de la punta de la aguja, manteniéndose siempre muy cerca de ella, figura 11.2 (b). Además, la pajita debe girarse o pivotar alrededor de su eje longitudinal durante el movimiento oscilatorio, presentando diferentes zonas de su superficie a la aguja. Aleja la pajita del electroscopio. La tira permanece alejada del cartón del electroscopio, figura 11.2 (c).

La tira permanece alejada del cartón después de retirar la pajita frotada. Este hecho demuestra que el electroscopio se electrizó gracias a este procedimiento. *Este fenómeno*

presenta algo nuevo, a saber, la electrización del electroscopio sin contacto con otro cuerpo electrizado.

No abordamos este mecanismo de carga en el volumen 1 de esta obra. Hasta ahora, solo habíamos considerado otras tres formas de carga, a saber: (I) Por fricción, como en el efecto del ámbar, sección 1.1. (II) Por contacto de un conductor con otro cuerpo electrizado, como en el mecanismo *ACR*, sección 4.4. (III) La electrización por inducción o polarización.[2]

Experimento 11.2 — *Descubrir el signo de la carga adquirida por el electroscopio*

Consideremos el electroscopio cargado según el procedimiento del experimento 11.1. Acerque lentamente la misma pajita frotada a la tira levantada de este electroscopio cargado. La pajita frotada debe estar en posición horizontal, a la misma altura que el extremo inferior de la tira levantada. El movimiento de aproximación debe ser muy lento, para evitar cualquier contacto entre ambos. Observe atentamente la dirección en la que la tira intenta desplazarse, es decir, si se mueve hacia la pajita frotada o se aleja de ella. Al realizar este experimento con cuidado, concluya que la tira se desplaza hacia el cartón, es decir, se aleja de la pajita frotada que se aproxima.

La tira puede desplazarse en una dirección u otra con la pajita frotada. Para ello, mueva la pajita hacia la tira y aléjela de ella. La tira se desplazará en función de la pajita, hacia el cartón y alejándose de él. Si desea observar este movimiento oscilatorio de la tira, la amplitud o magnitud del movimiento de la pajita frotada debe ser pequeña. En otras palabras, utilice movimientos de baja amplitud. Evite también acercar demasiado la pajita frotada a la tira, figura 11.3.

Este comportamiento de la tira muestra que el electroscopio de aguja se electrizó con una carga del mismo signo que la de la pajita frotada, ya que hay repulsión entre ellas. Por lo tanto, se puede representar que las cargas del electroscopio electrizado tienen el mismo signo que las cargas del plástico frotado. En el ejemplo actual, estas cargas serían negativas.

Experimento 11.3 — *Descargar un electroscopio a distancia*

Repita el experimento 11.1 utilizando de nuevo un electroscopio provisto de una aguja en la parte posterior. Comience con un electroscopio cargado, como lo indica la tira de papel de seda levantada, figura 11.4 (a).

Sostenga horizontalmente en la mano un palito de madera o un alambre metálico. Acérquelo lentamente al electroscopio cargado, a una distancia de 1 a 3 mm de la punta de la aguja, sin tocarla. En unos segundos, la tira cae, quedando en posición vertical y tocando el cartón, figuras 11.4 (b) y (c). Al retirar el palito o el alambre, la tira permanece abajo, figura 11.4 (d).

En este experimento, el electroscopio se descargó a distancia, sin contacto. Bastó con acercar un conductor conectado a tierra (palito de madera o alambre metálico sostenido con la mano) muy cerca de la punta de la aguja.

[2] Como se discute en la sección 7.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

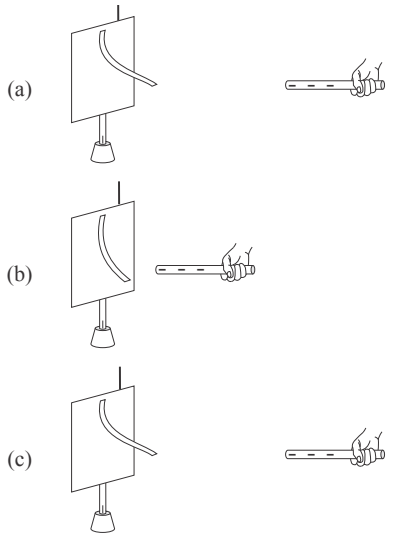


Figura 11.3: Repulsión entre la pajita cargada negativamente y el electroscopio cargado por este plástico frotado. (b) Cuando se acerca la pajita al electroscopio, la tira desciende. (a) y (c): Cuando se aleja el plástico del electroscopio, la tira vuelve a subir.

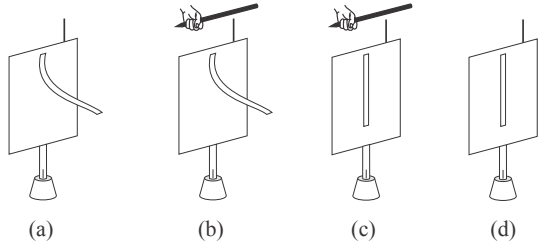


Figura 11.4: (a) Un electroscopio cargado. (b) y (c): cuando se acerca un palito de madera o un alambre metálico muy cerca de la punta de la aguja, sin tocarla, la tira desciende. (d) Al retirar el palito, la tira permanece abajo.

Experimento 11.4 — *Influir el número de agujas en el intervalo de tiempo necesario para descargar un electroscopio*

Compare el tiempo necesario para descargar un electroscopio electrizado en función de la presencia o ausencia de una aguja en la parte posterior. Consideramos dos electroscopios del mismo tamaño y forma. El primero es clásico, sin aguja. El segundo está provisto de una aguja en la parte posterior, cuya punta sobresale del cartón.

Los dos electroscopios deben estar separados entre sí. Raspe una pajita o una regla acrílica sobre sus cartones. Deben estar electrizados por igual. Se indicará el mismo grado de electrización cuando las dos tiras se levanten en un ángulo igual θ con respecto a su cartón. Retira la pajita frotada y mide los tiempos de descarga de los dos electroscopios. Es decir, el intervalo de tiempo necesario para que las tiras vuelvan

a caer hasta tocar su cartón. Es fácil observar que el electroscopio con una aguja se descarga más rápidamente que el otro electroscopio.

Realice este experimento con un tercer electroscopio que contenga dos o tres agujas. Una de las agujas puede salir verticalmente hacia arriba y las otras dos lateralmente, una hacia la derecha y otra hacia la izquierda, por ejemplo. Electrice los tres electroscopios por igual y mida sus tiempos de descarga. Cuanto mayor sea el número de agujas, más rápida será la descarga.

Experimento 11.5 — *Transferir cargas entre dos conductores separados entre sí*

Utiliza dos latas de refresco vacías, A y B. Pega el extremo superior de una tira fina de papel de seda en cada una de ellas. Se debe fijar un alfiler o una aguja horizontalmente en una de estas latas, pasando el alfiler a través de un agujero en su cuerpo. Se debe fijar a la lata con cinta adhesiva. La punta de este alfiler horizontal debe sobresalir de la lata. Cada lata debe colocarse sobre una placa aislante de poliestireno. El alfiler que sobresale de la lata A debe estar muy cerca del centro de la lata B, con la punta a 1 o 2 mm de B. Al principio, ambas latas deben estar descargadas, como indican sus tiras caídas, figura 11.5 (a).

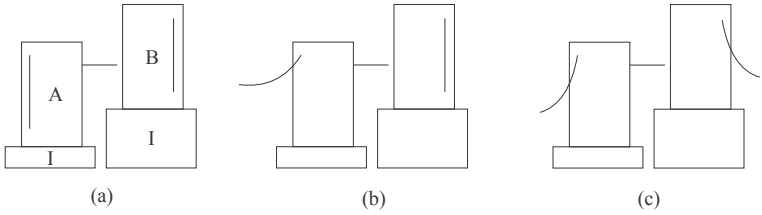


Figura 11.5: (a) Dos cajas conductoras descargadas aisladas del suelo mediante placas de poliestireno I. Un alfiler horizontal sobresale de una caja, con su extremo muy cerca de la otra caja. (b) Electrice solo la caja A raspando un trozo de plástico sobre su cuerpo. (c) Después de un tiempo, las dos cajas se electrizan, como indican sus tiras levantadas.

Electrice únicamente la caja A raspando varias veces su borde superior con una regla acrílica, figura 11.5 (b). Retire la regla acrílica. Tras un tiempo, ambas cajas se electrizan, figura 11.5 (c).

Este experimento demuestra que podemos electrizar la caja B a distancia de la caja electrizada A.

Experimento 11.6 — *Otro ejemplo de esta transferencia de cargas a distancia*

Invierta el procedimiento del experimento 11.5. Electrice la caja B raspando una regla acrílica por su borde superior, figura 11.6 (b). Retire la regla frotada. Al cabo de un tiempo, las dos cajas se electrizan, figura 11.6 (c).

En este experimento, electrizamos la lata A, que tiene un alfiler, sin que esté en contacto con la lata electrizada B.

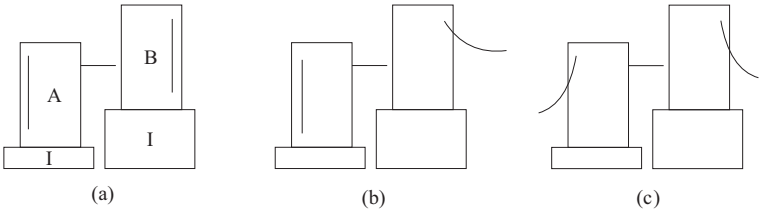


Figura 11.6: (a) Dos latas descargadas y aisladas, una de las cuales contiene un alfiler. (b) Lata electrizada B. (c) Después de un tiempo, las dos latas se electrizan.

11.2 Comentarios sobre estas experiencias

Los experimentos de la sección 11.1 son extremadamente interesantes.

El experimento 11.1 utilizó un electroscopio descargado con una aguja metálica que sobresalía de él. Se acercó una pajita frotada muy cerca de la punta de la aguja. Después de un tiempo, el electroscopio se electrizó. No hubo ningún contacto entre la pajita electrizada y la punta de la aguja. Por lo tanto, la electrización se produjo a través del aire intermedio. El aire seco se comporta normalmente como un aislante para los experimentos electrostáticos. Esta conclusión se puede extraer del hecho de que un simple electroscopio que no contiene ninguna aguja puede permanecer electrizado durante unos minutos, a pesar de estar rodeado de aire. En el experimento 11.1, por el contrario, el aire alrededor de la aguja puntiaguda se comportó como un conductor. Muchas de sus moléculas estaban ionizadas o electrizadas. Como estos iones eran móviles, fue posible el intercambio de partículas electrizadas entre la pajita electrizada, los iones del aire y el electroscopio.

El experimento 11.3 utilizó un electroscopio cargado inicialmente con una aguja metálica que sobresalía de él. Se acercó un conductor conectado a tierra muy cerca de la punta de la aguja. Después de un tiempo, el electroscopio se descargó. El conductor conectado a tierra era un palito de madera o un alambre metálico. El electroscopio se descargó sin el mecanismo habitual de conexión a tierra que se produce por contacto. En este experimento, sin embargo, el palito de madera se acercó a la punta de la aguja sin tocarla. El aire alrededor de la punta se comportó como un conductor cuando se acercó el palito de madera a la punta. Este palito de madera o este alambre metálico estaba conectado a tierra por contacto con la mano que lo sostenía. Cuando se acercó muy cerca de la punta de la aguja, el aire conductor que lo rodeaba permitió la descarga del electroscopio.

El experimento 11.4 demostró que la presencia de puntas en un conductor electrizado, aislado del suelo, facilita su descarga a través del aire que lo rodea. Una vez más, es el aire alrededor de las puntas de los conductores electrizados el que se comporta como un conductor, facilitando la descarga del electroscopio.

Este cambio en el comportamiento del aire, que pasa de aislante a conductor, es un fenómeno complejo que depende de varios factores. En esta obra no explicaremos cómo el aire puede cambiar de comportamiento, pasando de aislante a conductor. Nos limitaremos a describir algunas de sus principales propiedades. Esta transición no es lenta ni progresiva: se produce en un abrir y cerrar de ojos. Se denomina «descarga

corona». Dados dos puntos en el aire, cuando la diferencia de potencial entre ellos es inferior a un determinado valor crítico, el aire se comporta como un buen aislante. Por el contrario, por encima de este valor crítico, se comporta como un buen conductor. El campo eléctrico máximo (diferencia de tensión por unidad de distancia) que un aislante puede soportar en condiciones ideales sin degradarse, es decir, sin perder sus propiedades aislantes, se denomina «rigidez dieléctrica» del material. Este valor crítico depende de muchos factores. En el caso del aire, en particular, depende de la presión atmosférica. La rigidez dieléctrica del aire a presión normal ($P = 1$ atm $= 1 \times 10^5$ N/m^2) es de aproximadamente 3×10^6 V/m = 3 000 voltios/mm.[3]

Tomemos, por ejemplo, el experimento 11.1. Supongamos que el electroscopio se puede cargar cuando hay una distancia de 2 mm entre la pajita electrizada y la punta de la aguja. En este caso, habrá una diferencia de potencial de aproximadamente 6 000 V entre la pajita y el electroscopio.

A partir de experimentos como este, o de la medición de la distancia entre dos esferas conductoras en el experimento del cuentagotas de Kelvin necesaria para producir una chispa, concluimos que en los experimentos electrostáticos habituales, tratamos diferencias de potencial que suelen oscilar entre 1000 V y 10 000 V.[4] Aunque estas diferencias de potencial son mucho más importantes que las disponibles en las baterías normales (unos pocos voltios), la cantidad de cargas eléctricas implicadas en los experimentos electrostáticos suele ser muy pequeña.

Cabe destacar aquí que las chispas en el aire no se deben a la extracción de electrones de los electrodos. Para eliminar los electrones de las superficies metálicas a baja temperatura, necesitamos fuerzas por unidad de carga del orden de 10^8 V/m. Este fenómeno se conoce como «emisión de electrones por campo», «emisión de campo», «emisión de electrones por campo» o «emisión fría». Este valor de 10^8 V/m es dos órdenes de magnitud superior al campo eléctrico crítico de 3×10^6 V/m necesario para ionizar el aire a presión atmosférica.[5]

11.3 Pararrayos

Los experimentos 11.1 y 11.3 muestran que es posible cargar o descargar un electroscopio a distancia. El experimento 11.4 muestra que el aire alrededor de una región puntiaguda electrizada de un conductor se comporta como un conductor. Este comportamiento conductor del aire cerca de conductores puntiagudos electrizados es el principio de funcionamiento de los pararrayos. Este mecanismo de funcionamiento puede ilustrarse con algunos experimentos sencillos.

Experimento 11.7 — *Simular un pararrayos*

Recorte un trozo de cartón fino con forma de casa sencilla. Se puede fijar al suelo mediante una rendija o hendidura en una tabla o placa de madera. Pegue el extremo

[3] [TM09, pp. 91 y 125].

[4] [Tho68], [Llo80], [Cam06], [CA08] y secciones 6.6, 7.11 y 7.12 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[5] [Sav89, p. 249], [Sil10c], [Sil11] y [Sil16].

superior de una tira fina de papel de seda a la casa para indicar los posibles efectos eléctricos. Se fija verticalmente junto a la casa un alambre metálico de 20 o 30 cm de largo. Debe estar aislado de la casa mediante trozos de poliestireno o plástico rígido. El extremo inferior del alambre debe penetrar en la tabla de madera. Este dispositivo representará un pararrayos, figura 11.7 (a), en el que la letra I representa los materiales aislantes.

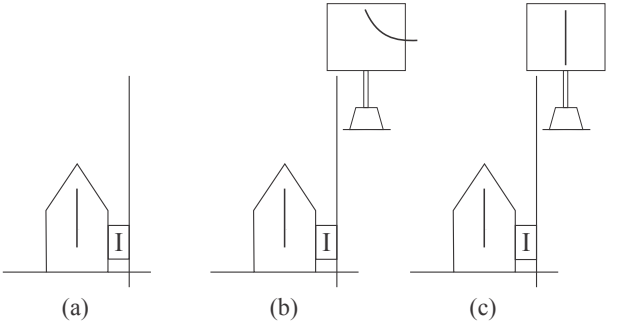


Figura 11.7: (a) El pararrayos es un alambre conductor aislado de la casa o edificio que protege. Su extremo inferior está clavado en el suelo. (b) Acerque el borde inferior de un electroscopio cargado muy cerca del extremo superior del alambre. (c) El electroscopio se descarga a través del pararrayos. La casa y su fina tira de papel de seda no se ven afectadas por la descarga.

Nuestro modelo de nube electrizada será un simple electroscopio sostenido por una pajita aislante. Electrice esta nube raspando una regla acrílica por el borde superior del cartón. El grado de inclinación de su tira de papel de seda indica el nivel de electrización de esta nube. Sujétela por la pajita aislante. Acerque el borde inferior del cartón al extremo superior del alambre metálico, evitando cualquier contacto, hasta una distancia de 1 a 3 mm, figura 11.7 (b). El electroscopio se descarga entonces sin entrar en contacto con el alambre metálico, figura 11.7 (c). Además, la casa no se ve afectada por esta descarga. En otras palabras, su tira de papel de seda no se ve afectada durante todo este proceso y permanece siempre vertical.

Este experimento ilustra el mecanismo de funcionamiento de un pararrayos y su función protectora. El pararrayos es un alambre conductor cuyo extremo inferior penetra en el suelo. Su extremo superior sobresale verticalmente de la casa o el edificio que protege. Está aislado de este edificio por un material aislante I. Supongamos que una nube electrizada pasa por encima del pararrayos. El extremo superior del pararrayos se electriza con una carga de signo opuesto al de la nube. Cuando hay una alta tensión entre la nube y el suelo, el aire alrededor del extremo del pararrayos se comporta como un conductor. Este canal conductor puede descargar la nube a través del pararrayos.

11.4 Pararrayos aislado del suelo

El pararrayos destinado a proteger los edificios contra las descargas eléctricas procedentes de las nubes debe estar conectado a tierra.

Por el contrario, cuando el alambre metálico está aislado del suelo, se habla de «varilla de prueba» o «pararrayos aislado del suelo». Se utiliza para recoger parte de la electricidad acumulada en las nubes o en la atmósfera. Así, podemos probar o verificar el signo de esta carga recogida, su magnitud a diferentes altitudes o ubicaciones del pararrayos, su magnitud en función de las condiciones meteorológicas locales, a diferentes horas o en diferentes meses del año. Es extremadamente peligroso realizar experimentos reales con varillas de prueba al aire libre para estudiar la electricidad de las nubes. En este libro, realizaremos algunos experimentos didácticos utilizando pequeños alambres metálicos como varillas de prueba. Las nubes electrizadas se simularán mediante electroscopios cargados aislados del suelo.

Experimento 11.8 — *Eliminar las cargas de un electroscopio*

Se fija un alambre metálico verticalmente sobre una placa gruesa de poliestireno. El extremo inferior de este alambre debe estar situado en el centro de la placa y no debe tocar el suelo. Este alambre estará aislado de la Tierra. El extremo superior de este alambre estará fuera de la placa, al aire libre. Un electroscopio aislado inicialmente descargado se sostiene por encima del alambre, con el borde inferior de su cartón cerca del extremo superior del alambre, a una distancia de 1 a 3 mm de su extremo. Un versorio metálico se encuentra cerca del centro del alambre vertical, apuntando en una dirección arbitraria, figura 11.8 (a).

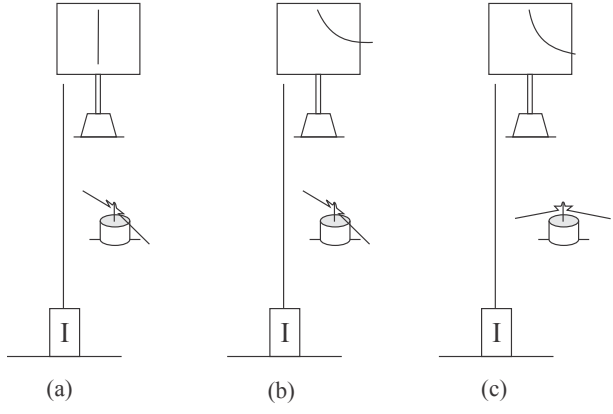


Figura 11.8: (a) Alambre de prueba vertical aislado del suelo. Un versorio situado cerca de su centro apunta en una dirección arbitraria. El electroscopio está inicialmente descargado. (b) Un electroscopio cargado. (c) Después de un tiempo, la tira desciende ligeramente y el alambre electrizado orienta el versorio hacia ella.

A continuación, se electriza el electroscopio raspando su borde superior con una pajita. Su tira se levanta inmediatamente, figura 11.8 (b). Retire la pajita frotada.

Después de un tiempo, la tira levantada desciende ligeramente y el versorio apunta hacia el alambre vertical, figura 11.8 (c).

Este experimento no está relacionado con la inducción electrostática. De hecho, la orientación del versorio no se debe a la polarización del alambre, que se produce cuando un electroscopio cargado se encuentra cerca del alambre. Supongamos que el electroscopio está cargado negativamente. El extremo superior del alambre aislado se electrizará positivamente por inducción, mientras que su extremo inferior se electrizará negativamente. Esta inducción se produce casi inmediatamente, simultáneamente a la electrización del electroscopio.

La orientación del versorio, por el contrario, solo se produce unos segundos después de la electrización del electroscopio. Esta orientación se debe a la electrización progresiva del alambre en su conjunto, que se produce debido a la ionización del aire alrededor del extremo superior del alambre. Cuando el alambre se electriza negativamente, provoca una redistribución de las cargas en el versorio cercano, orientándolo hacia el alambre.

Este experimento también se puede realizar con un alambre metálico horizontal sostenido por dos vasos de poliestireno. El versorio debe colocarse en el mismo plano que el alambre, cerca de él y apuntando en una dirección arbitraria, figura 11.9 (a). A continuación, se acerca el electroscopio cargado muy cerca del alambre, con su centro en el plano del alambre. El extremo del alambre debe estar a una distancia de 1 a 3 mm del borde vertical del cartón. Después de un tiempo, el versorio se orienta hacia el alambre, figura 11.9 (b).

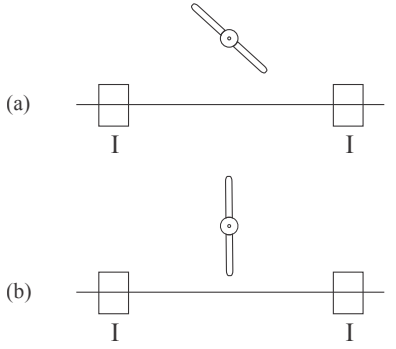


Figura 11.9: (a) Varilla de prueba horizontal aislada del suelo. Un versorio situado cerca de su centro apunta en una dirección arbitraria. (b) Una vez electrizado el alambre, orienta el versorio, haciendo que apunte hacia el alambre.

11.5 Chispas en el mecanismo *ACR*

El mecanismo *ACR* se abordó en la sección 4.4. En este fenómeno, un conductor aislado y ligero es atraído por un cuerpo cargado, se produce una comunicación eléctrica, seguida de la repulsión del conductor. El experimento 4.3 mostró un ejemplo de este mecanismo. Un pequeño disco conductor inicialmente neutro y aislado del suelo

fue atraído por un aislante electrizado, lo tocó y luego fue repelido. El disco adquirió una carga del mismo signo que la del aislante electrizado. La atracción se produjo debido a la polarización del disco. Esta polarización fue inducida por el plástico electrizado cercano. Normalmente, la comunicación eléctrica en el mecanismo *ACR* se produce cuando el pequeño conductor entra en contacto con el cuerpo cargado cercano.

Sin embargo, este contacto no siempre es necesario. De hecho, el mecanismo *ACR* puede producirse sin que haya contacto entre el cuerpo cargado y el conductor aislado. A veces, cuando el pequeño conductor está lo suficientemente cerca del aislante electrizado, se produce una transferencia de cargas entre ellos y el aire ambiente, lo que electriza el conductor. En este proceso, el pequeño conductor adquiere una carga del mismo signo que la del cuerpo electrizado cercano. Cuando se produce esta comunicación de cargas, se produce una repulsión entre el pequeño conductor y el cuerpo electrizado, aunque nunca se hayan tocado físicamente. Lo que ocurre en este caso es que, cuando están muy cerca uno del otro, el aire entre ellos puede comportarse como un conductor. Entonces se produce una pequeña chispa en el aire, con un intercambio de partículas electrizadas entre el pequeño conductor, los iones del aire y el aislante electrizado. Al cabo de un tiempo, el pequeño conductor se electriza y es repelido por el aislante.

El propio Du Fay, que descubrió el mecanismo *ACR*, sabía que no era necesario el contacto para que se produjera la repulsión. A veces, el pequeño conductor adquiría una carga neta del mismo signo que la del cuerpo electrizado simplemente al acercarse mucho a él, sin tocarlo.[6]

11.6 La lámpara de neón

Es fácil comprar en las tiendas de electrodomésticos una lámpara denominada «lámpara de neón» o «lámpara incandescente de neón», figura 11.10.

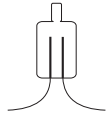


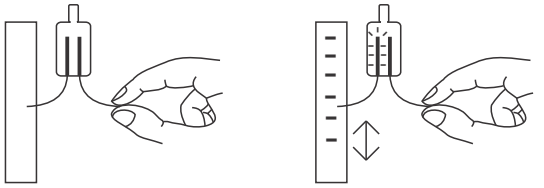
Figura 11.10: Lámpara de neón.

Se trata de una lámpara de descarga gaseosa que se utiliza como indicador en equipos electrónicos, comprobadores de tensión, etc. En experimentos electrostáticos, se puede utilizar para indicar no solo si un cuerpo está cargado o descargado, sino también el signo de su carga, es decir, si el cuerpo es positivo o negativo.

Experimento 11.9 — *Raspar una lámpara de neón sobre una regla con carga negativa*

Sujete con la mano una de las patas de una lámpara de neón y toque la otra pata con una regla acrílica neutra. La lámpara no se enciende, figura 11.11 (a).

[6] Sección 4.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].



(a) (b)

Figura 11.11: (a) Una lámpara de neón permanece apagada cuando toca una regla acrílica neutra. (b) Raspe una de sus patas sobre una regla con carga negativa. Observe que solo parpadea el electrodo conectado a la regla.

Una regla acrílica se carga negativamente frotándola con el cabello, una toalla de papel o un paño de algodón. Sujete una pata de la lámpara de neón con un dedo y toque la otra pata en la parte cargada de la regla, raspándola a lo largo de la regla en una habitación oscura. Solo parpadea el electrodo conectado a la regla negativa, figura 11.11 (b).

Experimento 11.10 — *Tocar una lámpara de neón con electroscopios cargados positiva y negativamente*

Electrice dos electroscopios, uno positivamente y otro negativamente. Esta electrización se puede conseguir raspando una regla de plástico electrizada positivamente sobre el borde superior del cartón de un electroscopio y una regla de plástico negativa sobre el borde del cartón del otro electroscopio. Estas electrizaciones opuestas de los electroscopios también se pueden obtener fácilmente por inducción o polarización.[7] A continuación, se separan los electroscopios cargados.

Sujete una pata de la lámpara de neón y toque la otra pata con el electroscopio positivo en una habitación oscura. Se descargará casi inmediatamente. Durante la descarga, solo parpadea el electrodo conectado a la mano, figura 11.12 (a).

Repita el mismo procedimiento cuando toque el electroscopio cargado negativamente. Observe que la lámpara también parpadea durante la descarga. Sin embargo, en este caso, solo parpadea el electrodo conectado al electroscopio, figura 11.12 (b).

Este experimento se puede repetir con un electroforo.[8] Cuando el colector de carga del electroforo está cargado negativamente, solo parpadea el electrodo que lo toca. Por el contrario, cuando la pata de la lámpara de neón toca un electroforo cargado positivamente, solo parpadea el electrodo conectado a la mano de la persona que sostiene la lámpara.

Por lo tanto, la lámpara de neón es un dispositivo muy útil. En primer lugar, puede indicar si un determinado conductor está cargado o descargado. Cuando el conductor está inicialmente electrizado, la lámpara de neón también indica si está cargado positiva o negativamente.

[7] Sección 7.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[8] [Fersdb, Lâmpada de néon, p. 32; Lâmpada fluorescente, p. 34; y Eletróforo de Volta, p. 38].

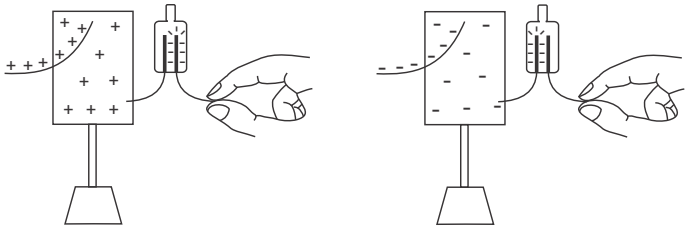


Figura 11.12: La lámpara parpadea cuando una de sus patas toca un electroscopio cargado mientras que la otra pata se sostiene con la mano. (a) Solo parpadea el electrodo conectado a la mano cuando el electroscopio está cargado positivamente. (b) Solo parpadea el electrodo conectado al electroscopio cuando está cargado negativamente.

11.7 Gray, Franklin, el efecto punta y la naturaleza eléctrica de los rayos

Algunos científicos precursores observaron varias analogías entre las pequeñas chispas y las descargas eléctricas que producían durante sus experimentos electrostáticos y los rayos que se observaban durante las tormentas. Sugirieron que ambos tipos de fenómenos podían ser el mismo efecto, pero con una diferencia considerable en términos de amplitud. Uno de estos investigadores fue Stephen Gray. En una carta dirigida al secretario de la Royal Society en 1734, publicada en 1735, describía varios experimentos relacionados con las chispas y las luces que había podido producir con su tubo de vidrio electrizado, así como cuando se colocaban conductores puntiagudos muy cerca de cuerpos electrizados. Citaremos aquí la última parte de su artículo, con nuestras cifras y comentarios en las notas al pie y entre corchetes:[9,10]

> **8.** A continuación, cogí un cuenco de madera y lo coloqué sobre el soporte[11] primero vacío; luego, al aplicar el tubo [es decir, un tubo de vidrio frotado] y el dedo cerca del cuenco, apareció una luz, pero sin presión del dedo ni chasquido: A continuación, llené el cuenco con agua y, manteniendo el tubo sobre la superficie del agua, apareció una luz más intensa que cuando se había aplicado el dedo sobre el cuenco vacío, pero sin chasquido,[12] hasta que, después de frotar bien el tubo, lo mantuve a dos o tres pulgadas [5 o 7 cm] del dedo que estaba cerca de la superficie

[9] [Gra36a, p. 24], [Bos11, capítulo 10] y [BAC12, capítulo 11, pp. 221–238].

[10] **8.** I then took a wooden Dish, and placed it upon the Stand first empty; then applying the Tube [that is, a rubbed glass tube], and the Fin-[ger] near the Dish, there appeared a Light, but no pushing of the Finger nor Snapping: I then filled the Dish with Water, and the Tube being held over the Surface of the Water, there appeared a greater Light than when the Finger had been applied to the empty Dish, but no Snapping, till by holding the Tube after it had been well rubbed, within two or three Inches of the Finger that was held near the Surface of the water, and then the Finger was pushed, and a snapping Noise heard, as when the Experiment was made with the Pewter Plate.

[11] En este artículo, Gray menciona que este soporte estaba colocado sobre un cilindro de vidrio. Su cilindro de vidrio actuaba como aislante.

[12] La figura 11.13 ilustra cómo podría ser este experimento.

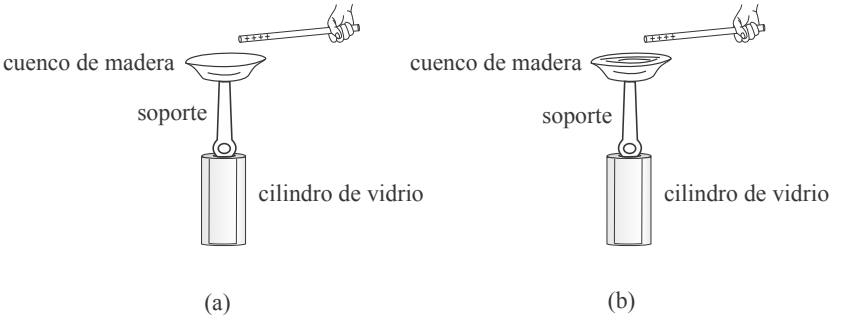


Figura 11.13: (a) Cilindro de vidrio, soporte y cuenco de madera vacío. (b) Cilindro de vidrio, soporte y cuenco de madera lleno de agua.

Figura 11.14: Un dedo colocado cerca de la superficie del agua. Cuando se colocaba un tubo de vidrio bien frotado a unos 5 o 7 cm del dedo, este era empujado y se oía un ruido seco.

> del agua, luego presioné el dedo y se escuchó un chasquido, como en el experimento realizado con el plato de peltre.[13]

Gray continuó describiendo la experiencia con las siguientes palabras:[14]

> Estos experimentos nos muestran que una verdadera llama de fuego, acompañada de una explosión y una ebullición de agua fría,[15] puede ser producida por la electricidad comunicativa; y aunque estos efectos son por ahora solo *minimis*, es

[13] La figura 11.14 ilustra cómo podría ser este experimento.

[14] By these Experiments we see, that an actual Flame of Fire, together with an Explosion, and an Ebullition of cold Water, may be produced by Communicative Electricity; and altho' these Effects are at present but in *minimis*, it is probable, in Time there may be found out a Way to collect a greater Quantity of it; and consequently to increase the Force of this Electric Fire, which, by several of these Experiments (*Si licet magnis componere parva*) seems to be of the same Nature with that of Thunder and Lightning.

[15] Esta «llama de fuego» probablemente se refiere a la chispa o la luz emitida por los objetos, la «explosión» al ruido seco que se oye, mientras que la «ebullición del agua fría» se refiere a las gotas de agua recogidas en la superficie del tubo cuando se mantenía cerca de la superficie del agua.

> probable que con el tiempo se encuentre una forma de recoger una mayor cantidad y, por lo tanto, aumentar la fuerza de este fuego eléctrico,[16] que, gracias a varios de estos experimentos (*Si licet magnis componere parva*)[17] parece ser de la misma naturaleza que la del trueno y el rayo.[18]

Gray describió varios otros experimentos que relacionaban el efecto punta con las chispas en el aire. También realizó varios experimentos relacionados con la conservación de las cargas eléctricas.[19] Estos experimentos no se tratarán en este libro.

Benjamin Franklin (1706–1790) fue un autodidacta que trabajó en muchos campos diferentes. Entre 1743 y 1753, se dedicó a realizar experimentos eléctricos tras asistir a varias conferencias públicas sobre este tema.[20] Recibió como regalo un tubo de vidrio que se podía electrizar fácilmente por fricción y que se comportaba como un buen aislante. También adquirió algunos de los principales instrumentos eléctricos de su época. Informó a sus colegas europeos de sus experimentos realizados en Filadelfia a través de cartas que fueron ampliamente leídas y discutidas. Estas fueron recopiladas y publicadas en forma de libro en Londres en 1751. Esta obra se amplió y se publicó en varias ediciones hasta 1774, con el título: *Experiments and Observations on Electricity*.[21] Este libro tuvo un gran impacto y fue traducido a varios idiomas. Inventó una serie de términos científicos en el campo de la electricidad, como «más y menos» o «positivo y negativo», «batería», etc. Explicó el mecanismo de funcionamiento de una botella de Leiden, popularizó el uso de un condensador de placas paralelas, insistió mucho en el efecto punta y fue uno de los principales científicos que impulsó el establecimiento y el uso de la ley de conservación de las cargas eléctricas.[22] Dio varios nombres a las partículas electrizadas, como «fuego eléctrico», «materia eléctrica» y «fluido eléctrico». Trabajó con el concepto de un único fluido eléctrico. Pensaba que todas las sustancias contenían una cantidad o densidad normal de este fluido. Cuando un cuerpo contenía más fluido eléctrico que esta cantidad normal, estaba «electrizado positivamente». Del mismo modo, si contenía menos fluido eléctrico que esta cantidad normal, estaba «electrizado negativamente». Hoy en día, la gente utiliza su nomenclatura, pero con un significado diferente, es decir, suponiendo la existencia de dos tipos de electricidad o dos tipos de carga eléctrica.

Con su concepción de la conservación de las cargas eléctricas, Franklin subrayaba que la electricidad no se creaba, ni se generaba, ni se producía al frotar dos sustancias, ni en ningún otro proceso de electrización. Lo único que ocurría durante la fricción o cualquier otro proceso de electrización era una redistribución o transferencia de carga. En otras palabras, uno de los cuerpos recibía exactamente la misma cantidad de fluido eléctrico que perdía el otro cuerpo.

[16] Experimentos posteriores con la botella de Leiden confirmaron las predicciones de Gray, véase el capítulo 12. Entonces era posible recolectar electricidad y almacenarla durante mucho tiempo. También era posible aumentar el tamaño y la potencia de las chispas eléctricas producidas experimentalmente.

[17] Esta cita está tomada de un poema del poeta romano Virgilio (70–19 a. C.), *Geórgicas*, 4.176. Traducción libre: «Si podemos comparar las cosas pequeñas con las grandes.»

[18] La sugerencia de Gray fue confirmada en la década de 1750 por los experimentos realizados según las ideas de Benjamin Franklin.

[19] [Bos11] y [BAC12]; véase también la sección 6.10 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[20] [Hei99, capítulo 14], [SP06], [SP08] y [MB17].

[21] [Fra69], [Fra41] y [Mor04b].

[22] [Coh66], [Coh96] y [Hei99, capítulo 14: Benjamin Franklin].

En su primera carta de 1747, Franklin describía «el maravilloso efecto de los cuerpos puntiagudos, tanto para *atraer* como para *repeler* el fuego eléctrico». En primer lugar, presentó un experimento en el que un conductor puntiagudo y conectado a tierra extraía el fluido eléctrico de otro conductor electrizado que estaba aislado de la tierra, nuestras notas al pie de página:[23,24]

> Coloque una bola de hierro de tres o cuatro pulgadas [7 o 10 cm] de diámetro en la boca de una botella de vidrio limpia y seca.[25] Con un fino hilo de seda colgado del techo, justo encima de la boca de la botella, cuelgue una pequeña bola de corcho, del tamaño de una canica; el hilo debe ser lo suficientemente largo como para que el corcho pueda descansar contra el lado de la bola de hierro. Electrice la bola de hierro y el corcho será repelido a una distancia de cuatro o cinco pulgadas [10 o 12 cm], más o menos, dependiendo de la cantidad de electricidad. En este estado, si se acerca a la bola de hierro la punta de un punzón fino y afilado, a una distancia de entre seis y ocho pulgadas [15 y 20 cm], la repulsión se destruye instantáneamente y el corcho vuela hacia la bola de hierro. Para obtener el mismo efecto, se debe acercar un objeto romo a menos de una pulgada [2.5 cm] y producir una chispa. Para demostrar que el fuego eléctrico es *atraído* por la punta, si retira la punta del punzón del mango de madera y la fija en un palito de lacre, y luego la acerca a la distancia mencionada anteriormente, o si la acerca muy cerca, no se produce ningún efecto de este tipo; pero si desliza un dedo por la cera hasta tocar la punta, el corcho vuela inmediatamente hacia la bola de hierro.[26]

Su primera descripción de un conductor puntiagudo que emite fluido eléctrico:[27,28]

> Para demostrar que las puntas pueden *repeler** y *atraer* el fuego eléctrico, coloque una aguja larga y puntiaguda sobre el proyectil y verá que no podrá electrizarlo para que repela la bola de corcho.
>
> * Este efecto punta de *repeler* el fuego eléctrico me lo comunicó por primera vez mi ingenioso amigo M. *Thomas Hopkinson*, hoy fallecido, cuya virtud e integridad, en

[23] [Fra69, Letter II, pp. 3–4], [Coh96, pp. 23–24], [Hei99, pp. 327–328] y [MB17].

[24] Place an iron shot of three or four inches diameter on the mouth of a clean dry glass bottle. By a fine silken thread from the cieling, right over the mouth of the bottle, suspend a small cork-ball, about the bigness of a marble; the thread of such a length, as that the cork-ball may rest against the side of the shot. Electrify the shot, and the ball will be repelled to the distance of four or five inches, more or less, according to the quantity of Electricity.—When in this state, if you present to the shot the point of a slender sharp bodkin, at six or eight inches distance, the repellency is instantly destroyed, and the cork flies to the shot. A blunt body must be brought within an inch, and draw a spark, to produce the same effect. To prove that the electrical fire is *drawn off* by the point, if you take the blade of the bodkin out of the wooden handle, and fix it in a stick of sealing-wax, and then present it at the distance aforesaid, or if you bring it very near, no such effect follows; but sliding one finger along the wax till you touch the blade, and the ball flies to the shot immediately.

[25] Esta botella de vidrio actúa como aislante.

[26] La cera para sellar es un aislante. En este experimento, la punta metálica ya no está conectada a tierra al principio, ya que la cera para sellar actúa aquí como un mango que aísla la punta de la mano de Franklin. La punta solo se conecta a tierra cuando el dedo la toca. En ese momento, se produce la descarga del proyectil de hierro.

[27] [Fra69, p. 5] y [Coh96, pp. 23–24].

[28] To shew that points will *throw off** as well as *draw off* the electrical fire; lay a long sharp needle upon the shot, and you cannot electrify the shot, so as to make it repel the cork-ball.

* This power of points to *throw off* the electrical fire, was first communicated to me by my ingenious friend Mr. *Thomas Hopkinson*, since deceased, whose virtue and integrity, in every station of life, public and private, will ever make his Memory dear to those who knew him, and know how to value him.

> todos los ámbitos de la vida, pública y privada, harán que su recuerdo siga siendo querido por aquellos que lo conocieron y saben apreciarlo.

En este experimento se volvió a utilizar una bola de hierro aislada del suelo, ya que estaba sostenida por una botella de vidrio. A pesar de ello, no fue posible electrizar la bola, ya que todo el fluido eléctrico adquirido se pierde en el aire a través de la larga aguja puntiaguda.

Presentó un experimento similar que ilustraba la emisión del fluido eléctrico, a saber:[29,30]

> O fije una aguja al extremo de un cañón suspendido o de una varilla de hierro, de manera que sobresalga como una pequeña bayoneta†; mientras permanezca en su sitio, el cañón o la varilla no pueden electrizarse aplicando el tubo al otro extremo para producir una chispa, el fuego escapará continua y silenciosamente por ese extremo.
>
> † Se trataba de un experimento del Sr. *Hopkinson*, realizado con la esperanza de producir una chispa más viva y potente desde la punta, como desde una especie de foco, y se sorprendió al constatar que había poca o ninguna.

Una vez más, el punto conductor evita la acumulación de cargas en la varilla metálica.

La experiencia anterior, en la que Franklin había extraído el fluido eléctrico de un conductor aislado y electrizado con ayuda de otro conductor puntiagudo y conectado a tierra, le había inspirado. Razonando de manera análoga, sugirió probar la idea de que los rayos podrían ser un efecto similar, pero a una escala mucho mayor. En una carta de 1750, publicada en 1751, propuso el experimento de la garita para probar la electrización de las nubes, nuestras palabras entre corchetes:[31,32]

> 21. Para determinar si las nubes que contienen rayos están electrizadas o no, propondría realizar un experimento en un lugar donde sea fácil hacerlo. En lo alto de una torre o campanario, coloque una especie de garita (como en la Fig. 9 [véase la figura 11.15]) lo suficientemente grande como para albergar a una persona y un soporte eléctrico [es decir, un soporte aislante]. En el centro del soporte, pase

[29] [Fra69, p. 5] y [Coh96, p. 24].

[30] Or fix a needle to the end of a suspended gun-barrel, or iron-rod, so as to point beyond it like a little bayonet†; and while it remains there, the gun-barrel, or rod, cannot by applying the tube to the other end be electrified so as to give a spark, the fire continually running out silently at the point.

† This was Mr. *Hopkinson*'s Experiment, made with an expectation of drawing a more sharp and powerful spark from the point, as from a kind of focus, and he was surprized to find little or none.

[31] [Fra69, pp. 65–66], [Coh96, p. 70], [Hei99, pp. 340–341] y [SP06].

[32] 21. To determine the question, whether the clouds that contain lightning are electrified or not, I would propose an experiment to be tried where it may be done conveniently. On the top of some high tower or steeple, place a kind of sentry-box (as in Fig. 9) big enough to contain a man and an electrical stand [that is, an insulating stand]. From the middle of the stand let an iron rod rise and pass bending out of the door, and then upright 20 or 30 feet, pointed very sharp at the end. If the electrical stand be kept clean and dry, a man standing on it when such clouds are passing low, might be electrified and afford sparks, the rod drawing fire to him from a cloud. If any danger to the man should be apprehended (though I think there would be none) let him stand on the floor of his box, and now and then bring near to the rod the loop of a wire that has one end fastened to the leads, he holding it by a wax handle [that is, by an insulating handle]; so the sparks, if the rod is electrified, will strike from the rod to the wire, and not affect him.

una varilla de hierro que sobresalga de la puerta y suba verticalmente unos 20 o 30 pies [6 a 9 metros], con un extremo muy puntiagudo. Si el soporte eléctrico se mantiene limpio y seco, un hombre de pie sobre él cuando tales nubes pasan a baja altitud podría electrizarse y producir chispas, ya que la varilla atraería hacia él el fuego procedente de una nube. Si se temiera algún peligro para el hombre (aunque creo que no lo hay), que se mantuviera de pie en el suelo de su caja y que de vez en cuando acercara a la varilla el bucle de un alambre cuyo extremo está fijado a los conductores, sujetándolo por un mango de cera [es decir, por un mango aislante]; así, si la varilla está electrizada, las chispas saltarán de la varilla al alambre y no le afectarán.

Figura 11.15: El experimento de la garita sugerido por Franklin.

Franklin no realizó este experimento. Se llevó a cabo por primera vez en mayo de 1752 en la ciudad de Marly, Francia, inspirado por la carta de Franklin. Lo realizó el traductor francés de su libro, T. F. D'Alibard (1709–1778). La descripción del experimento se publicó poco después, con nuestros comentarios entre corchetes:[33,34]

[33] [Fra69, p. 107], [Coh96, pp. 127–130] y [Hei99, pp. 349–351].

[34] M. *D'Alibard* chose, for this purpose, a garden situated at *Marly*, where he placed upon an electrical body [that is, upon an insulator] a pointed bar of iron, of 40 feet high. On the tenth of *May*, 20 minutes past two in the afternoon, a stormy cloud having passed over the place where the bar stood, those, that were appointed to observe it, drew near, and attracted from it sparks of fire, perceiving the same kind of commotions as in the common electrical experiments.

M. *De Lor*, sensible of the good success of this experiment, resolved to repeat it at his house in the *Estrapade* at *Paris*. He raised a bar of iron 99 feet high, placed upon a cake of resin [insulator], two feet square, and three inches thick. On the 18th of *May*, between four and five in the afternoon, a stormy cloud

> El Sr. *D'Alibard* eligió para ello un jardín situado en *Marly*, donde colocó sobre un cuerpo eléctrico [es decir, sobre un aislante] una barra de hierro puntiaguda de 40 pies [12 m] de altura. El 10 de mayo, a las 14:20, cuando una nube tormentosa pasó por encima del lugar donde se encontraba la barra, los encargados de observarla se acercaron y sacaron chispas de fuego, percibiendo el mismo tipo de perturbaciones que en los experimentos eléctricos habituales.
>
> El Sr. *De Lor*, consciente del éxito de este experimento, decidió repetirlo en su casa, en *L'Estrapade*, en *París*. Levantó una barra de hierro de 99 pies [30 m] de altura, colocada sobre un bloque de resina [aislante] de dos pies cuadrados [60 cm × 60 cm] y tres pulgadas [7.5 cm] de grosor. El 18 de mayo, entre las cuatro y las cinco de la tarde, una nube tormentosa pasó por encima de la barra, donde permaneció media hora, y provocó chispas similares a las de un cañón, como cuando, en los experimentos eléctricos, la esfera solo se frota con el cojín [de un generador eléctrico de fricción], y produjeron el mismo ruido, el mismo fuego y el mismo crujido. Las chispas más fuertes se dispararon a una distancia de nueve líneas, mientras que la lluvia, mezclada con un poco de granizo, caía de la nube, sin truenos ni relámpagos; esta nube no era, según todas las apariencias, más que la consecuencia de una tormenta que se había producido en otro lugar.

D'Alibard incluyó una representación del experimento de Marly en la segunda edición de la traducción francesa del libro de Franklin, figura 11.16. El aspecto principal a destacar de este experimento es que la barra de hierro conductora estaba aislada eléctricamente del suelo. Este aislamiento se conseguía mediante los cordones de seda que sujetaban la barra y también mediante las botellas de vino vacías colocadas entre el pequeño banco y la tabla de madera sobre la que descansaba el extremo inferior de la barra.

Debido al efecto punta, cuando había una alta tensión entre la nube electrizada y la barra de hierro, el aire cercano al extremo superior de la barra se comportaba como un conductor. La barra conductora aislada recogía entonces una pequeña parte de la electricidad de la nube. Cuando se acercaba a la barra un conductor conectado a tierra, se producían chispas. Estas chispas tenían las mismas propiedades que las descargas habituales obtenidas en los experimentos electrostáticos. Estos experimentos fueron los primeros en demostrar la identidad del rayo con la electricidad. Algunos científicos anteriores, como Stephen Gray, ya habían presentado esta conjetura, pero Franklin fue el primero en proponer un experimento específico para probar esta sugerencia. D'Alibard realizó su experimento bajo la influencia directa de la predicción de Franklin. Rápidamente se llevaron a cabo experimentos similares en varios países utilizando barras conductoras aisladas del suelo.

Los experimentos 11.1, 11.2 y 11.8 son similares al experimento de Marly, aunque a una escala mucho menor. No se produjeron chispas en estos experimentos. Sin embargo, la electrización de un electroscopio y la orientación de un versorio por el

having passed over the bar, where it remained half an hour, he drew sparks from the bar, like those from the gun barrel, when, in the electrical experiments the globe is only rubbed by the cushion [of a frictional electric generator], and they produced the same noise, the same fire, and the same crackling. They drew the strongest sparks at the distance of nine lines, while the rain, mingled with a little hail, fell from the cloud, without either thunder or lightning; this cloud being, according to all appearance, only the consequence of a storm, which happened elsewhere.

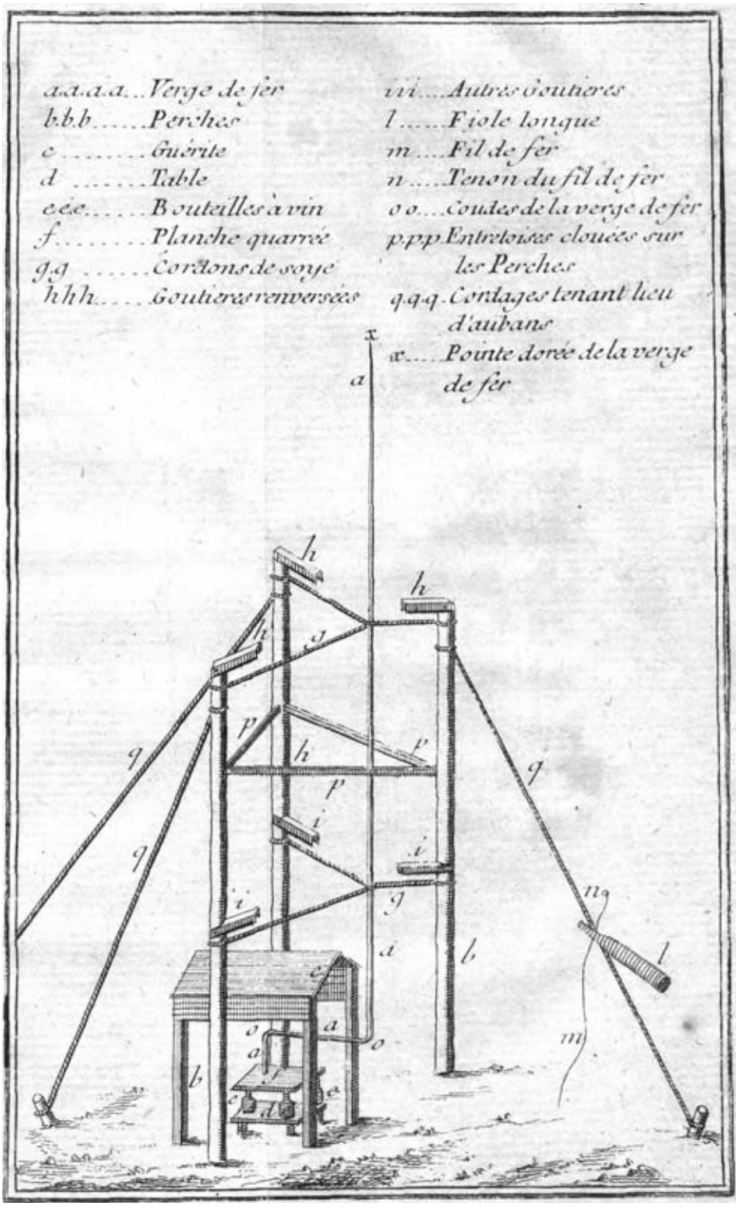


Figura 11.16: Barra de hierro aislada del suelo.

alambre de prueba indican ciertos efectos que se producen en un conductor aislado cuyo extremo está cerca de otro cuerpo electrizado.

Es evidente que es muy peligroso realizar experimentos como los de Marly al aire libre utilizando barras conductoras aisladas del suelo. En 1753, el científico ruso de

origen alemán G. W. Richmann (1711–1753) murió en San Petersburgo como consecuencia de una descarga repentina de su barra aislada mientras realizaba experimentos de este tipo durante una tormenta.[35]

En 1752, Franklin también sugirió un experimento con una cometa para comprobar la electricidad de las nubes. Varios científicos llevaron a cabo rápidamente experimentos de este tipo.[36]

Franklin estaba totalmente convencido de la identidad entre los rayos y las chispas habituales, incluso antes de que esta conjetura fuera confirmada en 1752 por el experimento de Marly. En una carta de 1750 dirigida a su amigo Peter Collinson (1694–1768) y publicada poco después, proponía la construcción de pararrayos para proteger los edificios contra las descargas eléctricas. Existe una gran diferencia entre los pararrayos de protección y las varillas de prueba, como se indica en las secciones 11.3 y 11.4. Los pararrayos están conectados a tierra, mientras que las varillas de prueba están aisladas de la tierra. Las varillas de prueba se pueden utilizar para recoger una pequeña cantidad de electricidad de las nubes o de la atmósfera. Los pararrayos no están diseñados para recoger electricidad, sino para proteger los edificios. Primera sugerencia de Franklin sobre un pararrayos de protección:[37,38]

> ... ¿No podría ser útil para la humanidad conocer este efecto punta para proteger las casas, las iglesias, los barcos, etc. contra los rayos, indicándonos que fijemos en las partes más altas de estos edificios varillas de hierro rectas, afiladas como agujas y doradas para evitar la oxidación, y desde la base de estas varillas, un alambre metálico que descienda por el exterior del edificio hasta el suelo, o que descienda alrededor de uno de los obenques de un barco y a lo largo de su costado hasta llegar al agua? ¿No atraerían estas varillas puntiagudas silenciosamente el fuego eléctrico de las nubes antes de que se acercara lo suficiente para golpear, protegiéndonos así de esta repentina y terrible desgracia?

El experimento 11.7 ilustra a pequeña escala el mecanismo de funcionamiento de un pararrayos. El electroscopio cargado se descarga mediante un alambre conectado a tierra situado en las proximidades. La descarga no afecta a la casa vecina, que está aislada del alambre.

Los primeros pararrayos se construyeron en Europa y América del Norte en 1752, poco después del experimento de Marly. La invención del pararrayos le valió a Franklin una gran fama y motivó el estudio de la electricidad atmosférica no solo en tiempo de tormenta, sino también en tiempo seco, lo que constituyó una de las primeras aplicaciones prácticas a gran escala de la investigación sobre la electricidad.

---

[35] [Coh96, pp. 5–6, 84–85, 113, 135 y 157], [Hei99, pp. 352, 390, 391 y 460] y [Lom17].

[36] [Coh96, pp. 5, 28, 67–70, 97, 125 y 130], [Hei99, p. 351] y [SP06].

[37] [Fra69, p. 65] y [Coh96, p. 83].

[38] ... may not the knowledge of this power of points be of use to mankind, in preserving houses, churches, ships, &c. from the stroke of lightning, by directing us to fix on the highest parts of those edifices, upright rods of iron made sharp as a needle, and gilt to prevent rusting, and from the foot of those rods a wire down the outside of the building into the ground, or down round one of the shrouds of a ship, and down her side till it reaches the water? Would not these pointed rods probably draw the electrical fire silently out of a cloud before it came nigh enough to strike, and thereby secure us from that most sudden and terrible mischief?

11.8 Aplicaciones del efecto punta

El efecto punta se aplicó en numerosas situaciones. Aquí algunos ejemplos:

- En este libro, el efecto punta se utilizó cada vez que se cargó un electroscopio raspando una pajita contra el borde del cartón. Se consigue una electrización más eficaz raspando la pajita contra el borde del cartón que contra sus partes romas. Al fin y al cabo, el borde es más afilado que el cuerpo del rectángulo de cartón. Durante el proceso de raspado, la transferencia de partículas electrizadas puede tener lugar no solo durante el contacto entre la pajita frotada y el cartón, sino también cuando la pajita y el cartón están muy cerca uno del otro, sin contacto. En esta última situación, la electrización tiene lugar cuando el aire entre el borde afilado y la pajita electrizada se ioniza. El aire ionizado se comporta como un conductor, facilitando el intercambio de partículas electrizadas.[39]
- Pararrayos.
- Una aplicación importante se encuentra en el microscopio de emisión de campo, un aparato inventado en 1936 por el físico Erwin Wilhelm Müller (1911–1977).
- Se utiliza en motores electrostáticos y en fenómenos asociados con lo que se denomina «viento eléctrico».[40]
- En fotocopiadoras.
- En generadores Van de Graaff.
- En microscopios de fuerza atómica.
- Etc.

[39] [FM91, p. 61].
[40] [Jef71b], [Jef71a], [JW71] y [Jef73].

Capítulo 12

La botella de Leiden y los condensadores

12.1 La fabricación de un condensador

Esta sección muestra cómo construir un dispositivo eléctrico muy importante llamado «condensador» o «condensador eléctrico». Almacena cargas y energía eléctrica. El primer dispositivo de este tipo, llamado «botella de Leiden», se construyó alrededor de 1745 y se presenta en la sección 12.5.

Un condensador es un dispositivo compuesto esencialmente por dos conductores separados por un aislante. Por lo general, el aislante es fino y los conductores tienen caras paralelas, casi superpuestas entre sí. Puede tener varias formas: placas paralelas, cilíndricas, botellas o jarras, etc. Antes de comenzar la construcción, compruebe que el material que se utilizará como aislante se comporta realmente de esta manera. Esta prueba es muy importante. Para ello, utilice el procedimiento indicado en la figura 3.4. Si este material no descarga un electroscopio electrizado al tocarlo durante unos 30 segundos, puede considerarse un buen aislante. A partir de ahora, utilizaremos como aislantes platos, botellas y tarros de plástico o poliestireno.

El condensador más simple es el condensador de placas paralelas. Fue inventado por personas relacionadas con Benjamin Wilson (1721–1788) y popularizado por Benjamin Franklin.[1] Franklin utilizó una placa de vidrio como aislante. En este trabajo, el aislante será una placa de plástico rígido, como un plato de fiesta de cumpleaños, o una placa fina de poliestireno. Se debe pegar un rectángulo (o un disco) de papel de aluminio a cada lado del rectángulo (o disco) de plástico. Las láminas conductoras deben ser ligeramente más pequeñas que el plástico y no deben tocarse entre sí, figura 12.1.

Un dispositivo muy común, generalmente denominado «botella de Leiden», puede fabricarse a partir de una botella de plástico de 200 o 300 ml que contenga agua.[2] Se debe pegar una tira de papel de aluminio en la parte exterior de la botella, cubriendo

[1] [Hei99, p. 317, nota 31 y pp. 333–334, nota 29].
[2] [MFsd].

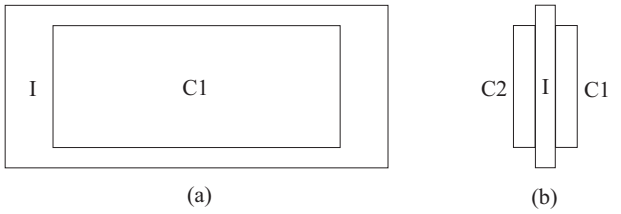


Figura 12.1: (a) Condensador de placas paralelas rectangulares visto desde arriba: conductor C_1 sobre el aislante I. Hay otro conductor C_2 debajo del aislante (no representado en la figura de la izquierda). (b) Sistema visto de perfil.

aproximadamente tres cuartas partes de la cara lateral, dando una vuelta completa alrededor de la botella. Haga un agujero en el centro del tapón de plástico. Pase un alambre metálico, un clavo o un tornillo largo por este agujero. Lo ideal es que el tornillo tenga una cabeza redondeada por encima de la tapa para evitar pérdidas debidas al efecto punta cuando el sistema está electrizado. La cabeza puede ser esférica, como una bola metálica, o en forma de gancho. El conductor interno puede ser simplemente agua del grifo. También es posible llenar la botella con papel de aluminio o lana de acero. El alambre metálico, el clavo o el tornillo deben penetrar en el agua, el papel de aluminio o la lana de acero, figura 12.2.

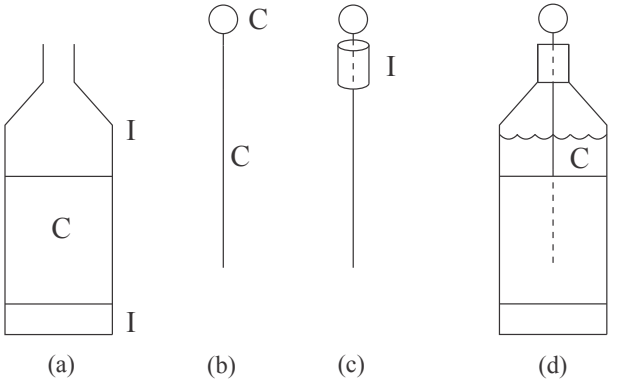


Figura 12.2: (a) Botella de plástico aislante I rodeada por una tira conductora C en la cara exterior. (b) Tornillo conductor C con cabeza redondeada. (c) Tornillo que atraviesa un orificio en el centro del tapón aislante I. (d) Condensador montado y relleno de un material conductor C (agua, papel de aluminio o lana de acero).

Se pueden fabricar muchos otros tipos de condensadores de manera similar. Algunos ejemplos:[3] (a) Uso de envases de yogur de plástico recubiertos con papel de aluminio en el exterior. El envase se llena con papel de aluminio. (b) Uso de pequeños envases cilíndricos de plástico (como los de vitamina C o hilo dental). Se pega una tira de papel de aluminio en el exterior y se coloca lana de acero en el interior.

[3] [FM91, pp. 76–83], [Fersdb, Garrafa de Leyden, p. 31] y [Fersdc, pp. 73–79].

(c) Una pajita de plástico con papel de aluminio en el interior y en el exterior, etc. El conductor interno está conectado al exterior mediante un clavo, un alambre metálico, un soporte o un tensor de papel que pasa por el centro de la tapa o la tapa de plástico.

El condensador es un dispositivo que almacena carga eléctrica y energía. Podemos establecer las siguientes definiciones:

Definición 12.1

Se dice que un condensador está «cargado», «alimentado» o «electrizado» cuando hay una carga eléctrica $Q \neq 0$ en el conductor interno y una carga eléctrica $-Q$ en el conductor externo. Un condensador está «descargado» cuando no hay carga en el conductor interno ni en el conductor externo, es decir, cuando $Q = -Q = 0$.

En la primera situación, $Q \neq 0$, mientras que en la segunda, $Q = 0$. En ambos casos, no hay carga neta en todo el sistema, $Q + (-Q) = 0$, tanto si el condensador está cargado ($Q \neq 0$) como si está descargado ($Q = 0$). La diferencia entre estas dos situaciones es que, cuando el condensador está cargado, hay energía eléctrica almacenada en el sistema que puede producir numerosos efectos (chispas, descargas eléctricas, etc.). Dado que no hay carga total en ninguna de las dos situaciones, sería más adecuado decir que el condensador está «polarizado eléctricamente» en la primera situación. Sin embargo, como se suele decir que el condensador está «cargado eléctricamente» en la primera situación, mantendremos esta nomenclatura. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que en ambas situaciones no hay carga neta en el sistema en su conjunto, incluso cuando se dice que el condensador está cargado.

12.1.1 No utilice botellas de vidrio para aislar el conductor interno del conductor externo

Cabe destacar una vez más que la mayoría de los tipos de vidrio modernos se comportan como conductores en los experimentos habituales de electrostática, sección 4.3. Conocemos a algunas personas que intentaron construir botellas de Leiden a partir de botellas de vidrio y no lograron reproducir algunos experimentos sencillos. El término «botella» sugiere una botella de vidrio. Muchas personas piensan que el vidrio, la madera y el agua son aislantes, ya que los manuales presentan sus constantes dieléctricas. Sin embargo, la mayoría de los materiales modernos de vidrio o madera se comportan como conductores. Si utilizamos una botella de vidrio conductora para construir una botella de Leiden, no acumulará cargas opuestas en sus partes internas y externas. Por lo tanto, los experimentos realizados con estas botellas conductoras no funcionarán, véase también la sección 6.3.

Para utilizar una botella de vidrio para construir un condensador o una botella de Leiden, primero debemos comprobar su comportamiento conductor. Solo los tipos específicos de vidrio que se comportan como buenos aislantes pueden utilizarse en estos dispositivos. El comportamiento conductor de cualquier material puede comprobarse con un simple electroscopio, sección 3.1, experimento 3.3, figura 3.4.

12.2 Experimentos con el condensador

Experimento 12.1 — *Cargar y descargar un condensador*

Utilice un pequeño condensador cilíndrico fabricado con un recipiente de plástico, como los que se utilizan para el hilo dental, de unos 5 cm de altura y 3 cm de diámetro. Se pega una tira de papel de aluminio en el exterior y se rellena el cilindro con lana de acero, figura 12.3 (a). Esta lana de acero debe estar en contacto con el clavo que atraviesa el centro de la tapa de plástico, con la cabeza del clavo en el exterior, figura 12.3 (b).

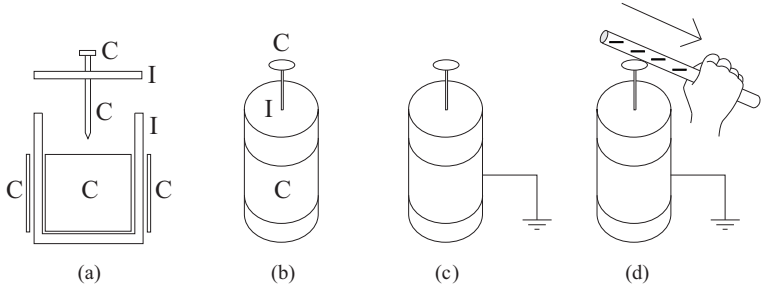


Figura 12.3: (a) Condensador cilíndrico compuesto por conductores C y aislantes I. (b) Sistema montado. (c) Condensador conectado a tierra. (d) Raspar una pajita electrizada sobre la cabeza de un clavo.

Electrice una pajita o una regla acrílica frotándola con el cabello, una toalla o un paño de algodón. Conecte el condensador a tierra. Para ello, sujete el cilindro mientras tocas la tira externa de papel de aluminio, figura 12.3 (c). Raspe la pajita frotada con la otra mano sobre la cabeza del clavo, figura 12.3 (d). Este procedimiento debe repetirse varias veces para cargar el condensador.

A partir de ahora, considere que el condensador se cargó o electrizó. Sujete la tira de papel de aluminio del cilindro con la mano. La mano conductora se representa con la letra C en la figura 12.4 (a). Acerque un dedo a la cabeza del clavo. Cuando están muy cerca uno del otro, sentimos una pequeña descarga. A veces, podemos ver una chispa en una habitación oscura y oír un chasquido durante la descarga, figura 12.4 (b).

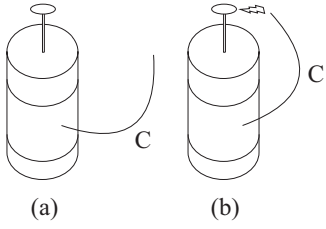


Figura 12.4: (a) Condensador cargado con una mano conductora C conectada a la tira de papel de aluminio. (b) Se produce una chispa cuando se acerca un dedo a la cabeza del clavo.

Experimento 12.2 — *Descargar un condensador sin recibir una descarga eléctrica*

Es posible realizar el experimento 12.1 sin sentir descargas eléctricas.[4] Un extremo del conductor debe fijarse a la tira de papel de aluminio. Las otras partes del conductor deben estar alejadas de la cabeza del clavo. Este conductor puede ser un alambre de cobre, un tensor de papel o un soporte metálico, como se muestra en la figura 12.5 (b).

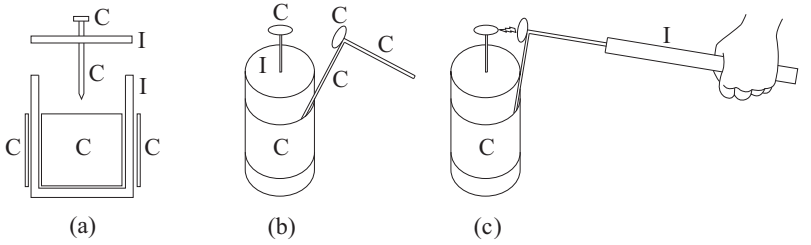


Figura 12.5: (a) Condensador cilíndrico compuesto por conductores C y aislantes I. (b) Sistema montado con un tensor de papel conectado a la tira de papel de aluminio. La cabeza del tensor de papel está alejada de la cabeza del clavo. (c) Se produce una chispa cuando la cabeza del tensor de papel se acerca mucho a la cabeza del clavo.

A partir de ahora, considere que el condensador está cargado. Sostenga una regla acrílica en la mano, con el extremo libre tocando el conductor conectado a la tira de papel de aluminio. Mueva la cabeza del tensor de papel hacia la cabeza del clavo. Cuando están muy cerca una de otra, se produce una chispa y no sentimos ninguna descarga, figura 12.5 (c).

Experimento 12.3 — *Cargar un condensador mediante un electroforo*

El experimento 12.1 puede realizarse más fácilmente utilizando un electroforo para cargar el condensador. Mientras se sujeta el cilindro por su tira exterior de papel de aluminio, toque varias veces la cabeza del clavo con el colector de carga electrizado de un electroforo. Cuando el sistema está bien cargado, se puede sentir una descarga al tocar simultáneamente la tira de papel de aluminio y la cabeza del clavo con la misma mano.

Experimento 12.4 — *Cargar y descargar una botella de Leiden*

Este experimento muestra cómo obtener efectos más importantes e intensos utilizando una botella de Leiden compuesta por una botella de plástico de 200 o 300 ml. Utilice un electroforo para cargar este condensador. El colector de carga de este electroforo será un molde para pizza de 30 cm de diámetro provisto de un mango aislante en su centro. Electrice el colector de carga del electroforo. Está representado por el disco metálico electrizado junto a la botella de Leiden en la figura 12.6 (a). Este colector de carga solo debe manipularse por su mango aislante. Sujete la tira externa de papel de aluminio con la mano, conectándola a tierra, como se indica en la figura.

[4] [Fersdc, p. 73].

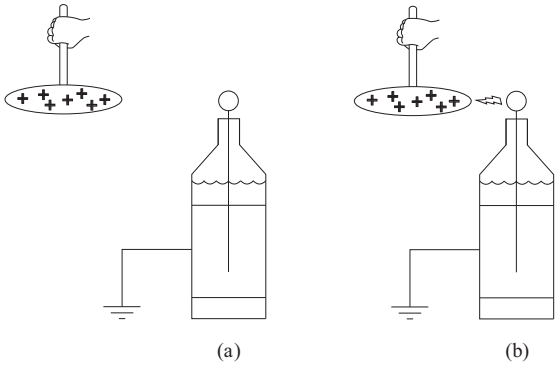


Figura 12.6: (a) Una botella de Leiden descargada y conectada a tierra. Un electroforo electrizado se encuentra lejos de ella. (b) Se puede cargar el condensador cuando el electroforo se coloca muy cerca de la cabeza del tornillo.

Electrice varias veces la botella de Leiden con este colector de carga. Para ello, no es necesario que el colector de carga esté en contacto con la cabeza redondeada del tornillo de la botella. Normalmente, cuando se acercan mucho entre sí, se oye un crujido seguido de una chispa, especialmente cuando se acerca un borde del molde para pizza a la cabeza del tornillo, figura 12.6 (b). Este procedimiento de carga debe repetirse entre 5 y 10 veces.

A partir de ahora, supongamos que el condensador está bien cargado, con una cantidad suficiente de electricidad positiva en uno de sus conductores. Se puede conectar a tierra o aislar de la tierra. Toque con un dedo la tira externa de papel de aluminio para conectarla a tierra, figura 12.7 (a). Entonces podemos sentir una buena descarga al tocar simultáneamente con un dedo la tira de papel de aluminio de la botella y con otro dedo la cabeza de su tornillo. A veces, este último contacto no es necesario. Basta con acercar un dedo muy cerca de la cabeza del tornillo para sentir la descarga y ver la chispa, figura 12.7 (b).

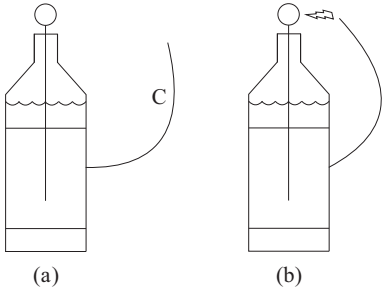


Figura 12.7: (a) Botella de Leiden cargada sostenida en la mano por el papel de aluminio conductor. (b) Cuando se acerca un dedo a la cabeza del tornillo, se produce una chispa que descarga el condensador.

La figura 12.8 (a) muestra cómo obtener una chispa sin sentir una descarga eléctrica. La botella de Leiden se carga inicialmente. Tome un alambre de cobre flexible de 20 o 30 cm de largo. Enrolle una parte del mismo alrededor de una regla acrílica aislante. Enrolle otra parte alrededor de otra regla acrílica. Los extremos libres del alambre deben sobresalir de las reglas.

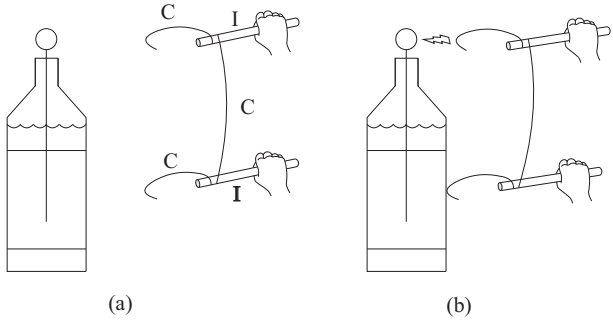


Figura 12.8: (a) Botella de Leiden cargada. Un solo alambre de cobre enrollado alrededor de dos reglas acrílicas. (b) Descarga de la botella conectando su conductor externo al extremo libre de un alambre de cobre y acercando el otro extremo del alambre muy cerca de la cabeza del tornillo.

Sujete cada regla con una mano. Toque un extremo libre del alambre de cobre en la tira de papel de aluminio. Cuando se acerca el otro extremo libre del alambre a la cabeza del tornillo, se produce una chispa y un ruido seco, figura 12.8 (b). No sentimos ninguna descarga durante este proceso de descarga.

Experimento 12.5 — *Cargar un condensador cilíndrico por su tira conductora lateral*

Los condensadores de los experimentos 12.1 y 12.3 también se pueden cargar raspando la pajita sobre la tira de aluminio pegada al exterior del cilindro. Para obtener una electrización suficiente, el condensador debe conectarse a tierra mediante su conductor interno. Para ello, toque el clavo con un dedo, figura 12.9 (a). Mientras el condensador está conectado a tierra, raspe una regla acrílica frotada contra la tira de papel de aluminio externa del condensador, figura 12.9 (b). Este proceso debe repetirse entre 5 y 10 veces.

A partir de ahora, supongamos que este condensador tiene una carga eléctrica suficientemente grande. Toque su conductor interno con un dedo, figura 12.10 (a). Cuando otro dedo se acerca a la tira de aluminio, sentimos una descarga y, a veces, percibimos una chispa, figura 12.10 (b).

El condensador también se puede cargar a través de su tira externa utilizando un electroforo. Inicialmente, el condensador debe conectarse a tierra a través de su conductor interno. Esta conexión a tierra se puede realizar tocando la cabeza del clavo con un dedo. Una vez que el condensador esté conectado a tierra, acerque el colector de carga de un electroforo a la tira externa de papel de aluminio. Cuando el borde del colector de carga electrizado está muy cerca de la tira externa, se produce una chispa. Este procedimiento de carga debe repetirse entre 5 y 10 veces.

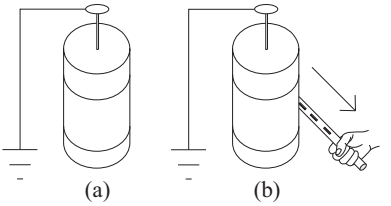


Figura 12.9: (a) Condensador descargado conectado a tierra por su conductor interno. (b) Cargue el condensador mientras está conectado a tierra, raspando una regla acrílica sobre su tira externa de papel de aluminio.

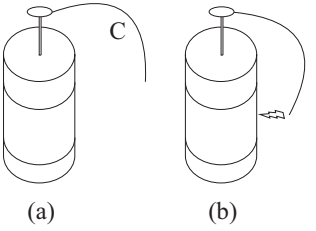


Figura 12.10: (a) Condensador cargado con un conductor C que toca el clavo. (b) Cuando el extremo libre de este conductor se acerca a la tira de papel de aluminio, se produce una chispa, sentimos una descarga y el condensador se descarga.

Supongamos que el condensador se electrizó. Entonces se puede descargar fácilmente cuando la misma mano toca la cabeza del clavo y la tira de papel de aluminio.

Experimento 12.6 — *Poner a tierra uno de los dos conductores de un condensador cargado sin descargarlo*

Cargue los condensadores como en los experimentos 12.1 y 12.3. Para ello, los condensadores deben estar conectados a tierra durante el proceso de carga. Retire la mano de la tira externa de papel de aluminio. El condensador electrizado debe descansar sobre una mesa. La parte inferior de los condensadores utilizados en este trabajo es de plástico, como se muestra en las figuras 12.2 y 12.3 (b). Por lo tanto, cuando estos condensadores cargados se colocan sobre una mesa, quedan aislados del suelo. Si una parte de la tira externa de papel de aluminio se encuentra en la parte inferior del cilindro, el condensador debe apoyarse sobre un aislante (como una placa de poliestireno) antes de realizar este experimento.

Cuando un dedo toca la cabeza del clavo o del tornillo de este condensador cargado y aislado, no sentimos ninguna descarga. Se trata de una observación pertinente. Un condensador cargado aislado del suelo no se descarga cuando un dedo toca su conductor interno. En otras palabras, no se descarga al conectar su conductor interno a tierra.

Retire el dedo del clavo o del tornillo. Ahora podemos tocar solo su tira externa de papel de aluminio. Una vez más, no sentiremos ninguna descarga procedente de este condensador cargado. Esta es otra observación relevante. Un condensador cargado

aislado del suelo no se descarga cuando un dedo toca su conductor externo. En otras palabras, no se descarga al conectar su conductor externo a tierra.

Sin embargo, cuando tocamos simultáneamente la cabeza del clavo y la tira de papel de aluminio, sentimos una descarga.

Experimento 12.7 — *Comparar las cargas adquiridas por un condensador conectado a tierra y por otro condensador que no está conectado a tierra*

En este experimento, electrifique el condensador sin conectarlo a tierra durante el proceso de carga. Comience con una botella de Leiden descargada colocada sobre una mesa. Electrifíquela utilizando el colector de carga de un electroforo. Supongamos que este colector de carga es un disco conductor provisto de un mango aislante en su centro. Electrice este colector de carga y manipúlelo únicamente por su mango. A continuación, acerque un borde de su disco electrizado a la cabeza del clavo o del tornillo del condensador. Se puede observar una chispa cuando están muy cerca uno del otro.

Compare la chispa producida en este experimento con la producida en los experimentos 12.3 y 12.4, en los que la botella estaba conectada a tierra. La primera observación que se puede hacer es que la chispa y el ruido de chasquido son ahora más débiles que los producidos con la botella conectada a tierra.

Acerque cinco veces el disco electrizado del colector de carga de un electroforo a la cabeza del clavo del condensador aislado. Después de este proceso de carga, descárguelo tocando simultáneamente la tira de papel de aluminio y la cabeza del clavo, lo que provocará una descarga. Sin embargo, esta descarga es más débil que la producida al seguir el mismo procedimiento con un condensador conectado a tierra. Supongamos que un condensador está inicialmente descargado y conectado a tierra por su tira de papel de aluminio. Acerque cinco veces el disco electrizado del colector de carga de un electroforo a la cabeza del clavo de este condensador conectado a tierra. Después de este proceso de carga, descárguelo tocando simultáneamente la tira de papel de aluminio y la cabeza del clavo, lo que provocará una descarga eléctrica importante.

Repita este procedimiento de carga con un condensador aislado. Es decir, acerque cinco veces el disco electrizado del colector de carga de un electroforo a la cabeza del clavo del condensador aislado. Ahora conecte este condensador a tierra por su clavo tocando su cabeza con un dedo. Solo sentiremos una pequeña descarga y el condensador se descargará por completo.

Repita una vez más este procedimiento de carga con un condensador aislado. Coloque el dorso de la mano cerca de la tira de papel de aluminio de este condensador cargado y aislado. A veces, sentimos que los pelos de la mano son atraídos por esta tira. Cuando tocamos la tira, sentimos una pequeña descarga. Sin embargo, el condensador no se descarga completamente con este procedimiento de conexión a tierra (la conexión a tierra se realiza aquí mediante la tira externa de papel de aluminio). Para descargar completamente este condensador electrizado, debemos tocar simultáneamente su tira y la cabeza del clavo, sintiendo una pequeña descarga durante esta descarga.

12.3 El mecanismo de funcionamiento del condensador

Esta sección describe estos experimentos utilizando el hecho de que existe un aislante entre los conductores del condensador. Idealmente, este aislante impide el intercambio de partículas electrizadas entre los conductores internos y externos de una botella de Leiden.

Consideremos la situación en la que la botella está cargada mientras su conductor externo está conectado a tierra, es decir, cuando sostenemos su tira de aluminio con la mano. Supongamos que raspamos una pajita cargada positivamente sobre la cabeza del tornillo. También podemos acercar un colector de carga con carga positiva a la cabeza del tornillo, lo que produce una chispa cuando están muy cerca. En estas situaciones, el conductor interno del condensador se carga positivamente. Como la tira externa está conectada a tierra, se produce un intercambio de partículas electrizadas con la tierra. Esta tira se carga negativamente. Las cargas positivas del conductor interno se distribuyen principalmente a lo largo de la parte de su superficie que está cerca del conductor externo. Del mismo modo, las cargas negativas del conductor externo se distribuyen principalmente a lo largo de la parte de su superficie que está cerca del conductor interno.

La figura 12.11 muestra condensadores electrizados de varias formas. Sus conductores se representan con C_1 y C_2, y el aislante intermedio con I.

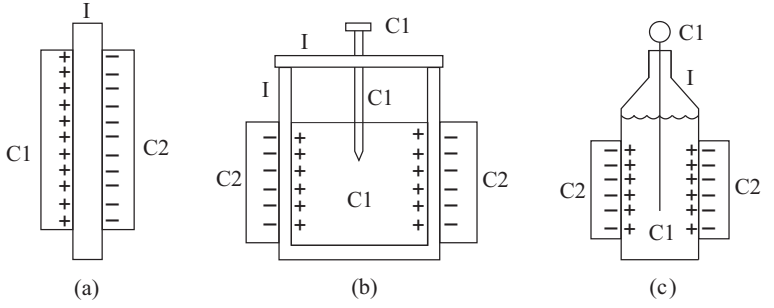


Figura 12.11: Condensadores cargados. (a) Placas paralelas. (b) Condensador cilíndrico. (c) Botella de Leiden.

La figura 12.11 (a) muestra un condensador de placas paralelas visto de perfil, la figura 12.11 (b) muestra un condensador cilíndrico, mientras que la figura 12.11 (c) representa una botella de Leiden. Exageramos el grosor de las tiras externas de papel de aluminio para resaltar el hecho de que sus cargas se encuentran esencialmente a lo largo de sus caras internas. Estas tres distribuciones de carga son solo cualitativas.

Cuando conectamos a tierra uno solo de los conductores de una botella de Leiden cargada, manteniendo la botella aislada de la tierra, esta no se descarga. Las cargas opuestas permanecen en su lugar debido a la atracción entre las partículas de signo diferente.

Por el contrario, el condensador se descarga cuando los dos conductores C_1 y C_2 se conectan a un tercer alambre conductor.

12.4 Gray, Du Fay y la electrización del agua

Stephen Gray (1666–1736) descubrió los conductores y los aislantes en 1729, y publicó sus conclusiones en 1731 en uno de los artículos más importantes de la historia de la electricidad.[5] El volumen 1 de esta obra presenta una descripción detallada de los trabajos de Gray. En sus experimentos describió las siguientes sustancias aislantes: un hilo de seda, líneas de pesca de crin de caballo, un bloque de colofania, vidrio calentado, bloques de cera de abeja, azufre y laca. Su generador eléctrico era simplemente un tubo de vidrio flint, es decir, un vidrio pesado y brillante que contenía óxido de plomo. Frotó el tubo con las manos desnudas. Durante los experimentos, sostuvo el tubo de vidrio frotado en la mano. Como el tubo no se descargó al entrar en contacto con sus manos, esto significa que actuaba como un muy buen aislante, a diferencia de la mayoría de los vidrios modernos que se encuentran en los hogares. Además, su tubo de vidrio adquirió una gran densidad de carga superficial. Transmitió la virtud atractiva de este tubo electrizado a varios conductores. Para obtener este efecto, el conductor estaba aislado eléctricamente del suelo, sostenido por materiales aislantes o suspendido por cordones de seda. Cuando su tubo electrizado se acercaba a un extremo de este conductor aislado, observaba que el otro extremo del conductor adquiría la propiedad de atraer los cuerpos ligeros situados en las proximidades. De este modo, logró transmitir esta virtud atractiva a los metales, la madera, el cuerpo humano y muchas otras sustancias conductoras. También transmitió esta virtud atractiva al agua, nuestras palabras entre corchetes:[6,7]

> El 23 de *marzo* [de 1730], disolví jabón en agua del *Támesis* y luego colgué una pipa de tabaco de un cordón hecho de cabello, de manera que quedara casi en posición horizontal, con la boquilla de la pipa hacia abajo; luego, tras sumergirla en la solución jabonosa y soplar una burbuja, con la hoja de latón colocada sobre un soporte debajo y frotando el tubo [de vidrio], el latón fue atraído por la burbuja cuando el tubo se acercó al cordón. A continuación, repetí el experimento con otra burbuja, sosteniendo el tubo cerca del extremo de la manguera, y la atracción fue mucho más fuerte, ya que la hoja de latón fue atraída a una altura de casi dos pulgadas [5 cm].

La figura 12.12 (a) ilustra este experimento. Muestra que el agua jabonosa se comporta como un conductor. La figura 12.12 (b) presenta la distribución cualitativa de las cargas en el experimento de Gray.

[5] [Gra32d], [Bos11, capítulo 6] y [BAC12, capítulo 7, pp. 127–169].

[6] [Gra32d, pp. 38–39], [Bos11, pp. 165–166] y [BAC12, pp. 162–163].

[7] *March* the 23d [1730], I dissolved Soap in the *Thames*-Water, then I suspended a Tobacco-Pipe by a Hair-Line, so as that it hung nearly horizontal, with the Mouth of the Bowl downwards; then having dipped it in the Soap-Liquor, and blown a Bubble, the Leaf-Brass laid on a Stand under it, the [glass] Tube being rubbed, the Brass was attracted by the Bubble, when the Tube was held near the Hair-Line. Then I repeated the Experiment with another Bubble, holding the Tube near the little End of the Pipe, and the Attraction was now much greater, the Leaf-Brass being attracted to the Hight of near two Inches.

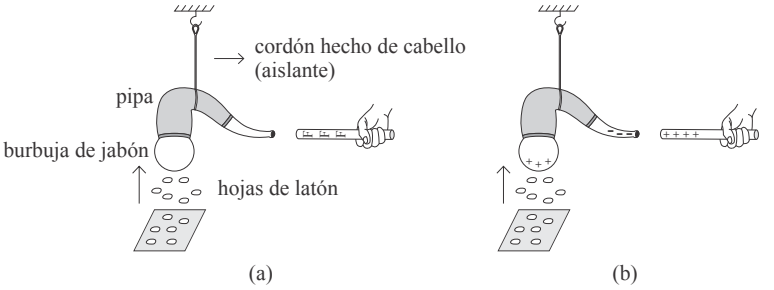


Figura 12.12: (a) Una burbuja aislada que atrae pequeños trozos de latón cuando se acerca un tubo de vidrio frotado al extremo más estrecho de la tubería. (b) Distribución cualitativa de las cargas sobre el tubo, la tubería y la burbuja.

Gray había logrado transmitir la virtud de la atracción a varios tipos de conductores, haciéndolos capaces de atraer cuerpos ligeros colocados cerca de ellos. Los aislantes, por el contrario, no podían atraer cuerpos ligeros con la misma fuerza cuando se acercaba a ellos el tubo de vidrio frotado. Supongamos dos cuerpos de la misma forma y tamaño, uno conductor y otro aislante, ambos aislados del suelo y separados entre sí. Acerque un tubo de vidrio frotado al conductor, polarizándolo. Acerque el tubo de vidrio frotado a la misma distancia del aislante, polarizándolo. La polarización observada adquirida por el conductor es mucho mayor que la polarización efectiva adquirida por el aislante.[8]

Aquí presentamos la interpretación moderna del experimento de Gray. El tubo y la burbuja se comportaban como conductores, mientras que el cordón hecho de cabello se comportaba como un aislante. Supongamos que el tubo de vidrio está electrizado positivamente. Cuando se acerca al extremo del tubo, se produce una polarización de las cargas en el sistema tubo–burbuja. La burbuja alejada se electriza positivamente, mientras que el extremo del tubo se electriza negativamente. La burbuja electrizada atrae entonces los pequeños trozos de latón conductor colocados debajo.

En 1731, Gray electrizó el agua mediante otro procedimiento. Fijó una placa de madera sobre un soporte aislante de vidrio. La placa estaba llena de agua dulce. A continuación, acercó un tubo de vidrio frotado muy cerca de la superficie del agua, sin tocarla. Luego retiró el tubo. Tras realizar algunas pruebas, comprobó que el agua se había electrizado mediante este proceso. A continuación citamos su obra, con nuestros comentarios en las notas al pie de página:[9,10]

[8] Véase las secciones 7.3, 7.6, 7.7, 7.9 y 8.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[9] [Gra32a, pp. 227–228], [Bos11, pp. 211–214] y [BAC12, capítulo 8, pp. 172–174], [DF33a, pp. 34–35] y [Hei99, p. 253].

[10] I. In the former Account of my Experiments, I described the manner of communicating an Attraction to a Bubble of soaped Water; but I have now found, that even *a Body of Water receives an Attractive Vertue, and also a Repelling one, by applying the excited Tube near it, after the same manner as solid Bodies do.* To perform this Experiment, I caused a wooden Dish to be turned, with a Screw-hole at the bottom, but no so far as to come through the Wood: This was screwed on the upper End of one of the Stands I have mentioned in the other Experiments, the other Top being taken off. The Dish was about four Inches Diameter, and one Inch deep. Then the Stand was set on a Cake of Rosin, or a Plate of Glass, or the Brims of a Drinking-Glass, or of a Cylindrick one, such as are used for Water Glasses. The Glass must be first warmed, then the Dish being

I. En el anterior relato de mis experimentos, describí cómo conferir una atracción a una burbuja de agua jabonosa; pero ahora he descubierto que incluso *una masa de agua adquiere una virtud de atracción, así como una de repulsión, al aplicar el tubo excitado en su proximidad, de la misma manera que los cuerpos sólidos.*[11] Para realizar este experimento, hice girar un cuenco de madera con un agujero de tornillo en el fondo, pero no lo suficientemente profundo como para atravesar la madera: este se atornilló al extremo superior de uno de los soportes que mencioné en los otros experimentos, habiéndose retirado el otro extremo. El cuenco medía aproximadamente cuatro pulgadas [10 cm] de diámetro y una pulgada [2.5 cm] de profundidad. A continuación, el soporte se colocó sobre un bloque de colofonia, un plato de vidrio o el borde de un vaso o un vaso cilíndrico, como los que se utilizan para los vasos de agua. Primero hay que calentar el vaso,[12] y luego hay que llenar el cuenco con agua, frotar el tubo y moverlo tres o cuatro veces por debajo del cuenco y por encima del agua, sin tocarlos.[13] Después de ser excitado, no solo el cuenco, sino también el agua se electrizan;[14] y si un pequeño trozo de hilo,[15] o un trozo fino de papel fino, o un trozo de latón transparente, comúnmente llamado oropel, se mantiene sobre el agua en posición horizontal, a aproximadamente una pulgada [2.5 cm] o a veces más, cualquiera de dichos cuerpos[16] será atraído hacia la superficie del agua y luego repelido, pero no con tanta frecuencia como los sólidos.[17] Si un hilo suspendido se mantiene a cierta distancia del exterior del cuenco, será atraído y repelido por este repetidamente con un movimiento muy rápido,[18] pero no a una distancia tan grande como cuando el cuenco está vacío.

---

filled with Water, the Tube rubbed, and moved both under the Dish and over the Water three or four times, without touching them. After it has been excited, not only the Dish, but the Water also, becomes Electrical; and if a small Piece of Thread, or a narrow Slip of thin Paper, or a Piece of Sheer-Brass, commonly called Tinsel, be held over the Water in an horizontal Position, within about an Inch or some times more, any of the said Bodies will be attracted to the Surface of the Water, and be repelled, but not so often as by Solids. If a pendulous Thread be held at some Distance from the outside of the Dish, it will be attracted and repelled by it many times together with a very quick Motion, but not at so great a Distance as when the Dish is empty.

[11] Gray había descubierto que un conductor sólido podía adquirir virtudes de atracción y repulsión cuando se le acercaba un tubo de vidrio frotado. Entonces descubrió que esas mismas virtudes podían transmitirse a un cuerpo de agua.

[12] Gracias a este procedimiento, el cuenco de madera quedaba fijado sobre un soporte aislante, es decir, un bloque de colofania o un vaso calentado.

[13] La figura 12.13 ilustra este procedimiento.

[14] La figura 12.14 ilustra cómo Gray pudo concluir que el cuenco de agua se había electrizado como resultado de este procedimiento.

[15] Probablemente un hilo de algodón o lino. Estos materiales se comportan como conductores en los experimentos electrostáticos.

[16] Los cuerpos mencionados por Gray eran un hilo [de algodón], un trozo fino de papel y un trozo de latón puro. Todos estos materiales se comportan como conductores.

[17] Dado que Gray habla de atracción y repulsión, es posible que haya observado algo análogo al mecanismo *ACR*. Si fuera así, entonces uno de los extremos del hilo, el papel o el oropel probablemente estaba fijado a un mango aislante, mientras que sus extremos libres se encontraban sobre el agua en posición horizontal.

[18] Gray no especificó el material de su «hilo pendular». Creemos que era similar al péndulo eléctrico que describió en 1720 [Gra21, p. 107]. En otras palabras, se trataba de un palito de madera con un hilo de seda fijado en su extremo. En el extremo libre de este hilo se ataba un plumón. El palito se sujetaba con las manos desnudas. Aunque el palito de madera se comporta como un conductor en este experimento, este aspecto no es crucial. Las principales propiedades de este péndulo son las siguientes: el hilo de seda se comporta como un aislante, mientras que el plumón se comporta como un conductor.

Obtenga una secuencia de atracciones y repulsiones con este péndulo eléctrico. Para ello, el plumón debe colocarse entre una pajita frotada y un conductor conectado a tierra, tal y como se describe en el

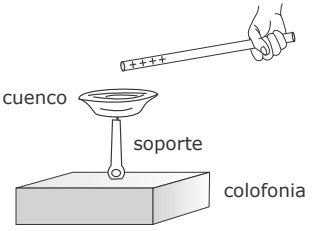


Figura 12.13: Cuenco de agua fijado a un soporte colocado sobre un bloque aislante de colofania. El tubo electrizado se mueve por debajo y por encima del cuenco, sin tocar el agua ni el cuenco.

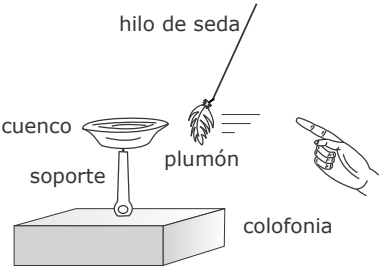


Figura 12.14: Una vez que el cuenco está electrizado, se coloca un plumón conductor unido a un alambre aislante entre el cuenco y un dedo. El plumón es atraído por el cuenco, lo toca y luego es repelido. Se electriza durante el contacto con el cuenco y se descarga cuando toca el dedo. Este mecanismo *ACR* puede repetirse varias veces.

El soporte utilizado en este experimento probablemente era de madera. Solo el bloque de colofania y el aire ambiente eran aislantes. Todos los demás cuerpos eran conductores, es decir, el agua, el cuenco y el soporte. Por lo tanto, es posible que el tubo de vidrio haya electrizado no solo el agua, sino también todos los conductores en contacto con el agua. Probablemente, la electrización se obtuvo mediante chispas o pequeñas descargas eléctricas entre el tubo de vidrio electrizado y el agua. Suponiendo que se produjera este proceso de electrización, el cuenco y el agua se electrizaron con una carga del mismo signo que la del tubo de vidrio. En el experimento anterior, se produjo una polarización del sistema tubo–burbuja. En el presente experimento,

experimento 4.15 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17]. En el experimento específico de Gray, el plumón de su péndulo eléctrico se mantenía, mediante el hilo de seda al que estaba sujeta, a la misma altura que el recipiente de agua electrizado. El plumón debe colocarse entre este recipiente electrizado y un cuerpo conectado a tierra. Supongamos que este cuerpo conectado a tierra era una de las manos de Gray. Cuando el péndulo se colocó cerca del recipiente electrizado, el plumón fue atraída por el recipiente, lo tocó y adquirió una carga neta del mismo signo que la del recipiente. Tras el contacto, el plumón fue repelida por el recipiente. Entonces tocó el dedo de Gray en el lado opuesto. El plumón se descargó mediante este proceso de puesta a tierra. Entonces pudo ser atraída de nuevo por el cuenco electrizado, tocarlo y descargarse mediante el dedo. Este proceso podía repetirse varias veces, produciendo un movimiento vibratorio de atracción y repulsión. En principio, podía producirse varias veces, hasta que el cuenco de agua se descargara por completo. La figura 12.14 ilustra este mecanismo *ACR*.

por el contrario, el sistema de conductores recibió una carga neta distinta de cero. La figura 12.15 ilustra cómo Gray pudo concluir que el agua estaba electrizada.

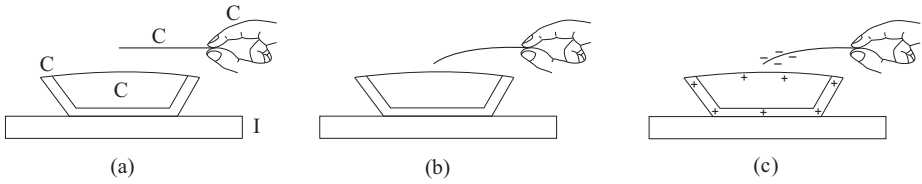


Figura 12.15: (a) Los conductores se representan con la letra C, mientras que el aislante se representa con la letra I. Agua neutra, sin atracción. (b) Agua electrizada que atrae una tira conductora colocada cerca. (c) Distribución de las cargas en este experimento.

El cuenco de agua está sostenido por un material aislante I. La figura 12.15 (a) muestra la situación cuando el sistema no está electrizado. En este caso, se puede acercar una tira de papel horizontal al cuenco sin que sea atraída. A continuación, se mueve el tubo de vidrio electrizado por encima y por debajo del cuenco de agua, muy cerca del sistema, pero sin tocarlo. Retire el tubo de vidrio. La figura 12.15 (b) muestra lo que ocurre cuando se acerca una tira de papel horizontal al sistema. Es atraída por el agua electrizada. La figura 12.15 (c) muestra la distribución cualitativa de las cargas en este experimento.

En 1733, Du Fay continuó las investigaciones de Gray. Llegó a la conclusión de que la mayoría de los cuerpos inicialmente neutros podían electrizarse mediante este proceso. Bastaba con ponerlos en contacto, o muy cerca, de otro cuerpo electrizado.[19] Para electrizar el cuerpo inicialmente neutro, este debe estar aislado del suelo. Un ejemplo de este proceso de electrización se produce en el mecanismo *ACR* descrito en la sección 4.4, figura 4.11.[20] En este proceso, la carga adquirida por el cuerpo inicialmente neutro tiene el mismo signo que la carga del aislante electrizado que entra en contacto con él. La llamada «regla de Du Fay» establecía que el cuerpo que se iba a electrizar mediante este proceso debía estar correctamente aislado, es decir, debía descansar sobre un soporte aislante de espesor suficiente. Describía este proceso de electrización de la siguiente manera, con nuestros comentarios entre corchetes y en la nota al pie de página:[21,22]

> En la primera parte de este memorándum,[23] vimos que los licores pueden volverse eléctricos; la única manera de lograrlo acercando el tubo [electrizado] es colocarlos en un pequeño recipiente de vidrio, porcelana o loza, & colocar este recipiente sobre una mesita de vidrio o cera española, ya que sería inútil intentarlo sobre una de madera o metal; [...]

[19] [DF33a], [DF33c] y [Hei99, pp. 252–253].
[20] Sección 4.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[21] [DF33c, p. 84] y [Hei99, pp. 252–253].
[22] Nous avons vû dans la premiére partie de ce Mémoire, que les liqueurs pouvoient devenir électriques; la seule maniére d'y réüssir par l'approche du tuyau [électrifié], est de les mettre dans un petit vase de verre, de porcelaine ou de fayence, & de poser ce vase sur un guéridon de verre ou de cire d'Espagne, car on le tenteroit en vain sur un de bois ou de métal; [...]
[23] Véase [DF33a, pp. 33–34].

El soporte de cera o vidrio actuaba aquí como aislante.

Una vez tomada esta precaución, la mayoría de los cuerpos podían electrizarse, ya fuera por contacto o por acercamiento a un aislante electrizado. Siguiendo este procedimiento, Du Fay logró electrizar el agua, como había hecho Gray antes que él. En primer lugar, se colocaba un recipiente lleno de agua sobre un material aislante. A continuación, se podía electrizar cuando se movía un tubo cargado por encima y por debajo del recipiente.

Du Fay también logró electrizar el agua por contacto. Para ello, se colocaba un recipiente lleno de agua sobre un material aislante. Se fijaba un hilo conductor a un tubo de vidrio. Electrizaba el tubo frotándolo contra un material adecuado. Gracias a esta electrización del tubo, el hilo que estaba conectado a él se polarizaba. A continuación, el extremo libre del hilo se ponía en contacto con el agua aislada. Tras retirar el hilo, varias pruebas le demostraron que el agua se había electrizado. Esta es su descripción de este experimento, con nuestros comentarios entre corchetes y en notas al pie:[24,25]

> En otra parte de las *Philosophical Transactions* del año pasado, № 422,[26] el Sr. Gray muestra que el agua puede volverse eléctrica. He aquí cómo se realiza este experimento. Se llena de agua un pequeño cuenco de madera o un platillo de porcelana, se coloca sobre una de esas mesitas auxiliares o sobre un vaso bien seco y ligeramente calentado; y, tras frotar este tubo, se acerca al platillo, pasándolo por encima y por los lados dos o tres veces, sin tocarlo, lo cual basta para comunicar una virtud eléctrica [es decir, la propiedad de atraer cuerpos ligeros] muy sensible al cuenco o al platillo, y al agua que contiene, lo cual [esta electrización] se reconoce al acercar un [solo] cabello o un hilo suelto en posición horizontal a la superficie del agua, ya que se ve cómo el hilo se acerca hasta sumergirse en ella. Este experimento me salió bien tal y como lo acabo de describir, & con la misma facilidad, de la siguiente manera. Había ajustado al extremo de mi tubo [de vidrio] un tapón de corcho al que estaba atado un cordón. Una vez que el tubo se electrizó por fricción, sumergí el extremo del cordón en el platillo lleno de agua, y colocada sobre un vaso calentado, lo que comunicó la virtud [eléctrica] a la superficie del agua, al igual que en la operación anterior, y es probable que [la electrización] fuera la misma en todos los líquidos, pero hay que observar que esta virtud [eléctrica] es menos considerable en el agua que en los cuerpos sólidos.

[24] [DF33a, pp. 34–35] y [Hei99, p. 253].

[25] Dans un autre endroit des *Transactions Philosophiques* de l'année derniére, № 422, M. Gray fait voir que l'Eau peut devenir électrique. Voici de quelle maniére se fait cette expérience. On remplit d'eau une petite écuelle de bois ou une soucoupe de porcelaine, on la pose sur un de ces petits guéridons, ou sur un verre à boire bien sec, & un peu chauffé; pour lors ayant frotté ce tube, on l'approche de la soucoupe, le passant par dessus & par les côtés deux ou trois fois, sans néantmoins y toucher, cela suffit pour communiquer une vertu électrique [c'est-à-dire la propriété d'attirer les corps légers] trés-sensible à l'écuelle, ou la soucoupe, & à l'eau qui y est contenuë, ce [cette électrification] que l'on reconnoît en approchant un [seul] cheveu, ou un fil délié dans une situation horisontale de la surface de l'eau, on voit alors ce fil s'en approcher jusqu'à ce qu'il s'y soit plongé. Cette expérience m'a réussi de la maniére que je viens de la décrire, & avec autant de facilité, de la maniére suivante. J'avois ajusté au bout de mon tuyau [en verre] un bouchon de liége auquel étoit attaché un bout de corde, le tuyau étant rendu électrique par le frottement, j'ai plongé l'extrémité de la corde dans la soucoupe remplie d'eau, & posée sur un verre chauffé, ce qui a communiqué la vertu [électrique] à la surface de l'eau, de même que par l'opération précédente, & il est vraisemblable qu'il [l'électrification] en seroit de même de toutes les liqueurs, mais il est à observer que cette vertu [électrique] est moins considérable dans l'eau que dans les corps solides.

[26] Véase [Gra32a].

La figura 12.16 ilustra el procedimiento desarrollado por Du Fay para electrizar el agua. Su tubo de vidrio electrizado servía de aislante I. El cuenco de agua estaba sostenido por otro aislante I. El agua, el cuenco y el cordón conectado al tubo se comportaban como conductores C en este experimento.

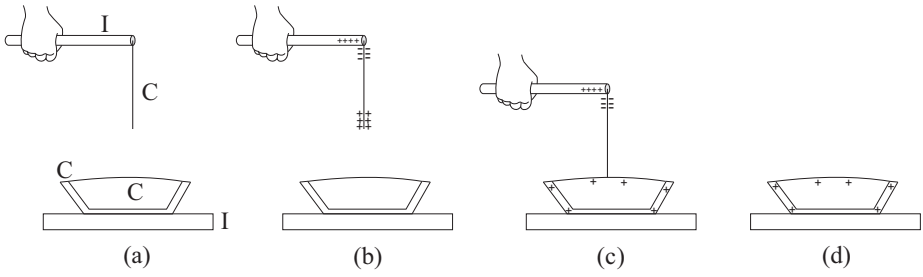


Figura 12.16: (a) Tubo de vidrio aislante I con un cordón conductor C atado a su extremo. Cuenco lleno de agua conductora C y colocado sobre un material aislante I. (b) La fricción del tubo de vidrio polariza el cordón. (c) El extremo libre del cordón se sumerge en el agua. Las cargas que se encontraban en el extremo del cordón se propagan por el sistema, electrizando el agua. (d) Retire el tubo con el cordón. El agua permanece electrizada.

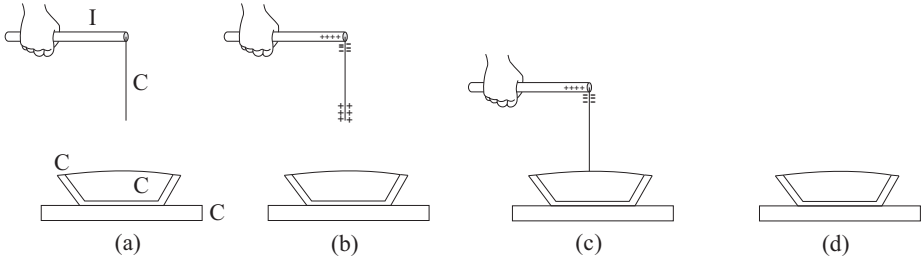


Figura 12.17: (a) Tubo de vidrio con un cordón en su extremo. Cuenco lleno de agua colocado sobre un soporte conductor. Los conductores se representan con C y los aislantes con I. (b) Tubo de vidrio frotado con un cordón polarizado. (c) Cordón que toca el agua conectada a tierra. La Tierra neutraliza las cargas en el extremo libre del cordón. (d) Retire el tubo con su cordón. El agua no se electriza con este procedimiento.

Supongamos ahora que el agua se encuentra en un recipiente conductor colocado sobre otro conductor (como una placa de madera o metal conectada a tierra). En este caso, no sería posible electrizar el agua según el método de Gray (es decir, moviendo un tubo de vidrio electrizado por debajo y por encima del recipiente), ni según el método de Du Fay (es decir, tocando el agua con el extremo libre de un hilo conductor conectado al tubo de vidrio electrizado), como se ilustra en la figura 12.17.

El tubo de vidrio frotado polariza el hilo conductor que está conectado a él, figura 12.17 (b). Cuando el extremo libre del hilo polarizado toca el agua conectada a tierra, las cargas inferiores del hilo son neutralizadas por las cargas libres presentes

en la Tierra, figura 12.17 (c). Una vez retirado el tubo con el hilo, el agua ya no está electrizada, figura 12.17 (d).

12.5 Los primeros condensadores

Esta sección describe la invención del condensador. Fue descubierto por casualidad alrededor de 1745 en Alemania y los Países Bajos, y se conoce generalmente como «botella de Leiden» (o «frasco de Leiden»).[27] En aquella época, nadie sabía cómo funcionaba, ni siquiera los científicos que se interesaban específicamente por la electricidad. Infringía la regla de Du Fay descrita en la sección 12.4. Las personas que descubrieron este instrumento trabajaban con un generador electrostático. Por lo general, se trataba de un globo o un cilindro de vidrio que giraba alrededor de un eje fijo con ayuda de una manivela. El vidrio en rotación se frotaba contra la mano de una persona o contra otra sustancia (cojín, trozo de tela de algodón o cuero). Guericke había publicado en 1672 algunos experimentos, en particular el de un plumón que flotaba encima de un globo de azufre frotado. Francis Hauksbee construyó deliberadamente alrededor de 1708 los primeros generadores eléctricos.[28] Georg Matthias Bose (1710–1761) introdujo alrededor de 1740 una mejora de estos generadores, denominada «conductor principal». Se trataba esencialmente de un conductor aislado del suelo. Podía ser una espada, una barra de hierro o un cañón. Un extremo del conductor principal estaba en contacto o muy cerca del vidrio giratorio. Este extremo también podía estar en contacto o muy cerca del cojín, de la tela de algodón o del cuero que se frotaba contra el vidrio giratorio. El conductor principal acumulaba las cargas generadas por el vidrio frotado. De esta manera, era más fácil realizar varios experimentos de conducción o descargas a través del extremo libre del conductor principal.[29] Podía aislarse del suelo colocándolo sobre soportes aislantes o suspendiéndolo con cordones aislantes.

El primer condensador fue construido en Alemania por Ewald Jürgen von Kleist (1700–1748) en 1745. Contaba con una máquina electrostática a la que estaba conectado un conductor principal. Un recipiente lleno de agua situado cerca estaba aislado del suelo. A continuación, el agua se ponía en contacto con el conductor principal a través de un alambre metálico sumergido en el líquido. Al poner en funcionamiento la máquina, pudo producir chispas a partir de su sistema. A continuación, sustituyó el recipiente lleno de agua por una bobina de madera aislada. Colocando un clavo sobre la bobina y poniendo en marcha la máquina, pudo producir chispas alternativamente desde el clavo y la bobina. Aunque este sistema estaba conectado al conductor principal, estaba aislado del suelo.

A continuación, describió el condensador. Se introdujo un clavo en una pequeña botella de vidrio aislada del suelo. Estaba conectado a la máquina mediante un conductor. Se puso en marcha la máquina y se electrizó el sistema. A continuación, sostuvo la botella de vidrio en la mano. En otras palabras, conectó el sistema a tierra. Al retirarla de la máquina, se produjeron efectos eléctricos con mayor potencia y

[27] [Whi73a, p. 45], [Hei99, Chapter XIII: The invention of the condenser] y [JG17].
[28] Sección 4.11 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[29] [Hei66] y [Hei99, pp. 264–265].

duración que los efectos producidos con la botella de vidrio aislada. Este procedimiento fortuito dio lugar al primer condensador:[30,31]

> Si se introduce un clavo, un alambre metálico resistente, etc., en una botella pequeña de cuello estrecho y se aplica una descarga eléctrica, se obtienen efectos especialmente potentes. El vidrio debe estar muy seco y caliente. Todo funciona mejor si se coloca un poco de mercurio o alcohol en el interior. La llama aparece en la botella pequeña tan pronto como se retira de la máquina, y pude dar más de sesenta pasos por la habitación a la luz de este pequeño instrumento en llamas.

La figura 12.18 (a) ilustra este experimento.

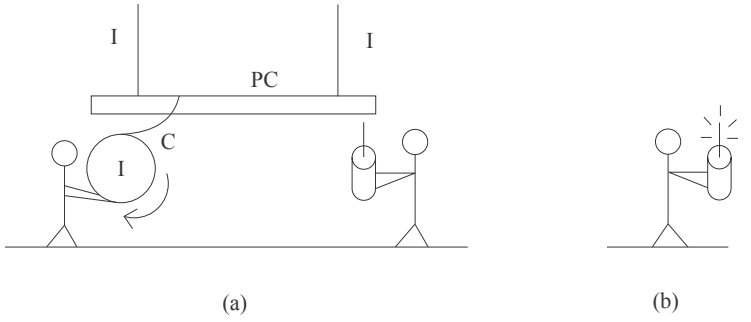


Figura 12.18: (a) Electrización de la botella de vidrio con un clavo. (b) El sistema brilla mientras la persona camina por la habitación con la botella en las manos.

El generador electrostático está representado por un globo de vidrio aislante que gira alrededor de su eje. Se puede electrizar por fricción cuando se toca con las manos. El conductor principal PC está conectado al globo por un alambre conductor C, suspendido por alambres aislantes I. El conductor principal se electriza por el alambre conductor que toca la esfera frotada. También se electriza cuando un extremo del alambre conductor permanece muy cerca de la esfera frotada. Una persona sostiene una pequeña botella de vidrio con un clavo. Cuando la punta del clavo toca el conductor principal o permanece muy cerca de él, la botella se electriza. Cuando la persona retira la botella y se mueve por la habitación, el clavo brilla por efecto corona (descargas eléctricas en el aire), figura 12.18 (b). La botella de vidrio también puede electrizarse si el clavo toca directamente el globo en rotación (o cuando su punta se acerca mucho a él) mientras la persona sostiene la botella en sus manos.

Su descripción continúa así:[32,33]

[30] [Hei99, p. 310].

[31] If a nail, a strong wire, etc., is introduced into a narrow-necked little medicine bottle and electrified, especially powerful effects follow. The glass must be very dry and warm. Everything works better if a little mercury or alcohol is placed inside. The flare appears on the little bottle as soon as it is removed from the machine, and I have been able to take over sixty paces around the room by the light of this little burning instrument.

[32] [Hei99, pp. 310–311].

[33] If I electrify the nail strongly, so that the light within the glass and the sparks are visible, I can take it into another room and ignite spirit of wine or of terpentine.

> Si electrizo fuertemente el clavo, de modo que la luz dentro del vidrio y las chispas sean visibles, puedo llevarlo a otra habitación y prender fuego al alcohol o la trementina.

Él mismo sentía curiosidad por conocer el mecanismo de funcionamiento de su instrumento:[34,35]

> Lo que realmente me sorprende de todo esto es que este potente efecto solo se produce en la mano. No se produce ninguna chispa si el instrumento está sobre la mesa. Por mucho que electrifique la botella, si lo dejo sobre la mesa y acerco el dedo, no se produce ninguna chispa, solo un silbido ardiente. Si lo vuelvo a coger, sin volver a electrizarlo, recupera su potencia inicial.

Según la regla de Du Fay mencionada en la sección 12.4, el sistema debería haberse descargado cuando fue conectado a tierra por las manos de la persona que lo sostenía mientras se movía por la habitación. Sin embargo, esta descarga no se produjo. Lo que ocurrió fue todo lo contrario, es decir, los efectos eléctricos eran más fuertes con la botella de vidrio conectada a tierra que con la botella aislada.

Un descubrimiento similar se hizo de forma independiente en los Países Bajos, también en 1745. El profesor de física experimental de la ciudad de Leiden, Musschenbroek (1692–1761), quería producir chispas a partir de agua electrizada. Disponía de un recipiente lleno de agua colocado sobre un soporte aislante. Un alambre conductor conectaba el agua al conductor principal de un generador eléctrico. Al poner en marcha la máquina, electrizaba el conductor principal y el agua conectada a él. Al acercar un dedo al conductor principal se producían chispas. El abogado Cunnaeus conocía estos experimentos porque solía visitar el laboratorio de Musschenbroek. Cuando intentó reproducir este experimento en su casa, sin darse cuenta sujetó el recipiente de agua con las manos, en lugar de colocarlo sobre un soporte aislante. Cuando intentó producir chispas acercando el dedo al conductor principal o al alambre conductor conectado al agua, recibió una descarga eléctrica muy violenta. Informó de su descubrimiento a Musschenbroek y a su asistente Allamand. Al repetir este procedimiento, ellos también recibieron una descarga eléctrica muy violenta. El relato más famoso de este experimento fue presentado por Musschenbroek en una carta dirigida a Réamur (1683–1757) escrita en enero de 1746 y traducida al francés en las *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*:[36,37]

[34] [Hei99, p. 311].

[35] What really surprises me in all this, is that the powerful effect occurs only in the hand. No spirit can be ignited if it [the instrument] rests on the table. No matter how strongly I electrify the phial, if I set it on the table and approach my finger to it, there is no spark, only a fiery hissing. If I grasp it again, without electrifying it anew, it displays its former strength.

[36] [Nol46, pp. 2–3], [Hei99, pp. 313–314].

[37] Je veux vous communiquer une expérience nouvelle, mais terrible, que je vous conseille de ne point tenter vous-même.... Je faisois quelques recherches sur la force de l'électricité (c'est toûjours M. Musschenbroek qui parle) pour cet effet j'avois suspendu à deux fils de soie bleue un canon de fer, *AB, Fig. I*, qui recevoit par communication l'électricité d'un globe de verre, que l'on faisoit tourner rapidement sur son axe, pendant qu'on le frottoit en y appliquant les mains; à l'autre extrémité B pendoit librement un fil de laiton, dont le bout éloit plongé dans un vase de verre D rond, en partie plein d'eau, que je tenois dans ma main droite F, & avec l'autre main E, j'essayois de tirer des étincelles du canon de fer électrifié: tout d'un coup ma main droite F fut frappée avec tant de violence, que j'eus tout le corps ébranlé comme d'un

> Quiero compartir con ustedes una experiencia nueva, pero terrible, que les aconsejo no intentar por sí mismos… Estaba investigando sobre la fuerza de la electricidad (sigue hablando el Sr. Musschenbroek) y, para ello, colgué de dos hilos de seda azul un cañón de hierro, *AB*, *Fig. I*, que recibía electricidad de un globo de vidrio que se hacía girar rápidamente sobre su eje mientras se frotaba con las manos; en el otro extremo B colgaba libremente un alambre de latón, cuyo extremo estaba sumergido en un recipiente de vidrio redondo D, parcialmente lleno de agua, que sostenía en mi mano derecha F, & con la otra mano E, intentaba sacar chispas del cañón de hierro electrizado: de repente, mi mano derecha F recibió un golpe tan violento que todo mi cuerpo se estremeció como por un rayo; el recipiente, aunque hecho de vidrio fino, no se rompe normalmente, & la mano no se desplaza por esta conmoción; pero el brazo & todo el cuerpo se ven afectados de una manera terrible que no puedo expresar: en una palabra, creí que estaba perdido. Pero aquí hay cosas muy singulares (añade el autor de la carta): cuando se hace este experimento con un vaso de Inglaterra, el efecto es nulo, o casi nulo; el vaso debe ser de Alemania, no bastaría con que fuera de Holanda; da igual que sea redondeado en forma de esfera o de cualquier otra figura: se puede utilizar un vaso común, grande o pequeño, grueso o fino, profundo o no; pero lo que es absolutamente necesario es que sea de vidrio de Alemania o de Bohemia; el que pensó darme muerte era de vidrio blanco y fino, y de cinco pulgadas [12 cm] de diámetro. La persona que realiza el experimento puede colocarse simplemente en el suelo, pero debe ser la misma la que sostenga el vaso con una mano y, con la otra, provoque la chispa; el efecto es muy poco considerable si lo hacen dos personas separadas; si se coloca el vaso D sobre un soporte metálico colocado sobre una mesa de madera, tocando este metal solo con la punta del dedo y provocando la chispa con la otra mano, se sigue sintiendo un golpe muy fuerte, &c.

La primera ilustración de este experimento fue presentada por Nollet en 1750, figura 12.19.[38]

Musschenbroek era un gran científico especializado en electricidad. A pesar de ello, quedó totalmente sorprendido por el resultado de este experimento. No logró explicar el mecanismo de funcionamiento de este instrumento, aunque había especificado claramente todos los aspectos principales que permitían que funcionara con tal potencia.

Aunque declaró que no repetiría el experimento, su propia descripción indica que se probaron algunas variaciones modificando el tipo, el grosor y el formato del vidrio.

---

coup de foudre; le vaisseau, quoique fait d'un verre mince, ne se casse point ordinairement, & la main n'est point déplacée par cette commotion; mais le bras & tout le corps sont affectés d'une manière terrible que je ne puis exprimer: en un mot, je croyois que c'étoit fait de moi. Mais voici des choses bien singulières (ajoûte l'Auteur de la lettre) quand on fait cette expérience avec un verre d'Angleterre, l'effest est nul, ou presque nul; il faut que le verre soit d'Allemagne, il ne suffiroit pas même qu'il fût de Hollande; il est égal qu'il soit arrondi en forme de sphère ou de toute autre figure: on peut employer un gobelet ordinaire, grand ou petit, épais ou mince, profond ou non; mais ce qui est absolument nécessaire, c'est que ce soit du verre d'Allemagne ou de Bohème; celui qui m'a pensé donner la mort, étoit d'un verre blanc & mince, & de cinq pouces de diamètre. La personne qui fait l'expérience peut être placée simplement sur le plancher, mais il faut que ce soit la même qui tienne d'une main le vase D, & qui, de l'autre main, excite l'étincelle; l'effet est bien peu considérable, si cela se fait par deux personnes séparées; si l'on place le vase D sur un support de métal porté sur une table de bois, en touchant ce métal seulement du bout du doigt, & tirant l'étincelle avec l'autre main, on ressent encore un très-grand coup, &c.

[38] [Hei99, p. 285].

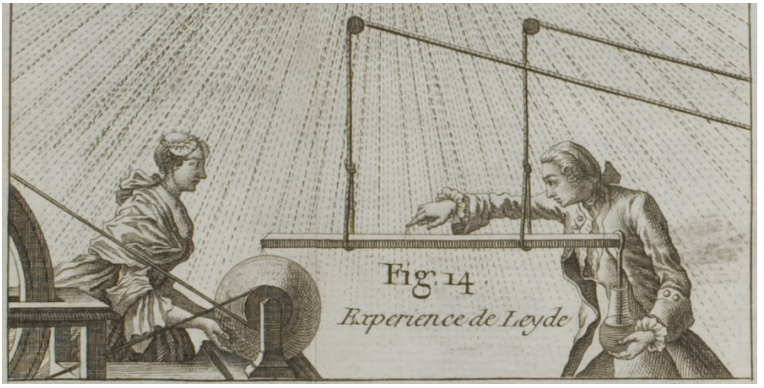


Figura 12.19: Primera representación del experimento de la botella de Leiden. La barra horizontal representa el tubo de hierro *AB* descrito por Musschenbroek, suspendido de hilos de seda aislantes, mientras que la botella que sostiene el experimentador en la mano representa su globo de vidrio *D*.

Es probable que el vidrio alemán que utilizó cuando recibió la descarga eléctrica se comportara como un buen aislante, permitiendo la acumulación de cargas opuestas a ambos lados (es decir, dentro y fuera de la botella). Los vidrios inglés y holandés, por el contrario, probablemente se comportaron como conductores para los experimentos electrostáticos. Si fuera así, no habrían permitido la acumulación de cargas opuestas dentro y fuera del vidrio.

El experimento de Cunaeus también se representa en la figura 12.20.[39]

Las figuras 12.19 y 12.20 muestran un globo de vidrio girando sobre su eje. Se electriza cuando se frota con las manos que lo tocan. Una barra metálica horizontal está suspendida por cordones aislantes. En la figura 12.19, la barra se electriza por las chispas en el aire, ya que su extremo está muy cerca del globo en rotación. En la figura 12.20, en cambio, se electriza por la cadena metálica que la toca, mientras que el otro extremo de la cadena toca el globo en rotación. En el extremo de esta barra hay un alambre metálico sumergido en el agua contenida en una botella de vidrio. Una persona sostiene la botella en la mano. Intenta producir una chispa con la otra mano acercándose a la barra o al alambre metálico. En ese momento, siente una descarga eléctrica muy fuerte.

Benjamin Franklin proporcionó el mecanismo de funcionamiento de la botella de Leiden.[40] El aspecto principal de su explicación es que la botella de vidrio se comportaba como un aislante. El agua del interior de la botella se comportaba como un conductor que estaba en contacto con su pared interior. La mano de la persona que sostenía la botella actuaba como otro conductor en contacto con la pared exterior de la botella. La persona que sostenía la botella actuaba como una toma de tierra de su pared exterior. El agua estaba en contacto con el conductor principal a través del alambre metálico. Al poner en funcionamiento el generador, este electrizaba el globo giratorio, el conductor

[39] [Des76, parte 3, p. 570, figura 382].
[40] [Hei99, pp. 330–334].

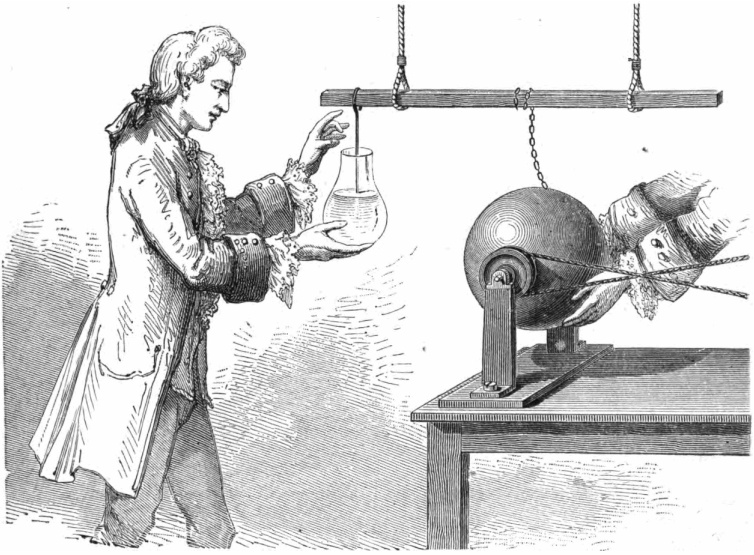


Figura 12.20: Otra representación del experimento de la botella de Leiden.

principal, el alambre metálico y el agua. Todos estos conductores adquieren una carga eléctrica del mismo signo que la carga distribuida en la superficie del globo frotado. La superficie externa de la botella se conecta a tierra a través de la mano de la persona que lo sostiene. Al poner en funcionamiento el generador, la mano de la persona que sostiene la botella se electriza con una carga de signo opuesto al del globo en rotación. Cuando se retira la botella del generador, mientras se sostiene en la mano, se obtiene un condensador electrizado, con cargas iguales y opuestas distribuidas por las superficies de los conductores en contacto con las paredes internas y externas de la botella de vidrio. Franklin escribió lo siguiente en una carta de 1747 a su amigo Collinson:[41,42]

> Al mismo tiempo que el alambre y la parte superior de la botella, etc., se electrizan *positivamente* o *más*, la parte inferior de la botella se electriza *negativamente* o *menos*, en una proporción exacta; es decir, independientemente de la cantidad de electricidad proyectada en la parte superior, una cantidad igual sale por la parte inferior.†
>
> † Lo que se dice aquí, y más adelante, sobre la *parte superior* y la *parte inferior* de la botella es válido para las superficies *interiores* y *exteriores*, y debería haberse expresado así.[43]

[41] [Fra69, p. 13], [Fra04, Vol. 2], [Hei99, p. 331] y [Mor04b, Version 1.3, section III, p. 4].

[42] At the same time that the wire and the top of the bottle, &c., is electrised *positively* or *plus*, the bottom of the bottle is electrised *negatively* or *minus*, in exact proportion; *i.e.*, whatever quantity of electrical fire is thrown in at the top, an equal quantity goes out of the bottom.†

† What is said here, and after, of the *top* and *bottom* of the bottle is true of the *inside* and *outside* surfaces, and should have been so expressed.

[43] Nota añadida por Franklin en una edición posterior de su libro.

Al descargar la botella, debe haber una vía que permita que la descarga eléctrica se propague entre el revestimiento conductor exterior y el revestimiento conductor interior. Esta vía no pasaba por el vidrio aislante. Franklin señaló que esta vía pasaba por un conductor que tocaba la parte superior e inferior de la botella (o sus revestimientos interior y exterior):[44],[45]

> 3. El equilibrio no puede restablecerse en la botella mediante una comunicación o un contacto *hacia el interior* de las partes, sino que debe hacerse mediante una comunicación formada *en el exterior* de la botella entre la parte superior y la inferior, mediante un elemento no eléctrico [es decir, un conductor], que toque o se acerque a ambas al mismo tiempo; en cuyo caso se restablece con una violencia y una rapidez inexpresables; o tocando cada una de ellas alternativamente, en cuyo caso el equilibrio se restablece progresivamente.

Supongamos que la persona sostiene la botella electrizada en la mano. Cuando toque con la otra mano un conductor en contacto con el agua, sentirá una descarga eléctrica muy fuerte. Esta descarga se deberá al paso repentino de una corriente eléctrica a través de su cuerpo conductor. Se producirá una neutralización de las cargas opuestas situadas dentro y fuera de la botella, que estaban separadas por el vidrio aislante y el aire ambiente.

Puede hacerse una idea de la descarga que sintieron Cunnaeus o Musschenbroek utilizando el electroforo y la botella de Leiden descritos en las secciones 6.1 y 12.1. Para ello, utilice un molde para pizza de 30 cm de diámetro con un mango aislante en el centro, figura 2.15 (d). La base aislante de este electroforo puede ser una placa cuadrada de PVC de 40 cm de lado. Se electriza cuando se frota enérgicamente con una toalla de papel o un paño de algodón. La botella de Leiden puede ser una botella de plástico de 200 o 300 ml, figura 12.2. Los mecanismos de carga y descarga de la botella de Leiden se describen en el experimento 12.4.

Los experimentos de Gray y Du Fay descritos en la sección 12.4, así como los realizados con la botella de Leiden descritos en esta sección, demuestran que el agua puede almacenar o acumular electricidad. Esta propiedad conductora del agua se utilizó en el generador electrostático de Kelvin.[46] Hoy en día se siguen realizando experimentos que utilizan este hecho.[47]

[44] [Fra69, pp. 13–14], [Fra04, Vol. 2] y [Mor04b, version 1.3, section III, p. 5].

[45] 3. The equilibrium cannot be restored in the bottle by *inward* communication or contact of the parts; but it must be done by a communication form'd *without* the bottle between the top and bottom, by some non-electric, [that is, by some conductor,] touching or approaching both at the same time; in which case it is restored with a violence and quickness inexpressible; or, touching each alternately, in which case the equilibrium is restored by degrees.

[46] Sección 7.12 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[47] [APZ06], [OP09], [San11], [Pol13, capítulo 5] y [GB17, capítulo 6].

Capítulo 13

La preservación temporal de la electrización de los cuerpos

Este capítulo presenta algunos procedimientos que permiten aumentar el tiempo durante el cual un cuerpo puede permanecer electrizado.

13.1 La descarga en el aire

Experimento 13.1 — *Descargar un aislante*

Los aislantes y los conductores electrizados suelen perder su carga en pocos minutos al aire libre.[1]

Tomemos como ejemplo una pajita de plástico que se electrizó tras frotarla con el cabello. Atrae los trozos de papel que se encuentran cerca, figura 1.3. Sin embargo, tras unos minutos u horas, la pajita frotada ya no atrae los trozos de papel, figura 13.1.

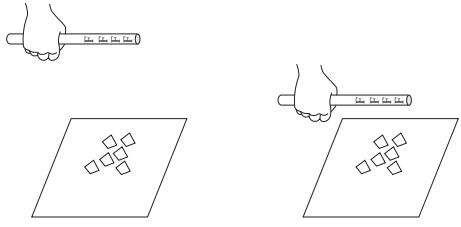


Figura 13.1: (a) Una pajita frotada lejos de pequeños trozos de papel. (b) Una pajita frotada pierde su electrización varias horas después del frotamiento inicial. Ya no atrae los pequeños trozos de papel cuando se acerca a ellos.

[1] Secciones 7.13 y 7.14 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

El tiempo que tarda una pajita frotada en perder su electricidad depende de varios factores: la conductividad del aire, la cantidad de electricidad que adquirió durante el frotamiento inicial, la calidad aislante del plástico, etc. En condiciones de mucha sequedad, una pajita bien cargada puede permanecer electrizada durante varias horas. En condiciones de humedad, se descarga en pocos minutos.

Experimento 13.2 — *Descargar un conductor*

Un conductor también pierde su electrización al aire libre. Frote una pajita de plástico con el cabello y, a continuación, raspe con ella el cartón fino para cargar el electroscopio, figura 13.2 (a). Déjelo sobre una mesa en un ambiente seco. Se descargará lentamente, como se puede ver en su tira. Después de unos minutos o una hora, se descarga por completo, figura 13.2 (b).

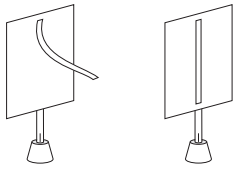


Figura 13.2: (a) Un electroscopio cargado. (b) El electroscopio se descarga completamente tras una hora al aire libre.

El tiempo de descarga depende nuevamente de varios factores: las condiciones atmosféricas, la cantidad de electricidad recibida al raspar la paja sobre el cartón, la forma y el tamaño del electroscopio, la conductividad de la paja que sostiene el cartón, etc. Cuanto más seco esté el tiempo, más tiempo permanecerá electrizado.

¿Cómo podemos aumentar el tiempo durante el cual los aislantes y los conductores permanecen electrizados?

13.2 Preservar la electrización de los aislantes

La forma más sencilla de aumentar la duración de la electrización de un aislante cargado es impedir su contacto con el aire libre.[2]

Experimento 13.3 — *Envolver un aislante cargado con un conductor*

Electrice 10 o 20 pajitas de plástico de manera uniforme frotándolas enérgicamente con el cabello o con una hoja de papel. Colóquelas una al lado de la otra sobre un trozo de tela de algodón o una hoja de papel (como una servilleta de papel), figura 13.3 (a). Cubra las pajitas, figura 13.3 (b). El conjunto de pajitas envueltas se puede guardar en una caja de zapatos.

A intervalos regulares (una vez al día o una vez a la semana), retire una de las pajitas y compruebe su electrización. Utilice pruebas sensibles para detectar pequeñas

[2] [Gra32b], [Bos11, capítulo 8] y [BAC12, capítulo 9].

Figura 13.3: (a) Pajitas frotadas con un trozo de algodón o papel. (b) Pajitas envueltas.

cantidades de electricidad. Observe si atrae la tira de papel de seda de un electroscopio descargado, si atrae el disco de papel de un péndulo eléctrico descargado o si orienta un versorio metálico. Cuando las pajitas envueltas están inicialmente bien cargadas, observe que permanecen electrizadas durante días, semanas o incluso algunos meses.

El intervalo de tiempo durante el cual la pajita permanece electrizada depende, una vez más, de varios factores, como las condiciones meteorológicas, el grado de carga que recibió por fricción, si el plástico de la pajita es un buen o mal aislante, etc.

Experimento 13.4 — *Envolver un aislante cargado con otro aislante*

En el experimento 13.3, las pajitas se envolvieron en conductores como algodón o papel. Repita este procedimiento, pero esta vez envolviendo las pajitas frotadas en una bolsa de plástico aislante. En esta situación, las pajitas también permanecen electrizadas durante varios días, semanas o algunos meses.

Experimento 13.5 — *Envolver una pajita cargada con una hoja de papel y una bolsa de plástico*

También puede observar cuánto tiempo permanecen electrizadas las pajitas frotadas y envueltas en conductores (como una hoja de papel), en comparación con las pajitas frotadas y envueltas en aislantes (como una bolsa de plástico). El mismo día, envuelve algunas de ellas en conductores y otras en aislantes, suponiendo que las pajitas estén igualmente electrizadas antes de cubrirlas. De vez en cuando, retira una pajita envuelta en un conductor y otra pajita envuelta en un aislante. Compruebe la electrización de cada una de ellas.

Al realizar este experimento, a veces observamos que, el mismo día, las pajitas envueltas en un aislante conservan su electrización con una intensidad mayor que las envueltas en un conductor. También observamos que las pajitas envueltas en un aislante permanecen electrizadas durante más tiempo que las envueltas en un conductor.

La tabla 13.1 compara los intervalos de tiempo durante los cuales las pajitas cargadas permanecen electrizadas cuando se mantienen al aire libre, envueltas en papel o en una bolsa de plástico.

Experimento 13.6 — *Descargar una placa electrizada en el aire*

Para este experimento, utilice tablas o placas de PVC y poliestireno. Pueden tener cualquier forma. Por ejemplo, pueden ser cuadrados de unos 20 o 30 cm de lado,

Tabla 13.1: Intervalos de tiempo aproximados para descargar una pajita electrizada.

Condición	Duración
Al aire libre	Unos minutos
Envuelto en un conductor	Días, semanas o unos meses
Envuelto en un aislante	Días, semanas o unos meses

círculos de unos 20 o 30 cm de diámetro, etc. Frote enérgicamente una de sus caras con una hoja de papel, una servilleta o un pañuelo de papel. A continuación, coloque estas placas al aire libre, con la cara frotada hacia arriba. Compruebe su electrización cada 10 minutos. Compruebe, por ejemplo, si la cara frotada atrae la tira de papel de seda de un electroscopio descargado, si atrae el disco de papel de un péndulo eléctrico descargado o si orienta un versorio metálico. Mida cuánto tiempo permanece electrizada cada cara.

Dependiendo de las condiciones meteorológicas, las propiedades aislantes de la placa y el grado de carga inicial adquirida por fricción, las placas pueden permanecer electrizadas entre 10 minutos y una hora aproximadamente.

Experimento 13.7 — *Placas electrizadas superpuestas*

Repita el experimento 13.6. Electrice pares de placas del mismo material, con la misma forma y el mismo tamaño. Superponga las placas del mismo material con los lados frotados enfrentados. Únalas con gomas elásticas. A continuación, guarde los pares en una caja de zapatos. De vez en cuando, abra uno de estos pares y compruebe la electrización de las caras internas. Si el par sigue electrizado, vuelva a superponer las caras frotadas y guárdelas en la caja de zapatos.

Compruebe con este procedimiento que las caras frotadas pueden permanecer electrizadas durante días, semanas o algunos meses, tabla 13.2. Como siempre, el tiempo de descarga depende de la cantidad de carga inicial adquirida por fricción, la propiedad aislante de la placa, las condiciones meteorológicas, etc.

Tabla 13.2: Intervalos de tiempo aproximados para descargar una placa aislante electrizada.

Una placa al aire libre	Entre unos minutos y una hora
Placas superpuestas	Días, semanas o algunos meses

13.2.1 Algunos comentarios sobre estas experiencias

Los experimentos presentados en esta sección muestran que el tiempo durante el cual un aislante permanece electrizado puede aumentarse considerablemente

protegiéndolo del aire ambiente. Es evidente que las pajitas frotadas permanecen en contacto con el aire cuando se envuelven en un trozo de papel, tela o plástico. Lo mismo ocurre cuando se superponen dos placas frotadas y se guardan en una caja de zapatos. En todos los casos, las moléculas de aire que rodean estos cuerpos envueltos permanecen aproximadamente iguales con el paso del tiempo. Por el contrario, cuando un cuerpo electrizado se mantiene al aire libre, habrá diferentes moléculas de aire e iones cargados a su alrededor. Este aspecto puede ser una de las principales razones que aumentan el tiempo de descarga de los cuerpos envueltos en comparación con el corto tiempo de descarga de los cuerpos conservados al aire libre.

Una pajita electrizada puede descargarse al aire libre mediante el mecanismo *ACR*. El vapor de agua, otras partículas, moléculas e iones presentes en el aire pueden ser atraídos por la pajita, tocarla, adquirir parte de la carga de la pajita y luego ser repelidos por ella. Una pajita envuelta reduce la posibilidad de que se produzca este mecanismo.

Otro aspecto también puede ser relevante. Cuando una pajita de plástico electrizada se recubre con un material conductor o aislante, se produce una redistribución de las cargas en estos materiales de recubrimiento. Por lo tanto, «la fuerza total o resultante» que actúa sobre las partículas de aire externas tiene ahora una intensidad menor. Estas partículas de aire externas contienen moléculas, iones, impurezas, etc. La fuerza total ejercida sobre ellas por el cuerpo envuelto se debe ahora no solo a la pajita electrizada, sino también a las cargas redistribuidas sobre el material conductor o aislante que rodea la pajita. La fuerza total que actúa sobre cualquier partícula externa es ahora menor que la fuerza debida únicamente a la pajita. Estas partículas externas tienden entonces menos a interactuar con la pajita electrizada.

13.3 Preservar la electrización de los conductores

Experimento 13.8 — *Botellas de Leiden*

El experimento 13.2 muestra que un conductor cargado al aire libre pierde su electrización en pocos minutos. A continuación, presentamos un procedimiento que aumenta considerablemente la conservación de esta electrización.

Utilice aquí la botella de Leiden fabricada a partir de una botella de vidrio de 200 o 300 ml.[3] Lo ideal sería disponer de 5 o 10 botellas del mismo tamaño y forma, fabricadas con los mismos materiales. Una de estas botellas aparece en la figura 12.2. Se electrizará con un electroforo de Volta fabricado a partir de un molde para pizza de 30 cm de diámetro provisto de un mango de PVC, acrílico o plástico duro. La base aislante de este electroforo puede ser una placa cuadrada de PVC de 40 cm de lado. Esta base aislante se electriza frotándola enérgicamente con una servilleta de papel o un paño de algodón, figura 6.1 (a). El molde para pizza se electriza siguiendo el procedimiento descrito en las figuras 6.2 a 6.4. El molde para pizza se descarga cuando se acerca mucho a la bola metálica de una botella de Leiden conectada a tierra, figura 12.6. La botella de Leiden se puede electrizar bien repitiendo este procedimiento

[3] Sección 12.1 y [MFsd].

unas veinte veces. Una vez cargadas, las botellas deben conservarse en una estantería o en un armario, anotando la fecha en que se electrizaron.

A intervalos regulares (1 hora, 1 día o 1 semana), compruebe la electrización de una de estas botellas. Para ello, basta con tocar con un dedo la tira conductora externa de la botella y acercar otro dedo de la misma mano muy cerca de la bola metálica de la botella. Supongamos que se produce una chispa como la de la figura 12.7. Esto significa que la botella permaneció electrizada desde el momento inicial hasta esta descarga. La botella descargada ya no debe utilizarse en este experimento. En otro intervalo de tiempo igual, compruebe la carga de otra botella conservada en la estantería. Siga el mismo procedimiento hasta que todas las botellas se hayan descargado.

Al realizar este experimento, concluya que una botella cargada puede permanecer electrizada durante unos días (una semana, por ejemplo). El intervalo de tiempo exacto depende de la cantidad inicial de electrización, las propiedades aislantes de la botella, su tamaño y forma, etc.

Este experimento también se puede realizar con una sola botella. Siga el procedimiento de este experimento para cargarla. Después de 1 hora, 1 día o 1 semana, compruebe su electrización. Una vez descargada la botella, recárguela aproximadamente a la misma cantidad inicial siguiendo el procedimiento de este experimento. A continuación, después de 2 horas, 2 días o 2 semanas, compruebe su electrización. Una vez descargada, recárguela de nuevo siguiendo el procedimiento de este experimento. A continuación, después de 3 horas, 3 días o 3 semanas, compruebe su electrización. Continúe con este procedimiento hasta que la botella deje de estar electrizada tras un cierto tiempo (que puede ser de 10 horas, 10 días o 10 semanas, por ejemplo). Descubra cuánto tiempo permanece electrizada cuando se almacena en un lugar seguro y no se somete a ninguna acción.

A continuación, podemos comparar el experimento 13.2 con los experimentos de esta sección. Estos últimos experimentos muestran que las cargas situadas en los conductores internos y externos de un condensador, como una botella de Leiden, se almacenan durante más tiempo que las cargas distribuidas en el cartón conductor de un electroscopio mantenido al aire libre.

13.4 Electretos

13.4.1 Definiciones

Un «electreto» es un trozo de material aislante o dieléctrico que presenta una carga eléctrica permanente o una polarización eléctrica permanente. En realidad, el grado de electrización de un cuerpo disminuye con el tiempo. Sin embargo, cuando la constante de tiempo característica de la disminución de la carga es mucho más larga que los periodos durante los cuales se realizan estudios con este material, el cuerpo electrizado puede considerarse un electreto. Por ejemplo, cuando el experimento dura unos segundos, un cuerpo cuya electrización dura unos minutos puede considerarse un electreto. En este sentido, las pajitas o las reglas de plástico electrizadas por fricción pueden considerarse electretos en la mayoría de los experimentos descritos en este libro. Existen algunos instrumentos en los que los cuerpos internos deben

permanecer electrizados durante semanas o meses. En estos casos, un cuerpo que permanece electrizado durante un año puede considerarse un buen electreto. Ahora podemos aclarar la definición:

Definición 13.1

Los «electretos» son piezas de materiales aislantes que presentan una electrización casi permanente o una polarización dipolar, con una constante de tiempo característica para la disminución de la carga mucho más larga que el período durante el cual se realizan los estudios con el cuerpo.

En general, la palabra «electreto» solo se utiliza cuando la electrización o polarización dura varios meses, años o décadas. Esta palabra fue acuñada en 1885 por Oliver Heaviside (1850–1925):[4,5]

> Es evidente que falta una palabra para describir un cuerpo que está naturalmente y permanentemente electrizado por causas internas. Observando que «magnet» (imán) deriva de «magnetismo» mediante una abreviación en la tercera articulación desde el final, se sugiere que podríamos obtener lo que queremos realizando la misma operación con «electricidad». El resultado, «eléctrico», sería un nombre muy adecuado para designar un cuerpo intrínsecamente electrizado, si no fuera por dos razones. En primer lugar, antes se utilizaba para designar lo que hoy llamamos dieléctrico o aislante; y, en segundo lugar, «eléctrico» se utiliza hoy en día como adjetivo. La primera de estas objeciones no tiene mucho peso, ya que el uso de la palabra como sustantivo está totalmente obsoleto. La segunda es más importante, pero sigue sin tener mucha relevancia. Otra palabra que viene a la mente es «electreto», contra la que no hay nada que objetar, salvo que resulta extraña. Sin embargo, se trata simplemente de una cuestión de costumbre.

Existen varios tipos de electretos y diversos métodos de producción. También hay numerosas clasificaciones de electretos que varían según el autor. A continuación presentamos una clasificación sencilla.

Los electretos cuya carga total, resultante o neta es diferente de cero se denominan «electretos monopolares», «electretos con exceso de carga», «electretos con carga real» o «electretos con carga neta». La figura 13.4 (a) ilustra un electreto de carga superficial, mientras que la figura 13.4 (b) muestra un material con carga real distribuida dentro del dieléctrico, a veces denominado «electreto de carga espacial».

[4] [Hea87, Article 30: Electromagnetic induction and its propagation, Section 12: Electrisation and Electrification. Natural Electrets, p. 488], [JW80] y [Sil10b, p. 30].

[5] A word is evidently wanted to describe a body which is naturally permanently electrized by internal causes. Noticing that "magnet" is got from "magnetism" by curtailment at the third joint from the end, it is suggested that we may get what we want by performing the same operation upon electricity. An "electric," which is what results, would be a very good name for an intrinsically electrized body, but for two reasons. First, it was once used to signify what we should now call a dielectric or an insulator; and secondly, electric is now used as an adjective, or, equivalently, electrical. The former of these objections is of hardly any weight, that use of the word as a substantive being wholly obsolete. The latter is heavier, but still of no great importance. Another word that suggests itself is electret, against which there is nothing to be said except that it sounds strange. That is, however, a mere question of habit.

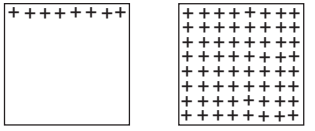


Figura 13.4: (a) Electreto con carga superficial real. (b) Electreto con carga espacial con exceso de carga real en el volumen del dieléctrico.

Los cuerpos cuya carga total es nula y que presentan una polarización eléctrica permanente se denominan electretos bipolares, dipolares o polarizados. La figura 13.5 (a) representa un electreto polarizado con cargas superficiales reales y opuestas. La figura 13.5 (b) muestra un electreto polarizado con cargas reales opuestas distribuidas en el volumen del dieléctrico. La figura 13.5 (c) ilustra un electreto que contiene dipolos moleculares orientados (alineados).

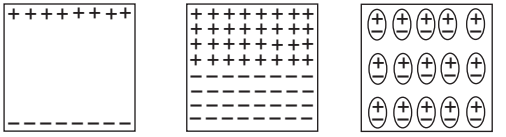


Figura 13.5: Electretos polarizados. (a) Con cargas superficiales reales y opuestas. (b) Con cargas reales opuestas distribuidas en el volumen del dieléctrico. (c) Con dipolos moleculares orientados.

El electreto de la figura 13.5 (c) es el equivalente electrostático de un imán permanente.

Un electreto general puede tener cargas cuasi permanentes de todos estos tipos, figura 13.6.

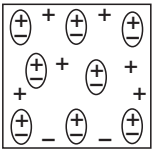


Figura 13.6: Un electreto genérico.

En aplicaciones prácticas, existen electretos con una o dos caras recubiertas por una capa conductora. Estos casos no se tratarán aquí.

13.5 La producción de electretos

13.5.1 Materiales

Aquí mostramos cómo producir electretos que permanecen electrizados o polarizados durante días, semanas o meses. Estos experimentos fueron realizados por Silva Junior y Boss.[6]

Hay que tener cuidado al realizar estos experimentos, ya que implican el uso de fuego, gases y humo procedentes de diferentes sustancias. En la literatura especializada se describen algunos procedimientos de seguridad.[7]

Los materiales utilizados en estos experimentos son parafina, cera de abejas, cera de carnauba y goma laca. La cera de parafina se obtiene generalmente del petróleo y se utiliza para fabricar velas. La parafina utilizada en estos experimentos puede obtenerse a partir de velas o comprarse en forma de barras rígidas o pastillas. La cera de carnauba se obtiene de las hojas de una palmera originaria del noreste de Brasil. Suele presentarse en forma de copos duros de color amarillo o marrón, a veces en forma de barras rígidas o pastillas. La goma laca o laca es una sustancia resinosa secretada por especies de cochinillas en árboles de la India y Tailandia. Se vende generalmente en forma de copos secos y se utiliza como colorante o acabado para la madera. Estos materiales se pueden encontrar en tiendas de pintura o de materiales de construcción, carpinterías y algunos supermercados.

El punto de fusión de estas sustancias varía entre 60 y 80 grados centígrados. Se pueden fundir al fuego de una cocina con ayuda de un molde metálico para tartas, de cucharones de aluminio o hierro, de vasos de vidrio, etc.

Experimento 13.9 — *Comportamiento aislante antes de la fusión*

Antes de fundir estas sustancias, compruebe su comportamiento aislante o conductor utilizando los procedimientos descritos en la sección 3.1. En el caso de las sustancias líquidas o las que se presentan en forma de copos, un borde del electroscopio cargado debe tocarlas, como se muestra en la figura 3.6.

Observe que la tira de papel de seda de un electroscopio cargado permanece levantada cuando todas las sustancias de esta subsección tocan el cartón, lo que demuestra que son aislantes.

Experimento 13.10 — *Neutralidad de carga antes de la fusión*

Compruebe también si alguna de estas sustancias está electrizada antes de fundirla. Esta prueba puede realizarse acercando una de estas sustancias a un versorio metálico, al disco de papel de un péndulo eléctrico descargado, a la tira de papel de seda de un electroscopio descargado o a un fino chorro de agua que fluye regularmente de un grifo. Cuando estos cuerpos no son atraídos por la sustancia, concluya que es neutra o está descargada. Esta es la situación más habitual al realizar esta prueba.

[6] [Sil10a], [Bos11, sección 8.2, pp. 234–248] y [BAC12, capítulo 19].
[7] [Bos11, section 8.2] y [BAC12, section 19.3].

La cera de carnauba a veces presenta un bajo grado de electrización en algunos de sus lados antes de fundirse. Las demás sustancias no suelen atraer a estos cuerpos conductores.

13.5.2 La fabricación de electretos

Para producir electretos, funda estas sustancias en los recipientes indicados, espere a que se enfríen y se solidifiquen, y luego caliente brevemente los recipientes para liberar los materiales. Todo el procedimiento dura aproximadamente 4 horas, incluyendo la preparación del material, la producción de los electretos y la limpieza del entorno de trabajo. Le sugerimos que realice una prueba durante un día completo para dominar todo el proceso, descubrir lo que se necesita en cada etapa, conocer los materiales y procedimientos necesarios, etc. A continuación, con todos estos conocimientos adquiridos, produzca otro día los electretos que se utilizarán en los siguientes experimentos.

Los electretos se preparan generalmente combinando diferentes cantidades de estas sustancias, como una mezcla de cera y resina. Sin embargo, en los experimentos aquí descritos, utilizaremos una sola sustancia en cada recipiente.

Las ceras y parafinas se rompen en trozos antes de colocarlas en los recipientes. Coloque los recipientes directamente sobre el fuego o caliéntelos al baño maría (baño de agua), que calienta las sustancias de forma suave y gradual. Una vez que la sustancia se fundió, se retira el recipiente de la fuente de calor hasta que la sustancia se enfríe y se solidifique. Este proceso dura entre 1 y 3 horas. El agua no debe entrar en los recipientes en ningún momento durante todo el proceso. La sustancia se retirará del recipiente después de enfriarse a temperatura ambiente. Un mango aislante es útil para retirar la sustancia y manipularla en el marco de los experimentos. Para ello, el mango debe introducirse en la sustancia antes de que se solidifique. El mango puede ser, por ejemplo, un tubo de plástico o una regla acrílica, figura 13.7 (a). Cuando la sustancia se enfríe y se vuelva rígida, el recipiente debe calentarse brevemente para retirar el electreto, figura 13.7 (b).

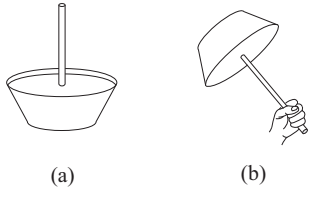


Figura 13.7: (a) Sustancia fundida con mango aislante en el interior del recipiente calefactor. (b) Electreto sólido.

Sin embargo, a veces no es fácil sacar el electreto calentado del recipiente, incluso con la ayuda de un mango. Puede ser necesario deformar el molde metálico para tartas o romper el vidrio para sacarlo. La goma laca, por ejemplo, puede volverse polvorienta o frágil, lo que dificulta su extracción en una sola pieza. La parafina se encoge ligeramente al solidificarse. A veces es posible sacarla del recipiente sin tener que calentarla.

Experimento 13.11 — *Comportamiento aislante tras la fusión*

Después de preparar los electretos, comprueba su comportamiento aislante o conductor como en el experimento 13.9.

Sujeta el electreto con la mano y toca el borde superior de un electroscopio cargado. La tira de papel de seda no cae. Concluye que todas estas sustancias se comportan como aislantes después de haber sido fundidas.

El experimento 13.12 demostrará que estas sustancias se electrizan después de fundirse y solidificarse. Sin embargo, como siguen comportándose como aislantes después de sacarlas de los recipientes, puede tocarlas con la mano sin descargarlas.

Experimento 13.12 — *Electrizar sustancias tras la fusión*

Sujete cada pieza por el mango o directamente con la mano y compruebe su electrización siguiendo los procedimientos del experimento 13.10.

Por lo general, observamos que la parafina, la goma laca, la cera de carnauba y la cera de abeja se electrizan. En otras palabras, atraen las patas de un versorio metálico, el disco de papel de un péndulo eléctrico descargado, la tira de papel de seda de un electroscopio de descarga y el fino chorro de agua que sale de un grifo. Esta electrización se produce independientemente del recipiente en el que se hayan fundido (aluminio, hierro o vidrio). La electrización de la cera de abeja es a veces muy débil y difícil de detectar.

Experimento 13.13 — *Signo de carga de los electretos tras la fusión*

Electrice dos electroscopios por inducción, uno positivamente y otro negativamente.[8] Colóquelos sobre una mesa, separados entre sí. Acerque lentamente el electreto a la tira elevada de cada electroscopio. Normalmente, la sustancia repele la tira del electroscopio negativo y atrae la tira del electroscopio positivo, lo que demuestra que el electreto está cargado negativamente.

No acerque demasiado el electreto a la tira elevada cuando haya repulsión entre ellos. Después de todo, la repulsión puede convertirse en atracción cuando esta distancia se vuelve muy pequeña.[9]

Experimento 13.14 — *Intervalo de tiempo durante el cual las sustancias permanecen electrizadas al aire libre*

Después de preparar los trozos, colóquelos al aire libre. De vez en cuando, compruebe su electrización como en el experimento 13.12.

Los trozos de parafina permanecieron electrizados entre unas horas y unos días y los trozos de cera de carnauba entre unos días y unos meses.

[8] Sección 7.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[9] Sección 7.10 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

Experimento 13.15 — *Intervalo de tiempo durante el cual las sustancias permanecen electrizadas cuando se conservaron en los contenedores en los que se fundieron*

Después de fundirse y retirarse de los recipientes, algunos trozos se volvieron a colocar en dichos recipientes una vez enfriados. De vez en cuando, retiramos uno de estos trozos. Comprobamos su electrización como en el experimento 13.12. A continuación, volvimos a colocar el trozo en el recipiente. Este procedimiento se repitió hasta que el trozo dejó de mostrar signos de electrización.

Los trozos de parafina permanecieron electrizados durante unos 5 a 20 días y los trozos de cera de carnauba durante varios meses.

Experimento 13.16 — *Intervalo de tiempo durante el cual las sustancias permanecen electrizadas cuando se conservaron en los recipientes en los que se fundieron, con una bolsa de plástico colocada entre el recipiente y la sustancia*

Después de preparar algunos trozos de parafina, estos se retiraron de los recipientes. A continuación, los recipientes se envolvieron en una bolsa de plástico y las sustancias se volvieron a colocar en los recipientes. De vez en cuando, se retiraban las sustancias. Probamos su electrización y las volvimos a colocar en los recipientes envueltos. Este procedimiento se repitió hasta que dejaron de presentar signos de electrización, es decir, aproximadamente 7 u 8 días después de haber sido fundidas.

Experimento 13.17 — *Intervalo de tiempo durante el cual las sustancias permanecen electrizadas cuando fueron envueltas en conductores y conservadas en los contenedores en los que se fundieron*

Algunos de los trozos de parafina, después de fundirse y solidificarse, se envolvieron en un conductor (franela de algodón o servilleta de papel) y se volvieron a colocar en los recipientes en los que se habían fundido. De vez en cuando, se desembalaban. Probamos su electrización, envolvimos los trozos y los volvimos a colocar en los recipientes. Este procedimiento se repitió hasta que dejaron de mostrar signos de electrización. Permanecen electrizados durante 7 a 12 días.

Experimento 13.18 — *Intervalo de tiempo durante el cual las sustancias permanecen electrizadas cuando estaban envueltas en conductores*

Quitamos los mangos de algunas piezas y las envolvimos en conductores (franela de algodón, toalla o trozo de papel). Colocamos las piezas envueltas en una caja de zapatos. De vez en cuando, sacábamos una de las piezas. A continuación, comprobábamos su electrización como en el experimento 13.12. Después de cada prueba, la pieza se volvía a envolver y se dejaba en la caja hasta la siguiente prueba.

Los trozos de cera de abeja permanecieron electrizados durante unos 5 meses. Algunos trozos de parafina permanecieron electrizados durante 7 meses, otros durante al menos 10 meses, cuando detuvimos las pruebas, a pesar de que seguían electrizados. Los trozos de goma laca y cera de carnauba permanecieron electrizados durante al menos 10 meses. Aunque todos estos trozos permanecieron electrizados, detuvimos las pruebas a los 10 meses.

Cabe señalar que el grado de electrización de estas piezas disminuía con el tiempo. En otras palabras, la atracción que ejercían sobre los cuerpos cercanos disminuía en intensidad a lo largo de los días o meses que duraban los experimentos. A veces era necesario acercar las piezas muy cerca de conductores inicialmente neutros para detectar una atracción de estos conductores.

Los experimentos 13.14 a 13.18 indican que estas piezas pueden considerarse realmente electretos, ya que permanecen electrizadas durante días o meses después de haber sido fundidas.

13.6 El electroforo con un electreto como base

En el capítulo 6, describimos un electroforo compuesto por dos partes, a saber: (a) una base aislante electrizada y (b) un colector de carga compuesto por un disco conductor provisto de un mango aislante. Realizamos varios experimentos utilizando una base de poliestireno o PVC electrizada frotándola con una toalla. Todos estos experimentos pueden reproducirse sustituyendo la base electrizada por un electreto (como un disco de parafina o un bloque de cera de carnauba).

Ventajas de utilizar una placa de poliestireno o PVC electrizada como base del electroforo: estas placas son muy fáciles de conseguir y es sencillo electrizarlas por fricción. Inconvenientes: estas placas se descargan en pocos minutos. Por lo tanto, es necesario frotar la placa de vez en cuando para poder continuar con los experimentos.

Ventaja de utilizar un electreto como base: permanece electrizada durante unos días o meses, perdiendo su electrización muy lentamente. La desventaja es la producción de electretos, que no es tan fácil.

13.7 Stephen Gray, los electretos y la preservación temporal de la electrización de los cuerpos

La producción y algunas de las principales propiedades de los electretos fueron descritas por primera vez por Stephen Gray, quien presentó sus descubrimientos en un importante artículo publicado en 1732.[10] En la misma obra, describió por primera vez un procedimiento para conservar la electrización de los cuerpos durante mucho tiempo.

Du Fay describió estos descubrimientos de Gray en los siguientes términos:[11,12]

> El Sr. Gray descubrió dos nuevas propiedades de la electricidad: una es que es permanente, es decir, que puede permanecer en los cuerpos durante mucho tiempo después de haber sido excitada, y la otra es que, en algunos casos, se encuentra en ellos sin que los cuerpos hayan sido frotados.

[10] [Gra32b], [Bos11, capítulo 8] y [BAC12, capítulo 9].

[11] [DF34b, p. 341].

[12] M. Gray a trouvé dans l'Électricité deux propriétés nouvelles, l'une qu'elle est permanente, c'est-à-dire, qu'elle peut subsister dans les corps très-long-temps après qu'elle y a été excitée, & l'autre qu'elle s'y trouve dans certains cas sans que les corps ayent été frottés.

A continuación presentamos algunas de las partes principales de esta obra tan importante de Gray, con nuestros comentarios entre corchetes y en las notas al pie de página:[13]

> *Carta de M.* Stephen Gray *al Dr. Mortimer, Secr. R. S., con un informe más detallado de sus* Experimentos *sobre la* Electricidad
>
> *Charter-House*, 7 de junio de 1732.
>
> Señor,
>
> Desde mi última [publicación en las *Philosophical Transactions*] (№ 422)[14] en la que daba cuenta de mis experimentos, demostrando que el agua es atraída por los cuerpos eléctricos [es decir, por los aislantes electrizados] y que puede adquirir una virtud eléctrica, de modo que atrae a los cuerpos sólidos, me embarqué en otra investigación: para saber si no habría una forma de hacer que esta propiedad de atracción eléctrica fuera más permanente en los cuerpos. El grado de éxito de este intento aparecerá en los experimentos que realicé con los diferentes cuerpos mencionados en el siguiente catálogo;[15] y como todos ellos fueron preparados de la misma manera, a excepción de los números 18 y 19, que se describirán más adelante, basta con una descripción general del método de preparación y conservación en estado de atracción.
>
> Los cuerpos con los que se realizaron los experimentos fueron colofonia negra y blanca, pez de piedra, goma laca, cera de abejas y azufre. Me procuré tres cucharones de hierro de diferentes tamaños, en los que fundí estas sustancias, utilizando el que me pareció más adecuado para la cantidad que pretendía fundir. Una vez

[13] *A Letter from Mr.* Stephen Gray *to Dr. Mortimer, Secr. R. S. containing a farther Account of His* Experiments *concerning* Electricity

Charter-House, June *7th*, 1732.

Sir,

Since my last [paper in the *Philosophical Transactions*] (№ 422) wherein I gave an Account of my Experiments, shewing Water will be attracted by Electrick Bodies [that is, by electrified insulators], and that it may have an Electrick Vertue communicated to it, so as to attract solid ones, I have been upon another Enquiry; Whether there might not be a Way found to make this Property of Electrical Attraction more permanent in Bodies? How far I have succeeded in this Attempt, will appear by the Experiments I have made on the several Bodies mentioned in the following Catalogue; and as they were all of them prepared after the same manner, excepting Numb. 18 and 19, which shall be described afterwards, a general Description of the Method of preparing and preserving them in a State of Attraction, may suffice.

The bodies on which the Experiments were made, were Rosin both black and white, Stone-Pitch, Shell or Gum-Lac, Bees-Wax, and Sulphur. I procured three Iron Ladles of several Sizes, in which I melted these Substances, making use of that which I thought most convenient for the Quantity I designed to melt. When any of these Bodies were melted, they were taken off the Fire, and set by in the Ladle to cool and harden; then it was returned to the Fire, where it remained 'till it was melted about the Bottom and Sides of the Ladle, so as to be moveable; so that by inverting the Ladle it might be taken out; having the Form of nearly the Section of a Sphere, the Convex Surface, as also the Plain one, being naturally (if I may so say) polished, excepting the Sulphur, which cools without retaining its Polish, except when cast in Glass Vessels, as shall be shewed hereafter. I shall now proceed to the Experiments and Observations made on these Electric Bodies [that is, made on these insulators].

When any of them were taken out of the Ladle, and their Convex Surface hardened, they would not at first attract, 'till the Heat was abated, or 'till they came to a certain Degree of Warmth, and then there was a small Attraction; which Warmth I estimated to be nearly that of a Hen's Egg when just laid: The Attraction encreasing so, as when cold, to attract at least ten times farther than at first.

[14] [Gra32a], [Bos11, Capítulo 7] y [BAC12, capítulo 8].

[15] Este catálogo figura en la página 244 de esta obra.

> fundidos, se retiraron del fuego y se dejaron enfriar y endurecer en el cucharón; luego se volvieron a poner al fuego, donde permanecieron hasta que se fundieron en el fondo y en los lados del cucharón, de modo que se pudieran mover; así, al dar la vuelta al cucharón, se pudieron retirar; tomando entonces la forma de una sección casi esférica, con la superficie convexa y la superficie plana pulidas de forma natural (si se me permite decirlo), a excepción del azufre, que se enfría sin conservar su pulido, salvo cuando se vierte en recipientes de vidrio, como se mostrará más adelante. Pasaré ahora a las experiencias y observaciones realizadas sobre estos cuerpos eléctricos [es decir, sobre estos aislantes].
>
> Cuando uno de ellos se retiraba del cucharón y su superficie convexa se endurecía, al principio no atraía, hasta que el calor disminuía o alcanzaba un cierto grado de calor, entonces se producía una débil atracción; estimé que este calor era casi el de un huevo de gallina recién puesto: la atracción aumentaba así, de modo que cuando estaba frío, atraía al menos diez veces más lejos que al principio.

Gray no expuso las razones que le llevaron a elegir estos materiales específicos. Tampoco especificó por qué esperaba que se electrizaran gracias a este procedimiento. En cualquier caso, era un observador atento. Desde 1708, llevaba a cabo experimentos eléctricos. En 1729, descubrió los conductores y los aislantes al darse cuenta de que, después de frotar un tubo de vidrio, el tapón del extremo del tubo comenzaba a atraer los cuerpos ligeros que se encontraban cerca. Este detalle le llamó la atención. Si hubiera frotado el tapón con la mano desnuda, este no habría atraído los cuerpos ligeros cercanos.[16] Al continuar con estos experimentos, descubrió que podía comunicar la virtud eléctrica (o la propiedad de atraer cuerpos ligeros) a ciertas sustancias que no se frotaban, pero que estaban en contacto con el tubo de vidrio electrizado. Estas sustancias se denominan hoy en día conductores. Otras sustancias no permitían el flujo y la disipación de la virtud eléctrica hacia el suelo, y hoy en día se denominan aislantes. En sus artículos publicados describió los siguientes aislantes: hilo de seda, líneas de pesca de crin de caballo, bloques de resina, vidrio calentado, bloques de cera de abeja, azufre y goma laca. Quizás observó por casualidad que algunas de estas resinas y ceras se electrizaban, *sin haber sido frotadas previamente*, ya que atraían los cuerpos ligeros que se colocaban cerca. Quizás sospechó que algunos de estos materiales se electrizaban cuando se fundían. Este artículo de 1732 podría ser un estudio sistemático de esta observación fortuita. Los materiales descritos por Gray en este artículo permanecían electrizados durante mucho tiempo, sin haber sido frotados previamente. Hoy en día se denominan electretos. Pueden electrizarse según su procedimiento o por otros medios modernos de electrización. Fue el primero en presentar un procedimiento para la producción de electretos y una lista de materiales que pueden convertirse en electretos.

A continuación, Gray presentó otro descubrimiento muy importante, a saber, un procedimiento que permite aumentar el intervalo de tiempo durante el cual un cuerpo puede permanecer electrizado:[17,18]

[16] Anexo B de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

[17] [Gra32b], [Bos11, capítulo 8] y [BAC12, capítulo 9].

[18] The manner of preserving them in a State of Attraction, was by wrapping them up in any thing that would keep them from the external Air; as at first for the smaller Bodies I used white Paper, but for the larger ones white Flannel; but afterwards found that black Worsted Stockings would do as well. Being thus

Tabla 13.3: *CATÁLOGO de los diferentes* Cuerpos Eléctricos [es decir, los aislantes] *mencionados en el discurso anterior.*

№	nombres de los diferentes cuerpos.	Peso.		Mes.	Días.
		Onzas	Dracmas		
1	Colofonia negra fina	2	0	*enero*	31
2	Piedra pez y colofonia negra	2	2	*enero*	31
3	Colofonia fina y cera de abeja	2	1	*febrero*	1
4	Piedra pez	1	7	*febrero*	1
5	Piedra de azufre	3	6	*febrero*	4
6	Goma laca	10	0	*febrero*	10
7	Colofonia negra fina	10	4	*febrero*	11
8	Cera de abeja y colofonia	9	0	*febrero*	12
9	Colofonia 4 [*partes*], y goma laca 1 *parte*	10	0	*febrero*	12
10	Azufre	18	0	*febrero*	15
11	Piedra pez	10	12	*febrero*	16
12	Colofonia negra	23	0	*febrero*	23
13	Colofonia blanca	7	12	*febrero*	25
14	Goma laca	11	14	*febrero*	26
15	Goma laca y colofonia negra *ana*	9	12	*febrero*	26
16	Goma laca 4 *partes*, colofonia 1 *pt.*	17	8	*febrero*	28
17	Goma laca, colofonia negra fina *ana*	28	4	*marzo*	2
18	Un cilindro de piedra de azufre	19	4	*marzo*	20
19	Un gran cono de piedra de azufre	30	0	*marzo*	29
20	Un bloque de azufre	11	4	*abril*	29

clothed, they were put into a large Fir Box, there to remain 'till I had Occasion to make use of them.

The Cylinder of Sulphur, Numb. 18, was made by melting the Sulphur, and pouring into a Cylindrick Glass Vessel, which had first been heated, to prevent its cracking. When the Sulphur was hardened, it was somewhat less than the Glass; so that by inverting the Glass, it came out easily, and had a polished Surface almost as smooth as the Glass in which it was cast. The large Cone of Sulphur, Numb. 19, was made after the same manner; *viz.* by being cast in a large Drinking-Glass.

I am now to give an Account of the Observations made on the several Bodies mentioned in the Catalogue, but must first give a Description of the Catalogue. The first Column contains the Number, which in a small Piece of Paper is fixed on each of the Several Bodies; the Name of which is given in the second Column, whether they are single or compound Substances. The third Column shews of what Weight they were of when melted, in Ounces and Drachms of *Averdupois* Weight. In the fourth Column you have the Days of the Month when the Body was melted and received its Form, and consequently when it first began to attract.

I did for thirty Days continue to observe every one of these Bodies, and found that at the End of the said Time they attracted as vigorously as at the first or second Day, as they do now at the writing hereof. By the Times mentioned in the Catalogue, being subtracted from any Time after, will be shewn how long any of the Bodies have continued their Attractive Vertue; by which it will appear, that some of them have not

Para mantenerlos en un estado de atracción, los envolvía en cualquier cosa que pudiera protegerlos del aire exterior; al principio, utilizaba papel blanco para los cuerpos más pequeños y franela blanca para los más grandes, pero luego descubrí que las medias de lana negra funcionaban igual de bien. Una vez envueltos, los guardaba en una gran caja de abeto, donde permanecían hasta que los necesitaba.

El cilindro de azufre, № 18, se fabricó fundiendo el azufre y vertiéndolo en un recipiente cilíndrico de vidrio, que se había calentado previamente para evitar que se agrietara. Una vez endurecido el azufre, era ligeramente más pequeño que el vidrio, de modo que al dar la vuelta al vidrio se desprendía fácilmente y presentaba una superficie pulida casi tan lisa como el vidrio en el que se había vertido. El gran cono de azufre, № 19, se fabricó de la misma manera, es decir, vertiéndolo en un vaso grande.

A continuación, voy a dar cuenta de las observaciones realizadas sobre los diferentes cuerpos mencionados en el catálogo, pero primero debo ofrecer una descripción del mismo. La primera columna contiene el número, que está inscrito en un pequeño trozo de papel fijado a cada uno de los diferentes cuerpos; el nombre de estos se indica en la segunda columna, ya se trate de sustancias simples o compuestas. La tercera columna indica su peso en estado fundido, en onzas y dracmas de peso *Averdupois*.[19] En la cuarta columna se indican los días del mes en

---

lost their Attraction for more than four months:

So that we have some Reason to believe, that we have now discovered that there is *a perpetual attractive Power* in all Electrick Bodies [that is, in all electrified insulators], without exciting by either rubbing, beating, &c. or any other Attrition. But this will further appear by the Account I am now to give of the two last Bodies mentioned in the Catalogue. The Cone of Sulphur, Numb. 19, that was cast in a large Drinking-Glass, in about two Hours after it was taken out of the glass, attracted, and the Glass attracted too, but at a small Distance. Next Day the Sulphur was taken out of the Glass, and then it attracted strongly, but there was now no perceivable Attraction of the Glass. Then the Cone of Sulphur was set with its Base upon the Lid of the Fir Box, wherein the other Electrick Bodies lay, and the Glass whelmed over it. I examined it every Day after, and still found it to attract; but finding the Place not so convenient having Occasion to look into the Box often, I removed it to the Table that stands between the two Windows of my Chamber, where it has continued to this Time, and whenever the Glass is taken off, attracts at near as great a Distance as the Sulphur that is clothed and shut up in the Box abovementioned. And though at first there was no Attraction, when the Glass was taken off, yet I now find, that in fair Weather the Glass also attracts, but not at so great a Distance as the Sulphur, which never fails to attract, let the Wind or Weather be never so variable, as do all the other Bodies mentioned in the Catalogue; only in wet Weather the Attractions are not made at so great a Distance as in fair Weather.

Number 20 is a Cake of Sulphur that was melted; and as the other Bodies have taken the Form of a Convex Section of a Sphere, this, when cold, was laid with its flat Side downwards, on the same Table with the Cone of Sulphur: They were both placed so near the Wall, as to prevent the Sun shining on them. This was, as the Catalogue shews, on the 18th of *April*; and though it had no manner of Clothing or Covering, has attracted ever since. And in this, as in the other Bodies, the Attraction will be according to the Weather; but when it attracts the strongest, it is not more than the tenth Part of what the Cone of Sulphur, that is covered, attracts.

The manner of observing these Attractions is best performed by holding the Attracting Body in one Hand, and a fine white Thread tied to the End of a Stick, in the other; by this means far less Degrees of Attraction will be perceived, than by making use of Leaf-Brass. When the Thread is held at the utmost Distance, it may be attracted; the Motion of it is at first very slow, but still accelerating as it approaches nearer to the attracting Body.

I am now on the Subject of permanent Attraction in Glass, then in the other Bodies, but have not yet compleated those Experiments, meeting with more Interruption by the Weather.

[…]

[19] 1 onza $= (1/16)$ libra ≈ 28.35 g, tandis que 1 dracma $= (1/16)$ onza $= (1/256)$ libra ≈ 1.772 g.

que el cuerpo se fundió y tomó su forma y, por lo tanto, en que comenzó a ejercer su atracción.

Seguí observando cada uno de estos cuerpos durante treinta días y comprobé que, al final de ese periodo, ejercían una atracción tan fuerte como el primer o el segundo día, como es el caso hoy, en el momento en que escribo estas líneas. Restando los momentos mencionados en el catálogo de cualquier momento posterior, se verá cuánto tiempo conservó cada uno de los cuerpos su poder de atracción; así se verá que algunos de ellos no perdieron su atracción durante más de cuatro meses:[20]

Por lo tanto, tenemos razones para creer que ahora descubrimos que existe una «fuerza de atracción perpetua» en todos los cuerpos eléctricos [es decir, en todos los aislantes electrizados], sin que sea necesario excitarlos por fricción, batido, etc. o cualquier otra forma de atrición. Pero esto quedará más claro en el informe que voy a dar ahora sobre los dos últimos cuerpos mencionados en el catálogo. El cono de azufre, № 19, que se había vertido en un vaso grande, aproximadamente dos horas después de haber sido retirado del vaso, atraía, y el vaso también atraía, pero a una distancia corta. Al día siguiente, se retiró el azufre del vaso y entonces ejerció una fuerte atracción, pero ya no se percibía ninguna atracción por parte del vaso. A continuación, el cono de azufre se colocó con su base sobre la tapa de la caja de abeto, en la que se encontraban los demás cuerpos eléctricos, y se volcó el vaso sobre él. Lo examiné todos los días a partir de entonces y observé que seguía ejerciendo una atracción; pero, al encontrar poco práctico su emplazamiento, ya que a menudo necesitaba mirar dentro de la caja, lo trasladé a la mesa que se encuentra entre las dos ventanas de mi habitación, donde permaneció hasta ahora, y cada vez que se retira el vidrio, ejerce una atracción a una distancia casi tan grande como el azufre que está cubierto y encerrado en la caja antes mencionada. Y aunque al principio no había ninguna atracción cuando se retiraba el vidrio, ahora observo que, cuando hace buen tiempo,

[20]Esta carta estaba fechada el 7 de junio de 1732. Según este párrafo, parece que el catálogo de la página 244 de esta obra hace referencia a 1732, ya que Gray indica que algunas sustancias no perdieron su poder de atracción durante más de cuatro meses (es decir, desde el 31 de enero de 1732, fecha en la que se fundió el cuerpo, hasta el 7 de junio de 1732, fecha en la que se redactó el artículo). Du Fay, por su parte, cuando se refiere a estos trabajos, considera que estos cuerpos conservaron su poder de atracción durante un año y medio [DF34b, p. 342]:

> El Sr. Gray envolvió entonces estos diferentes cuerpos en papel, franela o cualquier otro material similar, y conservaron su electricidad durante varios meses, incluso hasta el momento en que escribió, que fue aproximadamente un año y medio después de sus primeros experimentos.

Aquí está el original en francés:

> M. Gray enveloppoit alors ces différents corps dans du papier, dans de la flanelle, ou dans toute autre matiére semblable, & ils y ont conservé leur électricité pendant plusieurs mois, & même jusqu'au temps qu'il écrit, qui étoit environ un an & demi après ses premiéres expériences.

Nos parece que Du Fay interpretó el catálogo como una referencia al año 1731. Probablemente, esta interpretación se debió al hecho de que el volumen 37 de *Philosophical Transactions* estaba relacionado con el periodo 1731–1732.

En cualquier caso, sea cual sea la interpretación correcta, podemos estar seguros de que Gray logró mantener sus cuerpos electrizados durante un período muy largo, de al menos cuatro meses.

> el vidrio también atrae, pero no a una distancia tan grande como el azufre, que nunca dejó de atraer, independientemente del viento o del tiempo, como todos los demás cuerpos mencionados en el catálogo; solo en tiempo húmedo las atracciones no se producen a una distancia tan grande como cuando hace buen tiempo.
>
> El № 20 es un trozo de azufre que se fundió; y como los demás cuerpos adoptaron la forma de una sección convexa de una esfera, este, una vez enfriado, se colocó con su lado plano hacia abajo, sobre la misma mesa que el cono de azufre: ambos se colocaron tan cerca de la pared que el sol no podía iluminarlos. Como se muestra en el catálogo, esto ocurrió el 18 *de abril*;[21] y, aunque no se cubrió con ninguna prenda ni manta, siguió ejerciendo una atracción desde entonces. Y en este caso, como en los demás cuerpos, la atracción dependerá de las condiciones meteorológicas; pero incluso cuando es más fuerte, no supera la décima parte de la que ejerce el cono de azufre cubierto.
>
> La mejor manera de observar estas atracciones es sostener el cuerpo atractivo en una mano y un fino hilo blanco[22] atado al extremo de un palito en la otra; de esta manera, se percibirán grados de atracción mucho menores que utilizando latón. Cuando el hilo se mantiene a la distancia máxima, puede ser atraído; su movimiento es muy lento al principio, pero se acelera a medida que se acerca al cuerpo que lo atrae.
>
> Actualmente estoy trabajando en el tema de la atracción permanente en el vidrio y, posteriormente, en otros cuerpos, pero aún no he terminado estos experimentos, ya que me interrumpieron las condiciones meteorológicas. [...]

A partir de esta descripción, concluimos que Gray logró aumentar el tiempo durante el cual el cuerpo permanecía electrizado de dos maneras. La primera consistía en envolver el cuerpo electrizado en papel, franela u otros materiales similares. La segunda consistía en cubrirlos en el recipiente donde se habían fundido o endurecido.

Cuando el recipiente era de vidrio, Gray observó que no solo la resina atraía los cuerpos ligeros colocados cerca, sino que el propio vidrio también se electrizaba. Es fácil detectar la electrización del recipiente en el que se fundió o endureció el cuerpo dieléctrico cuando dicho recipiente está fabricado con un material aislante como el vidrio. En este caso, el recipiente puede conectarse a tierra o manipularse con las manos sin perder la electricidad que adquirió. Por el contrario, cuando este recipiente está hecho de un material conductor como el metal, es más difícil saber si se electrizó durante la producción del electreto en su interior. Para detectar su electrización, el recipiente debe aislarse de la tierra antes y después de la preparación del electreto. A continuación, se puede comprobar su carga después de retirar el electreto.

En la sección 13.2, presentamos algunos experimentos en los que las pajitas electrizadas permanecieron cargadas durante varios meses. La única condición era envolverlas en una toalla de papel, una franela de algodón o una bolsa de plástico para evitar su contacto con el aire exterior. Aunque se trata de experimentos extremadamente sencillos, no vimos procedimientos como este descritos en los manuales sobre electricidad. En cualquier caso, se trata de un logro notable. Al aire libre, una pajita

[21] El catálogo menciona el 29 de abril.

[22] Probablemente se trataba de un hilo de algodón o lino. Estos materiales se comportan como conductores en los experimentos habituales de electrostática. Gray utiliza aquí su hilo pendular, véase la sección 2.5.

frotada pierde su electricidad en pocos minutos o en una hora. Sin embargo, cuando se envuelve en una servilleta de papel o una bolsa de plástico, puede permanecer electrizada durante unos 3 meses o incluso más.

Para dar una idea de la magnitud, supongamos que una pajita cargada permanece electrizada durante 10 minutos cuando se conserva al aire libre. Supongamos además que permanece electrizada durante 3 meses cuando se envuelve en una bolsa de plástico. ¡El intervalo de tiempo durante el que permanece electrizada se multiplicó por casi 13 000 simplemente envolviéndola! Es sorprendente ver cómo un procedimiento tan sencillo puede tener un impacto tan considerable.

La inspiración para probar este procedimiento nos vino directamente de este artículo fundamental de Gray publicado en 1732, en el que utilizaba esta técnica con sus electretos.

13.8 El desarrollo y aplicaciones de los electretos

Los electretos desarrollados por Gray también fueron estudiados por Du Fay y otros científicos. Sin embargo, este tema siguió siendo durante mucho tiempo una simple curiosidad científica. Heaviside presentó en 1885 una receta teórica para la producción de electretos dentro de un condensador de alta tensión.[23] Sin embargo, no fue hasta la década de 1920 cuando Momotaro Eguchi fabricó electretos que se ajustaban esencialmente a este procedimiento utilizando una mezcla de cera de carnauba y resina.[24]

Fukada describió los experimentos de Eguchi y la duración de la electrización de sus electretos de la siguiente manera:[25,26]

> Los electretos originales, dieléctricos con carga permanente, fueron preparados por Eguchi en 1924 a partir de una mezcla de cera de carnauba y resina [1].[27] Se aplicó un campo eléctrico de aproximadamente 1.5 MV/m a una mezcla fundida a unos 130℃. En el Museo de Ciencias de Tokio se conserva un disco electreto compuesto de cera de carnauba y resina, con un diámetro de 20 cm y un grosor de 1 cm. Sus cargas superficiales persisten 45 años después de su fabricación y se observó que representan aproximadamente una séptima parte de las cargas originales [2].[28]

[23] [Hea87, Artículo 30: Electromagnetic induction and its propagation, Sección 12: Electrisation and Electrification. Natural Electrets, pp. 491–2], [JW80] y [Sil10b, pp. 20–22].

[24] [Egu25], [Mas87] y [Sil10b].

[25] [Fuk00].

[26] The original electrets, permanently charged dielectrics, were prepared by Eguchi in 1924 using a mixture of carnauba wax and resin. An electric field of about 1.5 MV/m was applied on a molten mixture at about 130° C. A disk of electret made of carnauba wax and resin, 20 cm in diameter and 1 cm thick, is preserved at the Science Museum in Tokyo. Its surface charges remain 45 years after preparation and were observed to be approximately one-seventh the original charges.

[27] [1] Eiichi Fukada y M. Eguchi, «On the permanent electret», *Phil. Mag.*, vol. 49, pp. 178–192, 1925. [Aunque la referencia [1] del artículo de Fukada presenta a los autores tal y como se indica aquí, este artículo fue redactado únicamente por Eguchi, [Egu25].]

[28] [2] T. Takamatsu e I. Sumoto, «Life time of carnauba wax electrets», *Riken Hokoku*, vol. 45, pp. 141–148, 1969 (en japonés).

Desde entonces, los electretos se fabricaron mediante numerosos métodos y procedimientos diferentes. Por lo general, se clasifican en función de su técnica de producción.

A continuación, citamos algunas aplicaciones de los electretos:

- Como base electrizada de un electroforo.
- Micrófonos.
- Auriculares y altavoces.
- Detectores de radiación.
- Dosímetros.
- Fotocopiadoras o electrofotografía.
- Unidades de almacenamiento de memoria o registro electrostático.
- Detectores de humedad.
- Baterías electrostáticas.
- Filtros de aire.
- Detectores de vibraciones.
- Detectores de presión.
- Motores electrostáticos.
- Generadores de corriente.
- Generadores de tensión.
- Figuras de Lichtenberg.
- Etc.

Los electretos siguen siendo un campo de investigación activo. Existen varias referencias que tratan este tema.[29]

[29] [Net94], [Gro54], [Jef59], [Jef73, Capítulo 9: Electret motors], [JW80], [Ses87], [Fer00], [MWW07], [MW08], [Sil10b] y [GB17, Capítulo 7: Excess charge in solids: electrets].

Capítulo 14

Las misteriosas fuerzas no electrostáticas

14.1 La fuerza electrostática o la fuerza de Coulomb

Charles Augustin de Coulomb descubrió en 1785 la ley de la fuerza entre dos cuerpos electrizados. Presentó sus resultados en dos artículos de 1785, publicados en 1788.[1] Dio a estos cuerpos electrizados diferentes nombres, a saber, «masas eléctricas», «moléculas eléctricas», «moléculas electrizadas» o «densidades de fluidos eléctricos».[2]

En el caso de cuerpos electrizados con cargas del mismo signo, Coulomb se expresó de la siguiente manera:[3,4]

Ley fundamental de la electricidad.

> La fuerza repulsiva entre dos pequeños globos electrizados con el mismo tipo de electricidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los centros de ambos globos.

Para los cuerpos con signos opuestos, Coulomb concluyó que:[5,6]

> Así pues, llegamos, mediante un método totalmente diferente al primero, a un resultado similar; por lo tanto, podemos concluir que la atracción recíproca del fluido eléctrico denominado «positivo» sobre el fluido eléctrico denominado habitualmente «negativo» es inversamente proporcional al cuadrado de las distancias.

[1] [Cou88a], [Cou88b], [Pot84] y [Cou35].

[2] [Gil71b] y [Gil71a, pp. 190–192].

[3] [Cou88a, p. 572], [Pot84, p. 110] y [Cou35].

[4] *Loi fondamentale de l'électricité.* La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité est en raison inverse du carré de la distance du centre des deux globes.

[5] [Cou88b, p. 572], [Pot84, p. 123] y [Cou35].

[6] Nous voici donc parvenus, par une méthode absolument différente de la première, à un résultat semblable; ainsi nous pouvons en conclure que l'attraction réciproque du fluide électrique appelé *positif*, sur le fluide électrique nommé ordinairement *négatif*, est en raison inverse du carré des distances;

Hasta ese momento, Coulomb solo había mencionado la variación de la fuerza eléctrica en función de la distancia entre los cuerpos electrizados. No fue hasta la última parte de su segundo informe, cuando resumió las principales propuestas derivadas de sus investigaciones, que mencionó que esta fuerza era proporcional al producto de las densidades del fluido eléctrico de los dos cuerpos electrizados (o proporcional al producto de las dos cargas, como se expresa habitualmente):[7,8]

Resumen de los temas tratados en este trabajo.

> 1º Que la acción, ya sea repulsiva o atractiva, de dos globos electrizados y, por consiguiente, de dos moléculas eléctricas, se compone de las densidades del fluido eléctrico de las dos moléculas electrizadas y es inversamente proporcional al cuadrado de las distancias; [...]

Gillmor señaló acertadamente que Coulomb no había demostrado experimentalmente que la ley de la fuerza eléctrica fuera proporcional al producto de las cargas.[9] Solo sugirió o supuso esta proporcionalidad, sin considerar importante demostrar este resultado experimentalmente. Desde entonces, se expresaron diferentes puntos de vista en la literatura sobre este tema.[10] Algunos autores afirman que la intensidad de la fuerza eléctrica es «por definición» proporcional al producto de las dos cargas (es decir, que la cantidad de carga en un cuerpo estaría definida por la cantidad de fuerza que produce). Otros autores afirman que podemos definir y medir la carga independientemente de la definición y la medición de la fuerza. Si este es el caso, la proporcionalidad entre la fuerza eléctrica y el producto de las dos cargas podría obtenerse «experimentalmente».

Esta fuerza electrostática es muy similar a la fuerza gravitatoria que Newton presentó en su obra *Principios matemáticos de la filosofía natural*, conocida generalmente por su primer nombre latino, *Principia*.[11] Esta obra se publicó por primera vez en 1687. Estas dos fuerzas se orientan a lo largo de la línea recta que une los cuerpos en interacción, siguen el principio de acción y reacción, y varían como la inversa del cuadrado de la distancia entre las partículas. Además, mientras que la fuerza eléctrica depende del producto de las amplitudes de las dos cargas, la fuerza gravitatoria es proporcional al producto de las masas en interacción. Parece que Coulomb llegó a su ley de la fuerza más por analogía con la ley de la gravedad de Newton que por sus pocas y dudosas mediciones realizadas con un péndulo de torsión.[12]

[7] [Cou88b, p. 611], [Pot84, p. 146] y [Gil71a, pp. 190–191].

[8] *Récapitulation des objets contenus dans ce Mémoire.* 1º Que l'action, soit répulsive, soit attractive de deux globes électrisés et, par conséquent, de deux molécules électriques, est en raison composée des densités du fluide électrique des deux molécules électrisées et inverse du carré des distances; [...]

[9] [Gil71b] y [Gil71a, pp. 190–192].

[10] [BW13].

[11] [New90a], [New34], [New52], [New90], [New99], [New08] y [New10].

[12] [Hee92].

Definición 14.1

La interacción fundamental que caracteriza los fenómenos eléctricos de las cargas en reposo se denomina «fuerza electrostática», «fuerza coulombiana», «fuerza de Coulomb» o «ley de Coulomb». Las partículas con carga del mismo signo se repelen, mientras que las partículas con carga de signos opuestos se atraen. Esta fuerza es proporcional al producto de las cargas de los dos cuerpos y varía inversamente con el cuadrado de su distancia (suponiendo que los cuerpos son de pequeño tamaño en relación con la distancia que los separa). Esta fuerza sigue el principio de acción y reacción, y se ejerce a lo largo de la línea recta que une las partículas en interacción. Las fuerzas denominadas «no electrostáticas» o «no coulombianas» son las fuerzas que actúan sobre las partículas electrizadas y que no siguen la ley de Coulomb.

En 1822, André-Marie Ampère (1775–1836) acuñó los términos «electrostática» y «electrodinámica».[13]

Se necesitan fuerzas no electrostáticas para mantener un conjunto de cuerpos electrizados en reposo unos respecto a otros, en equilibrio estable. También se necesitan fuerzas no electrostáticas para separar partículas con carga eléctrica opuesta, como en el efecto del ámbar. También son necesarias en los circuitos resistivos que transportan corrientes constantes,[14] y en muchas otras situaciones. Este capítulo presenta algunos fenómenos que requieren la existencia de estas fuerzas de origen no electrostático.

14.2 Fuerzas no electrostáticas en configuraciones de equilibrio estable

Samuel Earnshaw (1805–1888) demostró en 1842 que es imposible que un sistema de cuerpos permanezca en reposo entre sí, en equilibrio estable, cuando las únicas fuerzas que actúan entre ellos son centrales y varían como la inversa del cuadrado de sus distancias.[15] En la naturaleza, por el contrario, existen varios sistemas en los que los cuerpos electrizados en interacción permanecen en reposo entre sí, en equilibrio estable. Por lo tanto, en todas estas situaciones, se necesitan fuerzas de origen no electrostático para equilibrar las fuerzas electrostáticas y garantizar la estabilidad del sistema.[16]

Supongamos un conductor esférico C cargado negativamente y aislado del suelo. Puede haberse cargado, por ejemplo, raspando una regla de plástico sobre su superficie. O mediante el método *ACR*, tocando una pajita frotada. Las cargas del conductor se repelen entre sí. En equilibrio, permanecen distribuidas uniformemente por su superficie, figura 14.1.

[13] [Amp22a, p. 60], [Amp22c, nota en p. 200], [Amp22b, nota en la p. 237], [Amp85b, nota en la p. 239], [Amp85a, nota en la p. 192], [Blo82, p. 78], [Cha09, sección 1.3], [AC11, sección 1.4] y [AC15, sección 1.4].

[14] [AH07], [AH09] y [AH13].

[15] [Ear42], [Max54a, artículo 116, pp. 174–176] y [Sco59].

[16] Véase [VF80], [CS02, sección 18.7], [AH07, sección 5.3 y anexo A], [AH09, sección 5.3 y anexo A], [AH13, sección 5.3 y anexo A], [AC11, sección 2.4], [AC15, sección 2.4], así como las secciones 7.8 y 7.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

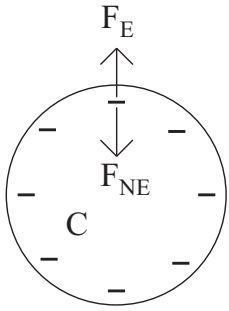


Figura 14.1: Un conductor esférico C uniformemente electrizado. Mostramos la fuerza electrostática repulsiva neta F_E que actúa sobre la carga negativa superior, debida a todas las demás cargas negativas, y la fuerza de origen no electrostático, F_{NE}, responsable de mantener esta carga superior en reposo en la superficie de la esfera.

Consideremos la partícula con carga negativa situada en la parte superior de la esfera. Es repelida por todas las demás partículas con carga negativa. Por lo tanto, sufre una fuerza electrostática vertical F_E dirigida hacia el exterior del centro de la esfera. Se necesita una fuerza de origen no electrostático dirigida hacia abajo, F_{NE}, de la misma intensidad que la fuerza ascendente F_E, para mantener esta partícula negativa en reposo en la superficie de la esfera. En esta situación específica, esta fuerza no electrostática se denomina a veces fuerza de contacto. Pero su origen no se comprende claramente. Tampoco sabemos cómo se produce, etc.

Heilbron mencionó la espinosa cuestión del agente que impide que los fluidos eléctricos se escapen de la superficie de los conductores.[17]

La misma situación se produce cuando la esfera conductora está cargada positivamente, figura 14.2 (a). El mismo razonamiento es válido para una esfera aislante uniformemente electrizada, negativa o positivamente, figuras 14.2 (b) y (c).

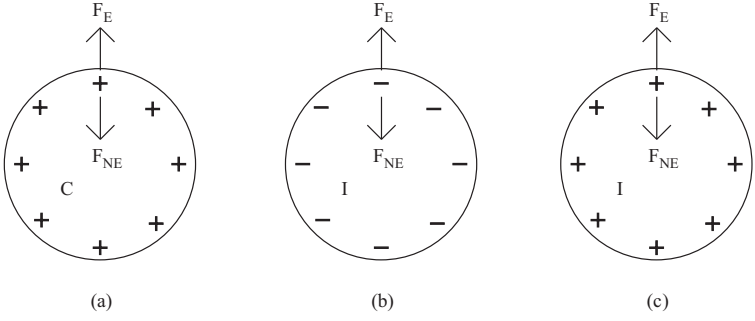


Figura 14.2: (a) Esfera conductora C con carga positiva. (b) Esfera aislante I con carga negativa. (c) Esfera aislante I con carga positiva.

[17] [Hei99, pp. 499–500].

En esta figura, F_E representa la fuerza electrostática neta que actúa sobre la partícula electrizada superior y que se debe a la repulsión electrostática ejercida por las demás partículas electrizadas en la superficie de la esfera en la que se encuentra. Representamos con F_{NE} la fuerza de origen no electrostático que actúa sobre la partícula electrizada superior y la mantiene en reposo en la superficie de la esfera. Cuando la esfera electrizada está en equilibrio, F_{NE} tiene la misma intensidad que F_E, pero apunta en la dirección opuesta.

Otra configuración de equilibrio estable se produce cuando un conductor, aislado del suelo, se polariza debido a la presencia de un cuerpo electrizado cercano. Supongamos que una pajita se carga negativamente después de frotarla con el cabello. Acérquela a un conductor aislado. El conductor se polariza por la pajita electrizada, figura 14.3.

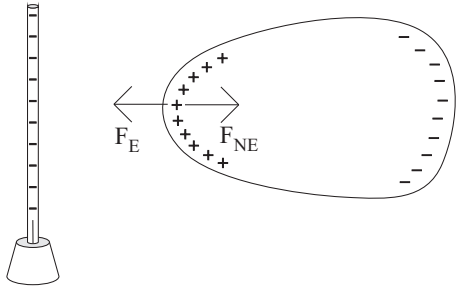


Figura 14.3: Conductor polarizado por una pajita cargada negativamente situada cerca.

En la figura 14.3, representamos con F_E la fuerza electrostática neta que actúa sobre la partícula cargada positivamente situada en el extremo izquierdo del conductor. Esta fuerza se debe a la atracción ejercida por las cargas negativas de la pajita, así como a las fuerzas electrostáticas ejercidas sobre esta partícula por todas las demás partículas cargadas en la superficie de este conductor. En equilibrio, esta partícula permanece en reposo. Este equilibrio solo puede darse en presencia de otra fuerza que actúe sobre esta partícula positiva, es decir, una fuerza de origen no electrostático representada aquí por F_{NE}. En equilibrio, estas dos fuerzas tienen la misma intensidad, pero apuntan en direcciones opuestas.

Consideremos ahora un aislante situado cerca de una pajita cargada negativamente. Cada molécula del aislante se polariza, volviéndose positiva en la zona cercana a la pajita y negativa en la zona alejada de la pajita, figura 14.4 (a).

En la figura 14.4 (b), consideramos una sola molécula de este aislante polarizado, situada en su extremo izquierdo, el más cercano a la pajita. Representamos con F_E y F_{NE} las fuerzas electrostáticas y no electrostáticas netas, respectivamente, que actúan sobre el extremo positivo de esta molécula polarizada. La fuerza electrostática es ejercida por las cargas negativas de la pajita, por el extremo negativo de esta molécula, así como por todas las demás moléculas polarizadas de este aislante. La fuerza electrostática neta F_E apunta hacia la pajita negativa. En equilibrio, el extremo positivo de esta molécula permanece en reposo. Por lo tanto, para equilibrar F_E, necesitamos

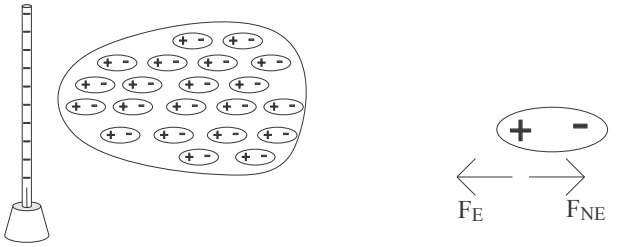


Figura 14.4: (a) Aislante polarizado por una paja negativa cercana. (b) Fuerzas electrostáticas y no electrostáticas, F_E y F_{NE}, que actúan sobre el extremo positivo de una molécula polarizada específica del aislante.

una fuerza de origen no electrostático, F_{NE}. En equilibrio, las dos fuerzas tienen la misma intensidad, pero apuntan en direcciones opuestas.

En otras palabras, para impedir el movimiento de las partículas electrizadas en cuerpos como los de las figuras 14.1 y 14.2, necesitamos fuerzas no electrostáticas que se opongan a la fuerza de Coulomb. También necesitamos fuerzas no electrostáticas para los conductores o aislantes que están polarizados debido a la presencia de cuerpos electrizados cercanos, como en las figuras 14.3 y 14.4. Sin la presencia de estas fuerzas no electrostáticas, sería imposible mantener cuerpos electrizados y/o polarizados en configuraciones de equilibrio estable.

Existen algunas situaciones en las que no actúa ninguna fuerza electrostática neta sobre todas las partículas de un sistema de cargas. Ilustramos un ejemplo en la figura 14.5.

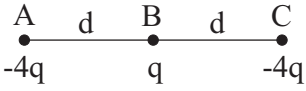


Figura 14.5: Las partículas A, B y C están separadas por una distancia d a lo largo de la línea recta que las une. Las partículas A y C tienen una carga de $-4q$, mientras que la partícula B tiene una carga de q.

Supongamos tres partículas puntuales A, B y C separadas por una distancia d a lo largo de una línea recta. Las partículas A y C están igualmente electrizadas con una carga de $-4q$, mientras que la partícula B está electrizada con una carga de q. Las fuerzas electrostáticas que actúan sobre estas partículas se representan en la figura 14.6.

La parte izquierda de la figura 14.6 muestra la fuerza repulsiva F_{CA} ejercida por C sobre A y la fuerza atractiva F_{BA} ejercida por B sobre A. Según la ley de Coulomb, estas dos fuerzas se anulan mutuamente. El centro de la figura 14.6 muestra la fuerza de atracción F_{AB} ejercida por A sobre B y la fuerza de atracción F_{CB} ejercida por C sobre B. Según la ley de Coulomb, estas dos fuerzas se anulan mutuamente. La parte derecha de la figura 14.6 ilustra la fuerza de atracción F_{BC} ejercida por B sobre C

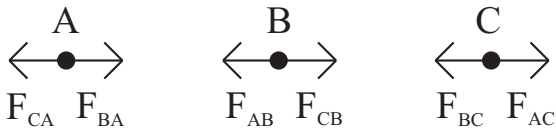


Figura 14.6: Fuerzas electrostáticas que actúan sobre las partículas.

y la fuerza de repulsión F_{AC} ejercida por A sobre C. Una vez más, según la ley de Coulomb, estas dos fuerzas se anulan mutuamente.

En principio, estas tres partículas podrían permanecer en reposo en un sistema de referencia inercial, ya que no hay ninguna fuerza neta que actúe sobre cada una de ellas, figura 14.6. Por lo tanto, podría parecer que las fuerzas no electrostáticas no son necesarias en este caso. Sin embargo, el equilibrio de este sistema es inestable. Este hecho se puede ilustrar con la figura 14.7, en la que la partícula B se desplazó ligeramente hacia la derecha, más cerca de C que de A.

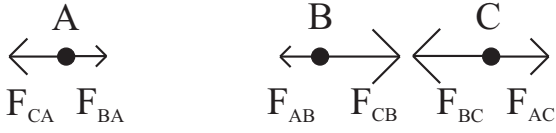


Figura 14.7: Las fuerzas electrostáticas que actúan sobre las partículas cuando B se aproxima a C.

Cuando la partícula B se acerca a C por cualquier motivo, la fuerza de atracción entre ellas aumenta en intensidad. Del mismo modo, la fuerza de atracción entre A y B disminuye en intensidad, debido a la mayor distancia entre estas partículas. Por lo tanto, la fuerza neta que actúa sobre B apunta ahora hacia C. Por la misma razón, la fuerza neta que actúa sobre C apunta hacia B. La fuerza neta que actúa sobre A apunta ahora hacia la izquierda, es decir, lejos del par *BC*. Supongamos que estas partículas son libres de moverse bajo la acción de estas fuerzas eléctricas que actúan sobre ellas, comenzando con la configuración de la figura 14.6. Si una perturbación externa hace que B se desplace ligeramente hacia C, estas dos partículas comenzarán a acercarse entre sí. La partícula A, por el contrario, se alejará del par *BC*. Este sistema de partículas se alejará entonces de la configuración inicial de equilibrio.

En otras palabras, aunque la configuración de la figura 14.5 representa un equilibrio, este es inestable. Cualquier perturbación en este sistema lo romperá. Este ejemplo ilustra el teorema de Earnshaw. Por lo tanto, para mantener este sistema de tres partículas en equilibrio estable, necesitamos de nuevo fuerzas de origen no electrostático.

El cloruro de sodio o sal de cocina es un compuesto iónico típico en equilibrio estable. Tiene una estructura cristalina cúbica compuesta por iones de sodio y cloruro, Na^+ y Cl^-. Se necesitan fuerzas no electrostáticas para equilibrar las fuerzas coulómbicas que actúan sobre los iones.

14.3 Fuerzas no electrostáticas en el efecto del ámbar

También se necesitan fuerzas de origen no electrostático para separar partículas de cargas opuestas, como en el efecto del ámbar. Antes de examinar este efecto, recordemos la acción de la fuerza de Coulomb sobre cuerpos de cargas opuestas.

Supongamos un conductor C_1 cargado positivamente con una carga $+Q$, aislado del suelo, y otro conductor C_2 cargado negativamente con una carga $-Q$, también aislado. Cuando se tocan, los dos conductores se neutralizan. Permanecen neutros después de la separación, figura 14.8.

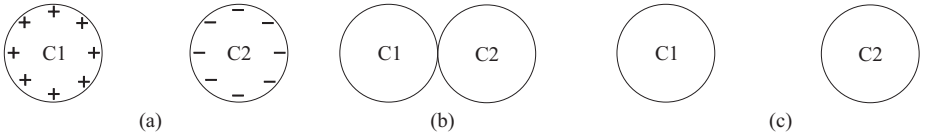


Figura 14.8: (a) Esferas conductoras C_1 y C_2 separadas entre sí y cargadas eléctricamente de forma opuesta. (b) Neutralización de ambas esferas cuando se tocan. (c) Las esferas permanecen neutras tras separarse.

Se realizó un experimento de este tipo en el volumen 1 de esta obra.[18] En ella se utilizaron dos electroscopios cargados de forma opuesta, figura 14.9.

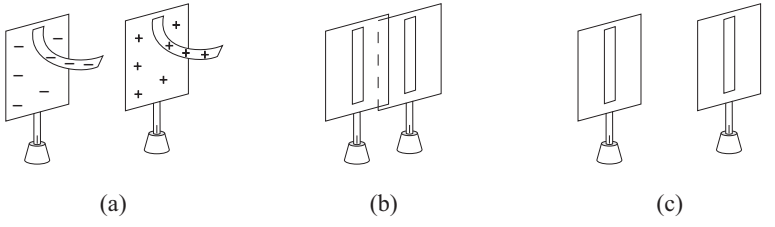


Figura 14.9: (a) Un electroscopio positivo y un electroscopio negativo. (b) Tras el contacto, las tiras caen. (c) Tras la separación, las tiras permanecen verticales, lo que indica que los electroscopios ahora están descargados.

Supongamos ahora un aislante I electrizado en su superficie, como una pajita electrizada negativamente después de haber sido frotada con el cabello o una servilleta de papel. El volumen 1 de esta obra demostró que uno de los procedimientos para neutralizar este aislante consiste en sumergirlo en agua dulce colocada en un recipiente metálico conectado a tierra. Una vez retirada el agua, el aislante queda neutralizado. En otras palabras, ya no atrae los trozos de papel que se encuentran cerca.[19] La figura 14.10 ilustra este procedimiento.

El agua se comporta como un conductor en los experimentos electrostáticos. Contiene partículas electrizadas libres (iones cargados, H_3O^+, OH^- y muchas otras impurezas electrizadas) que pueden desplazarse en el agua. Cuando todas las partes de la

[18] Sección 6.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].
[19] Sección 7.14 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] y [Ass17].

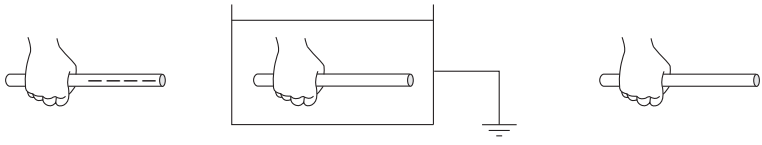


Figura 14.10: (a) Una pajita de plástico tiene carga negativa. (b) Se sumerge en agua dulce colocada en un recipiente metálico conectado a tierra. (c) Es neutra cuando se saca del agua.

pajita electrizada entran en contacto con el agua circundante, la pajita se neutraliza. Las cargas que estaban distribuidas por su superficie ahora se distribuyen por el líquido. Como el agua utilizada en este experimento está conectada a tierra, estas cargas netas se distribuyen por toda la Tierra. Cuando la pajita sale del agua, observe que está neutra. Ya no es capaz de atraer los trozos de papel que se acercan a ella.

Este procedimiento muestra que para neutralizar un aislante electrizado en toda su superficie, se puede sumergir en un conductor como el agua, conectando así a tierra todos los puntos situados en la superficie del aislante.

Supongamos ahora dos cuerpos aislantes A y B electrizados con cargas opuestas $+Q$ y $-Q$ distribuidas por sus superficies. Estas cargas no pueden desplazarse libremente a lo largo de estos cuerpos, ya que son aislantes. Por lo tanto, para neutralizarlas, habría que poner en contacto todos sus puntos de carga opuesta. Lo que se va a describir a continuación es una suposición de lo que podría ocurrir en esta situación ideal. La figura 14.11 ilustra cualitativamente este proceso hipotético de neutralización de dos aislantes electrizados de forma opuesta con cargas distribuidas por sus superficies. No realizamos experimentos reales en los que hayamos logrado la neutralización de estos dos cuerpos mediante el proceso descrito en la figura 14.11.

La figura 14.11 (a) muestra el aislante A con tres cargas positivas situadas en los puntos A_1, A_2 y A_3 de su superficie, mientras que el aislante B tiene tres cargas negativas situadas en los puntos B_1, B_2 y B_3 de su superficie. En (b), los puntos A_1 y B_3 se tocan, neutralizando estos puntos. En (c), los puntos A_2 y B_2 se tocan, neutralizando estos puntos. En (d), los puntos A_3 y B_1 se tocan, neutralizando estos puntos. Obtenemos dos aislantes neutros cuando están separados entre sí, figura 14.11 (e). La figura 14.11 (f) muestra la fuerza electrostática F_E que atrae a las partículas de cargas opuestas cuando están cerca unas de otras.

Ahora vamos a examinar el efecto del ámbar. La separación de cargas que se produce en este efecto se opone a la acción de la fuerza de Coulomb.

En el efecto del ámbar, lo que ocurre es exactamente lo contrario del proceso representado en la figura 14.11. Supongamos dos aislantes A y B hechos de materiales diferentes e inicialmente neutros. Frote ambos vigorosamente uno contra otro con una velocidad relativa V. Tras la separación, uno de ellos se carga positivamente con una carga $+Q$, mientras que el otro aislante se carga negativamente con una carga $-Q$. La figura 14.12 ilustra el efecto del ámbar.

No hay fuerzas electrostáticas entre dos partículas neutras, mientras que dos partículas con cargas opuestas se atraen mutuamente con una fuerza de origen

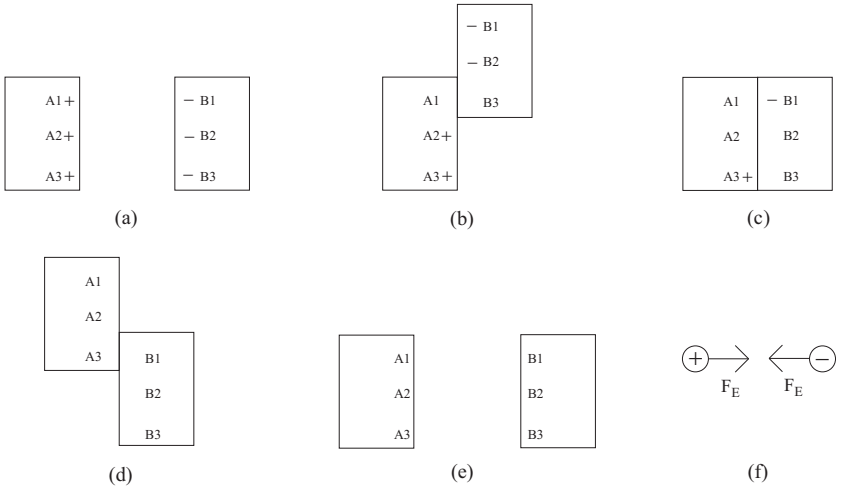


Figura 14.11: (a) Neutralización hipotética de dos aislantes A y B electrizados de forma opuesta. (b) Neutralización de los puntos A_1 y B_3 al entrar en contacto. (c) Neutralización de los puntos A_2 y B_2 al entrar en contacto. (d) Neutralización de los puntos A_3 y B_1 al entrar en contacto. (e) Los aislantes permanecen neutros tras la separación. (f) Fuerzas de atracción electrostáticas, F_E, que actúan entre partículas con carga eléctrica opuesta.

electrostático, F_E. En el efecto del ámbar, comenzamos con dos aislantes neutros y terminamos con dos cuerpos con cargas opuestas. Por lo tanto, esta separación de cargas opuestas solo puede producirse por la acción de una fuerza de origen no electrostático, F_{NE}, que actúa entre las partículas con cargas opuestas mientras están separadas entre sí. Esta fuerza F_{NE} intenta separar las partículas de cargas opuestas, mientras que la fuerza electrostática F_E intenta unirlas. Estos dos tipos de fuerza se representan en la figura 14.12 (f). Además, la amplitud de F_{NE} debe ser mayor que la de F_E mientras estas partículas de cargas opuestas están separadas durante la fricción en el efecto del ámbar.

En conclusión, las fuerzas electrostáticas podrían explicar la hipotética neutralización de los aislantes electrizados de forma opuesta representados en la figura 14.11. Sin embargo, estas fuerzas electrostáticas por sí solas no podrían explicar el efecto del ámbar. Después de todo, comenzamos con dos aislantes neutros y terminamos con aislantes con cargas opuestas, figura 14.12.

Por lo tanto, el efecto del ámbar requiere la existencia de fuerzas de origen no electrostático, F_{NE}. El fenómeno más antiguo y simple de la electricidad requiere la existencia de estas fuerzas, de lo contrario no podría tener lugar.

14.3.1 Otros misterios en el efecto del ámbar

Aunque el efecto del ámbar es el fenómeno más antiguo estudiado en electricidad, aún lo rodean varios misterios. No conocemos exactamente el origen de la fuerza no

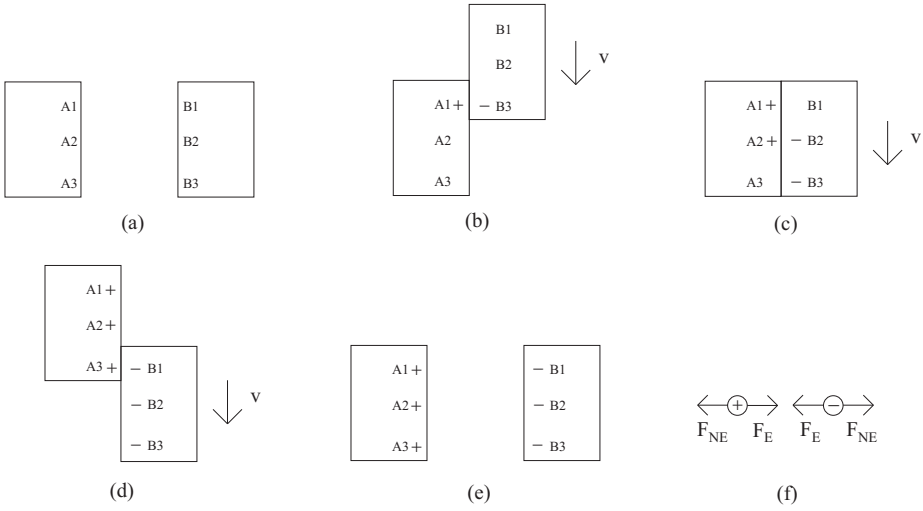


Figura 14.12: Representación cualitativa del efecto del ámbar. (a) Dos aislantes A y B inicialmente neutros. De (b) a (d): debido al roce entre las superficies en interacción, estos dos cuerpos se electrizan con cargas opuestas. (e) Situación final con los dos aislantes cargados de forma opuesta. (f) Fuerzas de atracción electrostáticas, F_E, que actúan entre partículas con cargas opuestas, así como fuerzas de origen no electrostático, F_{NE}, que actúan entre ellas. Estas fuerzas de origen no electrostático son responsables de la separación de las cargas en las situaciones (b) a (d).

electrostática que provoca la separación de las cargas cuando se frotan dos sustancias diferentes entre sí. Tampoco conocemos el origen de la fuerza no electrostática que mantiene las cargas en reposo en la superficie de los cuerpos electrizados o polarizados. Otros aspectos de este efecto también siguen siendo un misterio.

La mayoría de los manuales afirman que se produce una transferencia de electrones entre los dos cuerpos de naturaleza diferente que se frotan en el efecto del ámbar, uno recibiendo electrones y el otro perdiendo estas partículas fundamentales. Sin embargo, aunque la electrización se debe a una transferencia de electrones, el mecanismo responsable de este intercambio de partículas que se produce contra la fuerza de Coulomb no está nada claro.

Además, ¿se debe realmente el efecto del ámbar (o la triboelectrización en general) a una transferencia de electrones? Esta afirmación aparece en los manuales como una declaración general, sin que se cite ningún experimento que la respalde.

Sin embargo, cuando leemos la literatura especializada escrita por científicos que realmente realizan experimentos sobre este tema, nos damos cuenta de que todavía existen muchas dudas e incertidumbres sobre el proceso fundamental de electrización que se produce en el efecto del ámbar. W. R. Harper, en su obra de 1965 titulada *Contact and Frictional Electrification*, declaró lo siguiente:[20,21]

[20] Citado en [Bai01] y [Gal14].

[21] A crucial question for the explanation of the production of static charge is whether the charging of

> Una cuestión crucial para explicar la producción de carga estática es saber si la carga de los aislantes proviene de una transferencia de electrones, de iones o de ambos. Montgomery diría que los portadores de carga son *siempre* electrones y Loeb que son *generalmente* electrones: Henry considera que la cuestión sigue abierta. En mi opinión, ahora se puede dar una respuesta definitiva, a saber, que los portadores *nunca* son electrones cuando el material cargado es estrictamente un aislante.

No sé la respuesta a esta pregunta. Me limitaré a citar aquí algunas referencias que tratan este tema desde un punto de vista experimental.[22]

14.4 Fuerzas no electrostáticas que actúan en el interior de una batería

En 1800, Volta publicó su invento de la pila eléctrica o batería.[23] Disponía los discos en el siguiente orden, de abajo hacia arriba: plata, zinc, disco de cartón humedecido; plata, zinc, disco de cartón humedecido; plata, zinc, disco de cartón humedecido; etc. Al conectar la plata inferior con el zinc superior mediante un alambre metálico, observó que circulaba una corriente constante por el hilo.

La figura 14.13 ilustra esquemáticamente la pila química o batería.

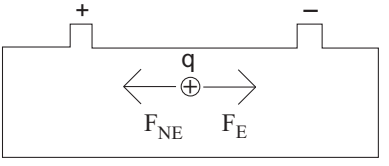


Figura 14.13: Batería cargada que contiene un ion positivo y móvil q.

La batería tiene un terminal positivo $+$ y un terminal negativo $-$. También dibujamos una partícula electrizada con una carga q dentro de la batería. Representa un ion que puede moverse dentro de la batería, es decir, una partícula electrizada móvil. Supongamos que q es positivo. Entonces existe una fuerza electrostática F_E que actúa sobre ella y que apunta desde el terminal positivo hacia el terminal negativo. Esta fuerza electrostática tiende a descargar la batería. En otras palabras, si actuara sola, la partícula positiva q se desplazaría hacia el terminal negativo de la batería, neutralizándola. Sin embargo, es posible mantener una batería cargada durante varios días cuando sus terminales no están conectados por un alambre metálico. Por lo tanto, en esta situación de equilibrio en la que la batería permanece electrizada, a pesar de la presencia de iones móviles en su interior, es necesaria una fuerza de origen no electrostático, F_{NE}. Cuando no circula corriente por la batería, estas dos fuerzas que actúan

insulators comes from a transfer of electrons, of ions, or of both. Montgomery would say that the carriers of charge are *always* electrons and Loeb that they are *generally* electrons: Henry feels that the question is still an open one. I am of the opinion that a definite answer can now be given which is that the carriers are *never* electrons—when the material being charged is strictly an insulator.

[22] [Bai01], [Sch07], [MWW07], [MW08], [LB08], [LB09], [Wil12], [Gal14] y [GB17].

[23] [Vol00a], [Vol00b], [Vol64], [Mag06] y [MA08].

simultáneamente sobre el ion, F_E y F_{NE}, tienen la misma intensidad pero apuntan en direcciones opuestas, figura 14.13.

Hay otra situación que muestra la necesidad de una fuerza de origen no electrostático dentro de una batería, concretamente cuando se está cargando o electrizando. Coloque ácido sulfúrico diluido en un recipiente aislante. Este ácido es eléctricamente neutro en su conjunto, aunque contiene muchos iones móviles positivos y negativos. Consideremos dos láminas o placas neutras, una de zinc y otra de cobre. La placa de zinc se sumerge parcialmente en el ácido en un extremo del recipiente, mientras que la placa de cobre se sumerge parcialmente en el otro extremo. Este sencillo proceso electriza estas dos placas de forma opuesta. El zinc se electriza negativamente, mientras que el cobre se electriza positivamente. Esta separación de cargas solo puede producirse gracias a la acción de una fuerza no electrostática. Después de todo, las fuerzas electrostáticas tienden a neutralizar los cuerpos con cargas opuestas. En este ejemplo concreto, sin embargo, partimos de dos cuerpos diferentes, el zinc y el cobre, inicialmente neutros. Al final del proceso, uno de ellos tiene carga positiva, mientras que el otro tiene carga negativa. Este mecanismo de carga no se intensifica indefinidamente. Alcanzamos un valor de saturación en el que existe una diferencia de potencial constante entre las placas de zinc y cobre. Durante el intervalo de tiempo en el que la diferencia de potencial pasó de cero a este valor de saturación, la fuerza de origen no electrostático que separaba las cargas opuestas tenía una magnitud superior a la fuerza electrostática que tendía a unirlas.

Por lo tanto, las fuerzas de origen no electrostático también actúan en las reacciones químicas que se producen en los electrodos de una pila eléctrica o una batería.

14.5 Fuerzas no electrostáticas en circuitos que transportan corrientes continuas

Cuando se conecta un alambre metálico resistivo a los dos terminales de una batería, circula una corriente eléctrica constante por el circuito cerrado, tal y como se indica en la sección 3.4. Según la ley de Ohm, el voltaje o diferencia de potencial entre los extremos del alambre es proporcional a su resistencia y a la corriente eléctrica que lo atraviesa. Esta ley también se puede expresar de forma microscópica. Un metal tiene electrones libres que pueden moverse con respecto a la red cristalina del metal. Según la versión microscópica de la ley de Ohm, la fuerza eléctrica que actúa sobre un electrón libre móvil se equilibra con una fuerza resistiva cuando una corriente constante circula por el circuito. Esta fuerza resistiva es proporcional a la velocidad del electrón de conducción con respecto a la red cristalina del metal. Las fuerzas eléctrica y resistiva actúan en direcciones opuestas. Tienen la misma intensidad cuando una corriente constante circula por el circuito.

La fuerza eléctrica se debe a la ley de Coulomb. Actúa sobre todos los electrones libres, siendo ejercida por una distribución de cargas situadas en la superficie del alambre resistivo. La densidad superficial de estas cargas varía a lo largo del alambre resistivo, aunque es constante en el tiempo para corrientes estables. La fuerza eléctrica impulsa al electrón libre, creando así la corriente eléctrica.

La fuerza resistiva que actúa sobre cualquier electrón libre, por el contrario, tiene un origen no electrostático. Es proporcional a la velocidad de deriva del electrón con respecto a la red cristalina del metal. La intensidad de esta fuerza aumenta cuando aumenta la velocidad del electrón libre. Poco después de conectar el alambre a la batería, el electrón libre alcanza una velocidad constante. En esta situación estable, la fuerza de resistencia tiene la misma amplitud que la fuerza eléctrica, y ambas fuerzas actúan en direcciones opuestas. Esta fuerza de resistencia impide la aceleración indefinida del electrón libre ejercida por la fuerza eléctrica.

También existe una fuerza de origen no electrostático que actúa sobre las cargas negativas móviles situadas en el interior de la batería. Esta fuerza las impulsa desde el terminal positivo de la batería hacia el terminal negativo. La fuerza electrostática que actúa sobre una partícula negativa situada en el interior de la batería, por el contrario, apunta desde el terminal negativo hacia el terminal positivo.

Estos temas se trataron en detalle en nuestra obra titulada *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents.*[24]

14.6 Fuerzas no electrostáticas en otras situaciones

Existen otros mecanismos en los que comenzamos con dos cuerpos neutros, A y B, y terminamos con A electrizado positivamente y B electrizado negativamente. También hay muchos otros procedimientos en los que comenzamos con un solo cuerpo neutro aislado del suelo y terminamos con ese cuerpo polarizado eléctricamente, es decir, con un lado positivo y otro negativo. En todos estos mecanismos se necesitan fuerzas no electrostáticas. A continuación enumeramos algunos de estos procesos:

- Cuando se ponen en contacto dos metales diferentes, uno de ellos se carga positivamente y el otro negativamente, con una diferencia de potencial entre ellos. Este efecto viene determinado por las diferencias en la función de trabajo entre los metales. Se denomina «efecto Volta», «diferencia de potencial de Volta», «diferencia de potencial externa» o «diferencia de potencial de contacto».[25]

- La electrización por contacto (o tensión de contacto) en general.[26] En el capítulo 5, por ejemplo, abordamos la electrización de las cintas adhesivas.

- Electrización por reacciones químicas. En electroquímica se estudian varios procesos diferentes.

- El efecto termoeléctrico, es decir, la conversión directa de las diferencias de temperatura en voltaje eléctrico. Un dispositivo termoeléctrico crea una diferencia de potencial entre dos lados cuando hay una diferencia de temperatura entre ellos.

[24] [AH07], [AH09] y [AH13].
[25] [Whi73a, pp. 71–73] y [Whi73b, pp. 90 y 235].
[26] [Jef59].

- El efecto piroeléctrico, que no debe confundirse con la termoelectricidad. Algunos cristales generan un voltaje temporal cuando se calientan o se enfrían. Cuando todo el material pasa de una temperatura a otra, aparece un voltaje temporal a través del cristal.

- El efecto piezoeléctrico, es decir, la producción de una diferencia de potencial entre dos caras de un material cuando se comprime o se deforma mecánicamente.

- La electrización por presión, que no debe confundirse con la piezoelectricidad.[27]

- El efecto fotoeléctrico, es decir, la emisión de electrones por un material cuando se proyecta sobre él una luz de frecuencia suficientemente alta, que depende de la sustancia.

- La producción de electretos. Pueden ser monopolares (con una carga total distinta de cero) o dipolares (con una carga total nula, pero con un momento dipolar permanente). Se necesitan fuerzas de origen no electrostático para separar estas cargas y producir los electretos.[28]

- Las fuerzas no electrostáticas son necesarias no solo para producir electretos, sino también para mantener su electrización después de su producción. Estas fuerzas son necesarias para evitar su descarga o neutralización.

- Etc.

En todos estos casos, necesitamos una fuerza de origen no electrostático para producir la polarización de un cuerpo inicialmente neutro, de modo que un lado de dicho cuerpo se vuelva positivo y el otro negativo. También se necesita una fuerza de origen no electrostático para producir la separación de cargas entre dos cuerpos inicialmente neutros, de modo que uno de ellos se vuelva positivo y el otro negativo. También necesitamos una fuerza de origen no electrostático para inducir una corriente a lo largo de un circuito resistivo cerrado, como un anillo.

14.7 Orígenes de las fuerzas no electrostáticas

Creemos que el origen de las fuerzas no electrostáticas mencionadas en las secciones 14.2 a 14.6 no se conoce bien. Estas fuerzas deben existir para producir estos fenómenos. Por otra parte, en nuestra opinión, muchos aspectos relacionados con estas fuerzas aún no se aclararon en numerosas situaciones: sus orígenes, sus expresiones matemáticas, sus propiedades y las magnitudes de las que dependen. Esta falta de conocimientos completos se da incluso en el fenómeno más antiguo de la electrostática, es decir, el efecto del ámbar. Aún no se sabe muy bien qué provoca la separación de las

[27] [Kat06, pp. 15 y 239–246], [BW11] y [WB11].
[28] [Net94], [Sil10b], [Sil10a], [Bos11, capítulo 8, pp. 226–248] y [BAC12, capítulo 19, pp. 373–392].

cargas cuando dos cuerpos se frotan entre sí. Del mismo modo, el mecanismo responsable de la separación de las cargas en ausencia de fricción, como en la electrización por contacto de dos materiales diferentes, no se explicó completamente. Es posible que el mecanismo que interviene en la electrización (por contacto o fricción) de dos tipos de metales (como el cobre y el zinc) sea diferente del mecanismo que interviene en la electrización mutua de un conductor y un aislante (como el cobre y el plástico), o del mecanismo que interviene en la electrización mutua de dos tipos de aislantes (como el plástico y el caucho).

Sin embargo, hay algunos casos en los que conocemos bien el origen y las propiedades de estas fuerzas no electrostáticas. A continuación citamos algunos ejemplos:

- Cuando un conductor abierto, como una barra metálica, se desplaza con respecto a un imán permanente, el conductor puede polarizarse (positivo en un extremo y negativo en el otro). El mismo efecto también puede producirse cuando el conductor abierto se mueve con respecto a un circuito cerrado que transporta una corriente constante.

- Cuando un conductor cerrado, como un anillo, se mueve con respecto a un imán permanente, se puede inducir una corriente eléctrica en el anillo. El mismo efecto también puede producirse cuando el anillo se mueve con respecto a otro circuito cerrado que transporta una corriente constante.

- Supongamos ahora un conductor abierto, como una barra metálica, en reposo con respecto a un circuito cerrado cercano. Cuando una corriente variable circula por el circuito, el conductor puede polarizarse.

- Supongamos ahora un conductor cerrado, como un anillo, en reposo con respecto a un circuito cerrado cercano. Cuando una corriente variable circula por el circuito, se puede inducir una corriente en el anillo.

Existen situaciones más generales en las que disponemos de expresiones matemáticas que describen fuerzas no electrostáticas, a saber:

- La fuerza entre dos imanes.

- La fuerza entre dos conductores que transportan corrientes constantes.

- La fuerza entre un imán y un conductor que transporta una corriente constante.

- La fuerza entre un imán y una partícula electrizada que se mueve con respecto al imán.

- La fuerza entre un circuito cerrado que transporta una corriente constante y una partícula electrizada que se mueve con respecto al circuito.

- La fuerza entre un circuito cerrado que transporta una corriente que varía con el tiempo y una partícula electrizada que está estacionaria o en movimiento con respecto al circuito.

- La fuerza entre dos partículas electrizadas que se mueven una respecto a la otra.

En estas situaciones específicas, dos teorías electromagnéticas principales rivales explican las fuerzas que actúan entre las partículas electrizadas. Estas fuerzas pueden, por ejemplo, polarizar un conductor inicialmente neutro aislado del suelo. También pueden inducir una corriente en un anillo metálico resistivo. Estas dos teorías describen las fuerzas entre las partículas electrizadas no solo cuando están en reposo, sino también cuando se mueven una respecto a la otra. Este movimiento puede ser una velocidad relativa o una aceleración relativa entre estas partículas.

Las siguientes subsecciones presentan brevemente estas dos teorías rivales.

14.7.1 La teoría de Faraday y Maxwell basada en los campos electromagnéticos

La teoría electromagnética que aparece en la mayoría de los manuales fue desarrollada por numerosos autores, entre ellos Michael Faraday, James Clerk Maxwell y Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928).[29] Esta teoría supone que una partícula cargada en movimiento, llamada carga fuente, genera un campo eléctrico y un campo magnético a su alrededor. Estos campos se propagarían por el espacio, generalmente a la velocidad de la luz. Cuando alcanzan otra partícula cargada en movimiento, llamada carga de prueba, estos campos ejercerían una fuerza eléctrica y una fuerza magnética sobre dicha carga de prueba. Uno de los grandes problemas de esta teoría es comprender el significado de estos campos electromagnéticos. En general, este tema no se aborda en los manuales.

Faraday, Maxwell y la mayoría de los manuales presentan varias definiciones del concepto de campo. A veces dicen que es una región del espacio alrededor de la carga fuente. En otras situaciones, afirman que este campo se propaga en el espacio. A veces, definen el campo como una magnitud vectorial que tiene tanto amplitud como dirección. En algunos contextos, mencionan que estos campos transportan momento lineal y energía. También presentan muchas otras definiciones y propiedades diferentes del concepto de campo.

El problema es que estas diferentes definiciones se contradicen entre sí.[30] Por ejemplo, ¿cómo puede propagarse una región del espacio en el espacio? ¿Cómo puede una región del espacio tener amplitud y dirección? El campo gravitatorio, el campo eléctrico y el campo magnético tienen dimensiones diferentes. Por lo tanto, estas tres magnitudes no pueden tener el mismo nombre, «campo», ya que son de naturaleza diferente. Cada una de estas tres magnitudes debería clasificarse en una categoría diferente y recibir un nombre diferente en función de la categoría a la que pertenezca. Existen muchas otras contradicciones entre estas diferentes definiciones del concepto de campo, que no se abordarán aquí.

La expresión matemática de la fuerza ejercida por los campos eléctricos y magnéticos que actúan sobre una carga de prueba se debe esencialmente a los trabajos de Maxwell y Lorentz. Esta expresión de la fuerza también es problemática. En la fuerza

[29] [Far52], [Max54b] y [Lor95].

[30] Como se discute en la sección 2.9 de [Ass13] y en las secciones 3.1 y 3.2 de [Ass14].

magnética, en particular, tenemos la velocidad de la carga de prueba. Sin embargo, el significado de esta velocidad cambia según el científico que presenta esta fuerza magnética. El significado de esta velocidad es diferente, por ejemplo, según los siguientes científicos: Maxwell, J. J. Thomson (1856–1940), O. Heaviside (1850–1925), Lorentz, A. Einstein (1879–1955), etc. Esto nos deja perplejos o desconcertados. ¿La velocidad $\vec{v}$ que aparece en la fuerza magnética es entonces la velocidad de la carga de prueba en relación con qué? Normalmente, los manuales no abordan esta cuestión. Esta ausencia de debate es absurda. Después de todo, solo podemos aplicar esta fuerza cuando comprendemos el marco de referencia con respecto al cual debe entenderse esta velocidad. Además, incluso cuando estos manuales presentan esta velocidad, no se ponen de acuerdo entre ellos en cuanto a su significado. Algunos autores mencionan que es relativa al campo magnético. Otros autores mencionan que debe entenderse con respecto a un sistema de referencia inercial. Algunos autores dicen que es relativa al medio en el que se mueve la carga de prueba. En otras situaciones, afirman que es relativa al detector del campo magnético. Algunos autores mencionan que es relativa a la fuente del campo magnético (como un imán o un alambre conductor de corriente). Etc. Discutimos el significado y el origen de la fuerza magnética que actúa sobre una carga de prueba en otra obra y no entraremos en detalles aquí.[31]

14.7.2 La electrodinámica de Weber basada en la interacción entre partículas electrizadas

Existe otra teoría que explica estos fenómenos sin recurrir a los conceptos de campos eléctricos y magnéticos. Se basa en la interacción directa entre partículas electrizadas. No hay ningún agente intermediario para esta interacción.

Esta teoría se basa esencialmente en las ideas desarrolladas por Isaac Newton, figura 7.12. En su obra *Principia* de 1687, Newton presentó su ley de la gravitación universal.[32] Según Newton, la fuerza entre dos partículas es proporcional al producto de sus masas, varía inversamente al cuadrado de su distancia, actúa a lo largo de la línea recta que une las partículas y sigue el principio de acción y reacción.

Charles Augustin de Coulomb, figura 2.16, obtuvo una expresión análoga que describe la interacción entre dos partículas electrizadas en reposo una con respecto a la otra, como se indica en la sección 14.1. También obtuvo una expresión similar que describe la fuerza entre los polos magnéticos. Es decir, una fuerza proporcional al producto de las intensidades de los polos magnéticos, que varía como la inversa del cuadrado de su distancia, actuando a lo largo de la línea recta que los une y siguiendo el principio de acción y reacción.[33]

Ørsted publicó en 1820 su famoso experimento en el que describía la desviación de una aguja imantada bajo la acción de un alambre recto cercano por el que circulaba una corriente continua, como se menciona en la sección 3.4. André-Marie Ampère, figura 14.14, se vio muy influido por el descubrimiento de Ørsted.

Entre 1820 y 1827, Ampère realizó numerosos experimentos e investigaciones teóricas que demostraron por primera vez la existencia de fuerzas y pares entre alambres

[31] Véase la sección 14.5 de [Ass13] y la sección 15.5 de [Ass14].
[32] [New90a], [New34], [New90], [New08] y [New10].
[33] Sección 2.5 de [Ass13] y [Ass14].

Figura 14.14: André-Marie Ampère (1775–1836).

conductores de corriente. Además, para explicar el descubrimiento de Ørsted, supuso la existencia de corrientes eléctricas microscópicas en el interior de los imanes. Obtuvo una expresión extremadamente importante que daba la fuerza entre dos elementos de corriente. Esta fuerza actúa a lo largo de la línea recta que une los elementos, es proporcional al producto de las intensidades de corriente, varía como la inversa del cuadrado de su distancia y sigue el principio de acción y reacción. Maxwell consideraba la fuerza de Ampère entre los elementos conductores como la fórmula cardinal de la electrodinámica, es decir, su resultado más importante:[34,35]

> El estudio experimental gracias al cual Ampère estableció las leyes de la acción mecánica entre las corrientes eléctricas es uno de los logros más brillantes de la ciencia. El conjunto, teoría y experiencia, parece haber surgido, ya listo y preparado, del cerebro del «Newton de la electricidad». Es perfecto en su forma, de una precisión irreprochable, y se resume en una fórmula a partir de la cual se pueden deducir todos los fenómenos, y que seguirá siendo para siempre la fórmula cardinal de la electrodinámica.

Desgraciadamente, la fuerza de Ampère entre los elementos de corriente no aparece en la mayoría de los manuales modernos sobre electromagnetismo, ya que es desconocida para la mayoría de los científicos. Estos manuales solo presentan la fuerza entre los elementos de corriente debida a H. G. Grassmann (1809–1877). Esta fuerza

[34] [Max54b, article 528, p. 175].

[35] The experimental investigation by which Ampère established the laws of the mechanical action between electric currents is one of the most brilliant achievements in science. The whole, theory and experiment, seems as if it had leaped, full grown and full armed, from the brain of the 'Newton of electricity.' It is perfect in form, and unassailable in accuracy, and it is summed up in a formula from which all the phenomena may be deduced, and which must always remain the cardinal formula of electro-dynamics.

se basa en los trabajos de J.-B. Biot (1774–1862) y F. Savart (1791–1841). Maxwell conocía la fuerza de Grassmann. Comparó la fuerza de Grassmann, la fuerza de Ampère y otras dos expresiones creadas por el propio Maxwell. Tras comparar estas cuatro expresiones, Maxwell llegó a la siguiente conclusión:[36,37]

> 527.] De estas cuatro hipótesis diferentes, la de Ampère es sin duda la mejor, ya que es la única que hace que las fuerzas ejercidas sobre los dos elementos no solo sean iguales y opuestas, sino que también estén alineadas en la línea recta que los une.

Al integrar su fuerza entre dos elementos de corriente alrededor de dos circuitos cerrados, asociada a la hipótesis de corrientes eléctricas microscópicas en el interior de los imanes y también en el interior de la Tierra, Ampère logró explicar cuantitativamente tres tipos de fenómenos, a saber (I) el magnetismo (fuerzas y pares entre imanes, así como los pares y fuerzas entre un imán y la Tierra), (II) la electrodinámica (fuerzas y pares entre los alambres conductores de corriente), y (III) el electromagnetismo (fuerzas y pares entre un imán y un alambre conductor de corriente, así como las fuerzas y pares entre la Tierra y un alambre conductor de corriente). En 1826 publicó su obra principal sobre este tema, disponible en francés, portugués e inglés.[38]

Los trabajos de Newton, Coulomb y Ampère fueron desarrollados por el físico Wilhelm Eduard Weber (1804–1891), figura 14.15.

Las obras completas de Weber se publicaron en seis volúmenes entre 1892 y 1894.[39] Entre 1846 y 1878 escribió ocho memorias importantes bajo el título general *Elektrodynamische Maassbestimmungen* (*Medidas electrodinámicas*).[40] Las principales obras de Coulomb, Ampère y Weber están ahora disponibles en inglés y portugués.[41]

Weber obtuvo una fuerza entre partículas electrizadas que depende únicamente de la distancia entre estas cargas, de la velocidad radial relativa entre ellas y de la aceleración radial relativa entre ellas. Se trata de una fuerza central que actúa a lo largo de la línea recta que une estas dos partículas y que respeta el principio de acción y reacción. Cumple los tres principios de conservación, a saber, el momento lineal, el momento angular y la energía. Con la electrodinámica de Weber, podemos deducir la fuerza de Coulomb y la ley de C. F. Gauss (1777–1855). La ley de Weber también nos permite deducir la fuerza de Ampère entre los elementos de corriente, la ley de los circuitos magnéticos y la ley de inducción de Faraday.

La electrodinámica de Weber no se aborda en los manuales modernos. A pesar de ello, esta teoría suscita un interés creciente desde hace algún tiempo. Este interés está motivado por nuevos experimentos y nuevos resultados teóricos.

---

[36] [Max54b, article 527, p. 174].

[37] 527.] Of these four different assumptions that of Ampère is undoubtedly the best, since it is the only one which makes the forces on the two elements not only equal and opposite but in the straight line which joins them.

[38] [Amp26], [Amp23], [Cha09], [AC11] y [AC15]. Véase también [Ass92a], [Ass94], [BA01], [BA15] y [Ass15a].

[39] [Web92b], [Web92a], [Web93b], [Web94c], [Web93a] y [Web94b].

[40] [Web46], [Web52b], [Web52a], [KW57], [Web64], [Web71], [Web78] y [Web94a].

[41] [Ass22], [AB23]; [AC11], [AC15]; [Ass21a], [Ass21b], [Ass21c], [Ass21d], [Ass24], [Ass25a], [Ass25b], [Ass25c] y [Ass25d].

Figura 14.15: Wilhelm Eduard Weber (1804–1891).

Creo en la electrodinámica de Weber y la considero la formulación más profunda e importante jamás presentada para describir las interacciones entre partículas electrizadas. Trabajo en esta teoría desde que la descubrí.[42]

[42] Véase, por ejemplo, [Wie60], [Wie67], [Whi73a, pp. 201–206], [Ass89], [Ass90a], [Ass90b], [Ass91b], [Ass91a], [Ass92a], [Ass92c], [Ass92b], [AC93], [Ass94], [GA94], [Ass95a], [Ass95c], [Ass95b], [AB95], [AB96], [GV99], [BA01], [ARW02], [Fuk03], [AW03], [ARW04], [AH07], [AH09], [AWW11], [AH13], [AWW14], [BA15] y [Ass15a], así como las referencias citadas en estas obras.

Bibliografía

[AB95] A. K. T. Assis y M. Bueno. Longitudinal forces in Weber's electrodynamics. *International Journal of Modern Physics B*, 9:3689–3696, 1995.

[AB96] A. K. T. Assis y M. A. Bueno. Equivalence between Ampère and Grassmann's forces. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32:431–436, 1996.

[AB23] A. K. T. Assis y L. L. Bucciarelli. *Coulomb's Memoirs on Torsion, Electricity, and Magnetism Translated into English.* Apeiron, Montreal, 2023. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AC93] A. K. T. Assis y R. A. Clemente. The influence of temperature on gravitation. *Il Nuovo Cimento B*, 108:713–716, 1993.

[AC11] A. K. T. Assis y J. P. M. d. C. Chaib. *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica.* Editora da Unicamp, Campinas, 2011.

[AC15] A. K. T. Assis y J. P. M. C. Chaib. *Ampère's Electrodynamics — Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamic Phenomena, Uniquely Deduced from Experience.* Apeiron, Montreal, 2015. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ach96] M. Achilles. *Historische Versuche der Physik nachgebaut und kommentiert.* Wötzel, Frankfurt, 2.ª edición, 1996.

[AH07] A. K. T. Assis y J. A. Hernandes. *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents.* Apeiron, Montreal, 2007. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AH09] A. K. T. Assis y J. A. Hernandes. *A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes*, volumen 73 de *Coleção Acadêmica.* Edusp y Edufal, São Paulo y Maceió, 2009.

[AH13] A. K. T. Assis y J. A. Hernandes. *Elektrischer Strom und Oberflächenladungen: was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahre wußte.* Apeiron,

Montreal, 2013. Traducción al alemán por H. Härtel. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Amp22a] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électrodynamiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74, 1822.

[Amp22b] A.-M. Ampère. Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électrodynamiques que j'ai obtenus au mois de décembre 1821. In A.-M. Ampère, editor, *Recueil d'Observations Électro-dynamiques*, pp. 237–250. Crochard, Paris, 1822. A pesar de la fecha, el volumen del Recueil no se publicó hasta 1823.

[Amp22c] A.-M. Ampère. Exposé sommaire des nouvelles expériences électromagnétiques faites par différens Physiciens, depuis le mois de mars 1821, lu dans la séance publique de l'Académie royale des Sciences, le 8 avril 1822. In A.-M. Ampère, editor, *Recueil d'Observations Électro-dynamiques*, pp. 199–206. Crochard, Paris, 1822. A pesar de la fecha, el volumen del Recueil no se publicó hasta 1823.

[Amp23] A.-M. Ampère. Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience, dans lequel se trouvent réunis les Mémoires que M. Ampère a communiqués à l'Académie royale des Sciences, dans les séances des 4 et 26 décembre 1820, 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 septembre et 21 novembre 1825. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 6:175–387, 1823. A pesar de la fecha, el volumen del Recueil no se publicó hasta 1827.

[Amp26] A.-M. Ampère. *Théorie des Phénomènes Électro-dynamiques, Uniquement Déduite de l'Expérience.* Méquignon-Marvis, Paris, 1826.

[Amp85a] A.-M. Ampère. Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électrodynamiques obtenus au mois de décembre 1821. In J. Joubert, editor, *Collection de Mémoires relatifs a la Physique*, volumen II: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pp. 192–204. Gauthier-Villars, Paris, 1885.

[Amp85b] A.-M. Ampère. Exposé sommaire des nouvelles expériences électromagnétiques faites par différens physiciens, depuis le mois de mars 1821, lu dans la séance publique de l'Académie royale des Sciences, le 8 avril 1822. In J. Joubert, editor, *Collection de Mémoires relatifs a la Physique*, volumen II: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pp. 238–244. Gauthier-Villars, Paris, 1885.

[APZ06] M. S. Amin, T. F. Peterson Jr. y M. Zahn. Advanced Faraday cage measurements of charge and open-circuit voltage using water dielectrics. *Journal of Electrostatics*, 64:424–340, 2006.

[ARW02] A. K. T. Assis, K. Reich y K. H. Wiederkehr. Gauss and Weber's creation of the absolute system of units in physics. *21st Century Science & Technology*, 15(3):40–48, 2002.

[ARW04] A. K. T. Assis, K. Reich y K. H. Wiederkehr. On the electromagnetic and electrostatic units of current and the meaning of the absolute system of units — For the 200th anniversary of Wilhelm Weber's birth. *Sudhoffs Archiv*, 88:10–31, 2004.

[Ass89] A. K. T. Assis. On Mach's principle. *Foundations of Physics Letters*, 2:301–318, 1989.

[Ass90a] A. K. T. Assis. Deriving Ampère's law from Weber's law. *Hadronic Journal*, 13:441–451, 1990.

[Ass90b] A. K. T. Assis. Modern experiments related to Weber's electrodynamics. In U. Bartocci y J. P. Wesley, editores, *Proceedings of the Conference on Foundations of Mathematics and Physics*, pp. 8–22, Blumberg, 1990. Benjamin Wesley Publisher.

[Ass91a] A. K. T. Assis. Can a steady current generate an electric field? *Physics Essays*, 4:109–114, 1991.

[Ass91b] A. K. T. Assis. Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) — Sua vida e sua obra. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 5:53–59, 1991.

[Ass92a] A. K. T. Assis. *Curso de Eletrodinâmica de Weber*. Setor de Publicações do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP, Campinas, 1992. Notas de Física IFGW Número 5. https://www.ifi.unicamp.br/~assis y https://www.bibliotecadigital.unicamp.br/bd/index.php/detalhes-material/?code=60362.

[Ass92b] A. K. T. Assis. On forces that depend on the acceleration of the test body. *Physics Essays*, 5:328–330, 1992.

[Ass92c] A. K. T. Assis. On the mechanism of railguns. *Galilean Electrodynamics*, 3:93–95, 1992.

[Ass94] A. K. T. Assis. *Weber's Electrodynamics*. Kluwer, Dordrecht, 1994. Este libro ya está disponible en Springer. Doi: 10.1007/978-94-017-3670-1 y https://www.springer.com/gp/book/9780792331377.

[Ass95a] A. K. T. Assis. Acceleration dependent forces: reply to Smulsky. *Apeiron*, 2:25, 1995.

[Ass95b] A. K. T. Assis. A eletrodinâmica de Weber e seus desenvolvimentos recentes. *Ciência e Natura*, 17:7–16, 1995.

[Ass95c] A. K. T. Assis. Weber's force versus Lorentz's force. *Physics Essays*, 8:335–341, 1995.

[Ass10a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. Apeiron, Montreal, 2010. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass10b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Apeiron, Montreal, 2010. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass10c] A. K. T. Assis. Wilhelm Weber's works translated into English. *21st Century Science & Technology*, 22(4):67–69, 2010.

[Ass11] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011.

[Ass13] A. K. T. Assis. *Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional*. Apeiron, Montreal, 2013. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass14] A. K. T. Assis. *Relational Mechanics and Implementation of Mach's Principle with Weber's Gravitational Force*. Apeiron, Montreal, 2014. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass15a] A. K. T. Assis. *Eletrodinâmica de Weber: Teoria, Aplicações e Exercícios*. Editora da Unicamp, Campinas, 2.ª edición, 2015. https://www.ifi.unicamp.br/~assis y https://editoraunicamp.com.br/catalogo/?id=1718.

[Ass15b] A. K. T. Assis. *Экспериментальные и Исторические Основы Электричества*. Apeiron, Montreal, 2015. Traducido por A. Baraov a partir de la versión inglesa. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass17] A. K. T. Assis. *I Fondamenti Sperimentali e Storici dell'Elettricità*. Associazione per l'Insegnamento della Fisica, Parma, 2017. La Fisica nella Scuola, Anno L, n. 2 Supplemento, Quaderno 26. Traducido por P. Cerreta, A. Cerreta y R. Cerreta. Editado por P. Cerreta, R. Serafini y R. Urigu. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass18a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*, volumen 2. Apeiron, Montreal, 2018. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass18b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, volumen 2. Apeiron, Montreal, 2018. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass19] A. K. T. Assis. *Экспериментальные и Исторические Основы Электричества*, volumen 2. Apeiron, Montreal, 2019. Traducido por A. Baraov a partir de la versión inglesa. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass22] A. K. T. Assis. *Tradução Comentada das Principais Obras de Coulomb sobre Eletricidade e Magnetismo*. Apeiron, Montreal, 2022. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass21a] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 1: *Gauss and Weber's Absolute System of Units*. Apeiron, Montreal, 2021. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass21b] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 2: *Weber's Fundamental Force and the Unification of the Laws of Coulomb, Ampère and Faraday*. Apeiron, Montreal, 2021. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass21c] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 3: *Measurement of Weber's Constant* c, *Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity*. Apeiron, Montreal, 2021. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass21d] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 4: *Conservation of Energy, Weber's Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation*. Apeiron, Montreal, 2021. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass24] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 5: *Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories*. Apeiron, Montreal, 2024. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass25a] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volumen 1: *Biografia, Magnetismo, Indução Unipolar, e o Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber*. Apeiron, Montreal, 2025. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass25b] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volumen 2: *A Força de Weber e a Unificação das Leis de Coulomb, Ampère e Faraday*. Apeiron, Montreal, 2025. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass25c] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volumen 3: *Medição da Constante* c *de Weber, Diamagnetismo, a Equação do Telégrafo, e a Propagação de Ondas Elétricas na Velocidade da Luz*. Apeiron, Montreal, 2025. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass25d] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volumen 4: *Conservação da Energia, o Modelo Planetário de Weber para o Átomo, a Unificação do Eletromagnetismo com a Gravitação, e a Eletrodinâmica de Weber Contra as Teorias de Campo*. Apeiron, Montreal, 2025. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AW03] A. K. T. Assis y K. H. Wiederkehr. Weber citando Maxwell. *Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft*, 40:53–74, 2003.

[Ass26a] A. K. T. Assis. *Les Fondements Expérimentaux et Historiques de l'Électricité*, volumen 1. Apeiron, Montreal, 2026. Traducido por John Plaice. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Ass26b] A. K. T. Assis. *Les Fondements Expérimentaux et Historiques de l'Électricité*, volumen 2. Apeiron, Montreal, 2026. Traducido por John Plaice. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[AWW11] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr y G. Wolfschmidt. *Weber's Planetary Model of the Atom*, volumen 19 de *Nuncius Hamburgensis — Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften*. Tredition Science, Hamburg, 2011. Editado por G. Wolfschmidt.

[AWW14] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr y G. Wolfschmidt. *O Modelo Planetário de Weber para o Átomo*. Apeiron, Montreal, 2014. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[BA01] M. d. A. Bueno y A. K. T. Assis. *Inductance and Force Calculations in Electrical Circuits*. Nova Science Publishers, Huntington, New York, 2001.

[BA15] M. Bueno y A. K. T. Assis. *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos*. Apeiron, Montreal, 2.ª edición, 2015. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[BAC12] S. L. B. Boss, A. K. T. Assis y J. J. Caluzi. *Stephen Gray e a Descoberta dos Condutores e Isolantes: Tradução Comentada de Seus Artigos sobre Eletricidade e Reprodução de Seus Principais Experimentos*. Editora Cultura Acadêmica da Unesp, São Paulo, 2012. https://www.ifi.unicamp.br/~assis y https://www.culturaacademica.com.br/catalogo/stephen-gray-e-a-descoberta-dos-condutores-e-isolantes/.

[Bai01] A. G. Bailey. The charging of insulator surfaces. *Journal of Electrostatics*, 51–52:82–90, 2001.

[BC07] S. L. B. Boss y J. J. Caluzi. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:635–644, 2007.

[Bea96] W. Beaty. Sticky electrostatics. https://www.amasci.com/emotor/sticky.html, 1996.

[Beu92] G. Beuermann. "Sie schwänzen aber jetzt schon, bis es blitzt und donnert" - Physik - Lichtenbergs Leidenschaft. *Physikalische Blätter*, 48:440–444, 1992.

[BGP16] T. A. L. Burgo, F. Galembeck y G. H. Pollack. Where is water in the triboelectric series? *Journal of Electrostatics*, 80:30–33, 2016. Doi: 10.1016/j.elstat.2016.01.002.

[BJ92] P. Brix y U. Joost. Mit weningen Worten viel sagen — Georg Christoph Lichtenberg zum 250. Geburtstag. *Physikalische Blätter*, 48:437–439, 1992.

[Blo82] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820–1827)*. Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.

[Bos07] T. H. S. Bossa *et al.*, 2007. Estudo da condutividade elétrica de vidros isoladores de linhas de transmissão HVDC dopados. In: Congresso da Academia Trinacional de Ciências, II, Foz do Iguaçu, PR, Brazil. https://www.foz.unioeste.br/~lamat/publicvidros/condutivc3n2007.pdf.

[Bos11] S. L. B. Boss. *Tradução comentada de artigos de Stephen Gray (1666–1736) e reprodução de experimentos históricos com materiais acessíveis - subsídios para o ensino do eletricidade*. Doctorado en Educación de la Ciencia, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, SP, Brazil, 2011. Supervisores: J. J. Caluzi y A. K. T. Assis. https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[BW10] C. Blondel y B. Wolff. L'électricité de pression de Haüy et l'électricité de frottement font cause commune. https://www.ampere.cnrs.fr/labo/, 2010.

[BW11] C. Blondel y B. Wolff. Créer de l'électricité avec le magnétisme? La découverte de l'induction. https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2011.

[BW12a] C. Blondel y B. Wolff. La loi d'Ohm: la délicate genèse d'une loi "simple". https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2012.

[BW12b] C. Blondel y B. Wolff. Teinturiers et tubes de verre: Gray et Dufay. https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2012.

[BW12c] C. Blondel y B. Wolff. Un phénomène plus complexe qu'il n'y paraît: l'attraction des corps légers ou d'un filet d'eau. https://www.ampere.cnrs.fr/labo/, 2012.

[BW13] C. Blondel y B. Wolff. La proportionnalité de la force électrique aux charges: définition ou loi expérimentale? https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2013.

[CA08] J. Camillo y A. K. T. Assis. Construção de um gerador eletrostático gotejante: chuva elétrica de Kelvin. *A Física na Escola*, 9:29–32, 2008. Vídeo que muestra la chispa producida en este dispositivo, disponible en

https://www.ifi.unicamp.br/~assis y https://www.youtube.com/watch?v=X7WPSQMtiU0.

[Cam06] J. Camillo. Geradores eletrostáticos: esfera de enxofre de Otto von Guericke e chuva elétrica de Kelvin. Tesis de fin de carrera realizada en el Instituto de Física de la Universidad de Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. https://www.ifi.unicamp.br/~assis y https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2006/JulianoC-Assis_F809_RFcompleto.pdf, 2006.

[Cer14a] P. Cerreta, 2014. Esperimenti di elettrostatica. https://www.scienzaviva.it/Esperimenti_elettrostatica_2014.php.

[Cer14b] P. Cerreta. *Il pendolino, il versorium e l'elettroscopio*, pp. 53–56. Associazione per l'Insegnamento della Fisica, Perugia, 2014. Supplemento al n. 3/2015 LFnS, Atti del LIII Congresso Nazionale AIF.

[Cer17] P. Cerreta, 2017. Rubbing. Electroscopes and Conductors. Vidéo de l'edición 2017 de *Science on Stage*, Debrecen, Hungría. https://www.scienzaviva.it/video_15.php.

[Cha09] J. P. M. d. C. Chaib. *Análise do Significado e da Evolução do Conceito de Força de Ampère, juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica.* Tesis doctoral, Universidad de Campinas — UNICAMP, Campinas, Brazil, 2009. Supervisor: A. K. T. Assis. https://www.ifi.unicamp.br/~assis y http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/435449.

[Chi54] R. A. Chipman. An unpublished letter of Stephen Gray on electrical experiments, 1707–1708. *Isis*, 45:33–40, 1954.

[Coh66] I. B. Cohen. *Franklin and Newton: An Inquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity as an Example Thereof.* Harvard University Press, Cambridge, 1966.

[Coh96] I. B. Cohen. *Benjamin Franklin's Science.* Harvard University Press, Cambridge, 1996.

[Cou88a] C. A. Coulomb. Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme. Construction et usage d'une balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal, d'avoir une force de réaction de torsion proportionelle à l'angle de torsion. Détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les élémens des corps électrisés du même genre d'électricité, se repoussent mutuellement. *Mémoires de l'Académie royale des Sciences. Année 1785*, 88:569–577, 1788. Publicado en 1788. Reimpreso in A. Potier (ed.), *Collection de Mémoires relatifs a la Physique*, volumen 1: *Mémoires de Coulomb*, pp. 107–115 (Gauthiers-Villars, Paris, 1884).

[Cou88b] C. A. Coulomb. Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme. Où l'on détermine, suivant quelles loix le fluide magnétique, ainsi que le fluide électrique, agissent, soit par répulsion, soit par attraction. *Mémoires de l'Académie royale des Sciences. Année 1785*, 88:578–611, 1788. Publicado en 1788. Reimpreso en A. Potier (ed.), *Collection de Mémoires relatifs a la Physique*, volumen 1: *Mémoires de Coulomb*, pp. 116–146 (Gauthiers-Villars, Paris, 1884).

[Cou35] A. Coulomb. First memoir on electricity and magnetism. In W. F. Magie, editor, *A Source Book in Physics*, pp. 408–413, New York, 1935. McGraw-Hill. Traducción parcial de la publicación original (1788) al francés.

[CS02] R. W. Chabay y B. A. Sherwood. *Matter & Interactions*, volumen 2: Electric and Magnetic Interactions. Wiley, New York, 2002.

[Des76] A. P. Deschanel. *Elementary Treatise on Natural Philosophy*. D. Appleton and Co., New York, 1876. Traducido por J. D. Everett.

[DF33a] C. F. d. C. Du Fay. Premier mémoire sur l'électricité. Histoire de l'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 23–35, 1733.

[DF33b] C. F. d. C. Du Fay. Quatriéme mémoire sur l'électricité. De l'attraction et répulsion des corps électriques. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 457–476, 1733.

[DF33c] C. F. d. C. Du Fay. Second mémoire sur l'électricité. Quels sont les corps qui sont susceptibles d'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 73–84, 1733.

[DF34a] C. F. d. C. Du Fay. A letter from Mons. Du Fay, F. R. S. and of the Royal Academy of Sciences at Paris, to His Grace Charles Duke of Richmond and Lenox, concerning electricity. Translated from the French by T. S. M D. *Philosophical Transactions*, 38:258–266, 1733–1734.

[DF34b] C. F. d. C. Du Fay. Cinquiéme mémoire sur l'électricité. Où l'on rend compte des nouvelles découvertes sur cette matiére, faites depuis peu par M. Gray; et où l'on examine quelles sont les circonstances qui peuvent apporter quelque changement à l'électricité pour l'augmentation ou la diminution de la force, comme la tempèrature de l'air, le vuide, l'air comprimé, etc. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 341–361, 1734.

[Ear42] S. Earnshaw. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 7:97–114, 1842.

[Egu25] M. Eguchi. On the permanent electret. *Philosophical Magazine*, 49:178–192, 1925.

[Far38] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Eleventh series. *Philosophical Transactions*, 128:1–40, 1838. Read December 21, 1837. Reimpreso en *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), volumen 45: Lavoisier, Fourier, Faraday, pp. 440–467, paragraphes 1161–1317.

[Far43a] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Eighteenth series. *Philosophical Transactions*, 133:17–32, 1843. Read February 2, 1843. Reimpreso en *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), volumen 45: Lavoisier, Fourier, Faraday, pp. 584–594, paragraphes 2075–2145.

[Far43b] M. Faraday. On static electrical inductive action. *Philosophical Magazine*, 22:200–204, 1843. Reimpreso en *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (editor), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), volumen 45: Lavoisier, Fourier, Faraday, pp. 848–850.

[Far52] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*, volumen 45, pp. 253–898 of *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952.

[Fer78] N. C. Ferreira. Proposta de Laboratório para a Escola Brasileira — Um Ensaio sobre a Instrumentalização no Ensino Médio de Física. Tesis de maestría, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 1978.

[Fer00] G. F. L. Ferreira. Há 50 anos: o efeito Costa Ribeiro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22:434–443, 2000.

[Fer01a] N. C. Ferreira. Acende aqui, apaga ali. *Ciência Hoje na Escola*, 12:65–67, 2001.

[Fer01b] N. C. Ferreira. Faça como Gilbert: construa uma bússola de declinação. *Ciência Hoje na Escola*, 12:21–22, 2001.

[Fer01c] N. C. Ferreira. Magnetismo e eletricidade. *Ciência Hoje na Escola*, 12:14–17, 2001.

[Fer01d] N. C. Ferreira. O versorium. *Ciência Hoje na Escola*, 12:18–20, 2001.

[Fer06] N. Ferreira. *Equilíbrio*. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino, Instituto de Física, USP., São Paulo, Brazil, 2006. http://web.archive.org/web/20140815044834/http://www.cienciamao.usp.br/tudo/indice.php?midia=rip.

[Fersda] N. Ferreira, [s.d.]. *Mecânica*. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.

[Fersdb] N. Ferreira, [s.d.]. *Eletrostática*, volumen 1. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.

[Fersdc] N. Ferreira, [s.d.]. *Eletrostática*, volumen 2. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.

[Fersdd] N. C. Ferreira, [s.d.]. Construa sua própria bússola! http://chc.org.br/acervo/construa-sua-propria-bussola/.

[FLS64] R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics*. Addison-Wesley, Reading, 1964. volumen 2: *Mainly Electromagnetism and Matter*.

[FM91] N. Ferreira y J.-P. Maury. *Plus et Moins, les Charges Électriques. Qu'est-ce que c'est?* Ophrys, Paris, 1991.

[FPsd] D. Frerichs y S. Pfeiler, [s.d.]. Historische Einführung in die Elektrostatik. https://www.physikalische-schulexperimente.de/physo/Historische_Einf%C3%BChrung_in_die_Elektrostatik#cite_ref-1.

[FR08] N. C. Ferreira y E. M. d. F. Ramos. *Cadernos de Instrumentação para o Ensino de Física: Eletrostática*. Unesp, Rio Claro, 2008. Coleção Ludoteca, volumen 1.

[Fra69] B. Franklin. *Experiments and Observations on Electricity, Made at Philadelphia in America*. David Henry, London, 1769.

[Fra04] B. Franklin. *The Works of Benjamin Franklin*. G. P. Putnam's Sons, 1904. 12 volúmenes.

[Fra41] B. Franklin. *Benjamin Franklin's Experiments — A new edition of Franklin's Experiments and Observations on Electricity*, I. B. Cohen (editor). Harvard University Press, Cambridge, 1941.

[Fra81] O. I. Franksen. *H. C. Ørsted — A Man of the Two Cultures*. Strandbergs Forlag, Birkerød, 1981.

[Fuk00] E. Fukada. History and recent progress in piezoelectric polymers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47:1277–1290, 2000.

[Fuk03] J. Fukai. *A Promenade Along Electrodynamics*. Vales Lake Publishing, Pueblo West, 2003.

[GA94] P. Graneau y A. K. T. Assis. Kirchhoff on the motion of electricity in conductors. *Apeiron*, 19:19–25, 1994.

[Gal14] F. Galembeck *et al.* Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives. *RSC Advances*, 4:64280–64298, 2014. Doi: 10.1039/c4ra09604e.

[Gas91] A. Gaspar. Motor de ímã móvel. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 8:188–193, 1991.

[Gas96] A. Gaspar. *História da Eletricidade*. Ática, São Paulo, 1996.

[Gas00] A. Gaspar. *Eletromagnetismo - Física Moderna*. Ática, São Paulo, 2000.

[Gas03] A. Gaspar. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. Ática, São Paulo, 2003.

[Gas13] A. Gaspar. *Compreendendo a Física*, volumen 3: Eletromagnetismo e Física Moderna. Ática, São Paulo, 2013. 2.ª edición. Manual do Professor.

[GB17] F. Galembeck y A. L. Burgo. *Chemical Electrostatics*. Springer, Berlin, 2017.

[Gil00] W. Gilbert. *On the Magnet, Magnetick Bodies also, and on the Great Magnet the Earth; a New Physiology, Demonstrated by Many Arguments & Experiments*. Chiswick Press, London, 1900. Traducido por S. P. Thompson.

[Gil71a] C. S. Gillmor. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*. Princeton University Press, Princeton, 1971.

[Gil71b] C. S. Gillmor. Coulomb, Charles Augustin. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 3, pp. 439–447. Charles Scribner's Sons, New York, 1971.

[Gil78] W. Gilbert. *On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth*, volumen 28, pp. 1–121 of *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1978. Traducido por P. F. Mottelay.

[Gra21] S. Gray. An account of some new electrical experiments. *Philosophical Transactions*, 31:104–107, 1720–1721.

[Gra32a] S. Gray. The electricity of water. *Philosophical Transactions*, 37:227–230 (addenda in page 260), 1731–1732.

[Gra32b] S. Gray. Farther account of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:285–291, 1731–1732.

[Gra32c] S. Gray. Farther accounts of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:397–407, 1731–1732.

[Gra32d] S. Gray. Several experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:18–44, 1731–1732.

[Gra36a] S. Gray. Experiments and observations upon the light that is produced by communicating electrical attraction to animate or inanimate bodies, together with some of its most surprising effects. *Philosophical Transactions*, 39:16–24, 1735–1736.

[Gra36b] S. Gray. Some experiments relating to electricity. *Philosophical Transactions*, 39:166–170, 1735–1736.

[Gre94] T. B. Greenslade Jr. The hydro-electrical machine. *The Physics Teacher*, 32:210–211, 1994.

[Gro54] B. Gross. Theory of thermodielectric effect. *Physical Review*, 94:1545–1551, 1954.

[Gui12] J. Guisasola. Book review: Andre Koch Torres Assis (2010) The Experimental and Historical Foundations of Electricity. *Science & Education*, 21:283–285, 2012. Doi: 10.1007/s11191-010-9318-z.

[GV99] J. Guala-Valverde. *Inercia y Gravitación*. Fundacion Julio Palacios, Neuquen, Argentina, 1999. En colaboración con J. Tramaglia y R. Rapacioli. https://www.educ.ar/recursos/90380.

[Har67] W. S. Harris. *A Treatise on Frictional Electricity, in Theory and Practice*. Virtue and Co., London, 1867. Editado por C. Tomlinson.

[Har82] P. M. Harman. *Energy, Force, and Matter — The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

[Här12] H. Härtel. Die Natur macht keine Sprünge — auch nicht beim Ohm'schen Gesetz. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 5:31–35, 2012.

[Hau09] F. Hauksbee. An account of the repetition of an experiment touching motion given bodies included in a glass, by the approach of a finger near its outside: With other experiments on the effluvia of glass. *Philosophical Transactions*, 26:82–86, 1708–1709.

[Hea87] O. Heaviside. Electromagnetic induction and its propagation. *The Electrician*, 1885–87. Reimpreso en O. Heaviside, Electrical Papers (Macmillan, London, 1892), volumen 1, Art. 30, pp. 429–560 y O. Heaviside, Electrical Papers (Macmillan, London, 1894), volumen 2, Art. 35, pp. 39–155.

[Hec96] L. Hecht. The significance of the 1845 Gauss-Weber correspondence. *21st Century Science & Technology*, 9(3):22–34, 1996. https://21sci-tech.com/articles/Atomic_Science.pdf y https://archive.org/details/WeberAmpereElectrodynamicsHistory.

[Hee92] P. Heering. On Coulomb's inverse square law. *American Journal of Physics*, 60:988–994, 1992.

[Hei66] J. L. Heilbron. G. M. Bose: the prime mover in the invention of the Leyden jar? *Isis*, 57:264–267, 1966.

[Hei99] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th and 18th Centuries — A Study in Early Modern Physics*. Dover, New York, 1999.

[Hom81] R. W. Home. *The Effluvial Theory of Electricity*. Arno Press, New York, 1981.

[Jea27] J. Jeans. *The Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 1927.

[Jec12] B. Jech. Sur l'expérience de Desaguliers de la déviation d'un filet d'eau par une tige électrisée. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 946:737–760, 2012.

[Jef59] O. Jefimenko. Lecture demonstrations on electrification by contact. *American Journal of Physics*, 27:604–605, 1959. Doi: 10.1119/1.1934925.

[Jef71a] O. Jefimenko. Franklin's electric motors. *American Journal of Physics*, 39:1139–1140, 1971.

[Jef71b] O. Jefimenko. Operation of electric motors from the atmospheric electric field. *American Journal of Physics*, 39:776–778, 1971.

[Jef73] O. D. Jefimenko. *Electrostatic Motors: Their History, Types, and Principles of Operation*. Electret Scientific, Star City, 1973.

[JG17] W. T. Jardim y A. Guerra. República das letras, academias e sociedades científicas no século XVIII: a garrafa de Leiden e a ciência no ensino. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 34:774–797, 2017. Doi: 10.5007/2175-7941.2017v34n3p774.

[JM86] C. Jungnickel y R. McCormmach. *Intellectual Mastery of Nature — Theoretical Physics from Ohm to Einstein*, volumen 1–2. University of Chicago Press, Chicago, 1986.

[JW71] O. Jefimenko y D. K. Walker. Electrostatic motors. *The Physics Teacher*, 9:121–129, 1971.

[JW80] O. D. Jefimenko y D. Walker. Electrets. *The Physics Teacher*, 18:651–659, 1980.

[Kat06] S. Katzir. *The Beginnings of Piezoelectricity - A Study in Mundane Physics*, volumen 246 de *Boston Studies in Philosophy of Science*. Springer, Dordrecht, 2006.

[Kip09] N. Kipnis. A law of physics in the classroom: the case of Ohm's law. *Science & Education*, 18:349–382, 2009. Doi: 10.1007/s11191-008-9142-x.

[Kir49] G. Kirchhoff. Ueber eine Ableitung der Ohm'schen Gesetze, welche sich an die Theorie der Elektrostatik anschliesst. *Annalen der Physik und Chemie*, 78:506–513, 1849. Reimpreso en G. Kirchhoff's *Gesammelte Abhandlungen* (Barth, Leipzig, 1882), pp. 49–55.

[Kir50] G. Kirchhoff. On a deduction of Ohm's law, in connexion with the theory of electrostatics. *Philosophical Magazine*, 37:463–468, 1850.

[Kir57] F. Kirchner. Determination of the velocity of light from electromagnetic measurements according to W. Weber and R. Kohlrausch. *American Journal of Physics*, 25:623–629, 1957. Traducido por A. Akeley.

[KW57] R. Kohlrausch y W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Zurückführung der Stromintensitäts-Messungen auf mechanisches Maass. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 3:221–292, 1857. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 609–676.

[LB08] C.-Y. Liu y A. J. Bard. Electrostatic electrochemistry at insulators. *Nature Materials*, 7:505–509, 2008. Doi: 10.1038/nmat2160.

[LB09] C.-Y. Liu y A. J. Bard. Electrons on dielectrics and contact electrification. *Chemical Physics Letters*, 480:145–156, 2009. Doi: 10.1016/j.cplett.2009.08.045.

[Lic56] G. C. Lichtenberg. *Über eine neue Methode, die Natur und die Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen*, volumen 246 de *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften.* Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1956. Herausgegeben in neuer deutscher Übersetzung von H. Pupke.

[Llo80] J. T. Lloyd. Lord Kelvin demonstrated. *The Physics Teacher*, 18:16–24, 1980.

[Lom17] M. V. Lomonosov, 2017. Discourse on atmospheric phenomena originating from electrical force. Traducción al inglés y comentario por V. Shiltsev. arXiv:1709.08847 [physics.hist-ph].

[Lor95] H. A. Lorentz. *Versuch einer Theorie der Electrischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern.* E. J. Brill, Leiden, 1895. Reimpreso en H. A. Lorentz, *Collected Papers* (Springer, Dordrecht, 1937), volumen V, pp. 1–138. Traducción al inglés de Wikisource disponible en https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Attempt_of_a_Theory_of_Electrical_and_Optical_Phenomena_in_Moving_Bodies.

[LSB08] C. E. Laburú, O. H. M. d. Silva y M. A. Barros. Laboratório caseiro - pára-raios: um experimento simples e de baixo custo para a eletrostática. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:168–182, 2008.

[MA08] C. P. Magnaghi y A. K. T. Assis. Sobre a eletricidade excitada pelo simples contato entre substâncias condutoras de tipos diferentes — Uma tradução comentada do artigo de Volta de 1800 descrevendo sua invenção da pilha elétrica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:118–140, 2008.

[Mag06] C. P. Magnaghi. Origem da corrente elétrica — a invenção da pilha. Tesis de fin de carrera realizada en el Instituto de Física de la Universidad de Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. https://www.ifi.unicamp.br/~assis et https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2006/CenoP-Assis_RF1.pdf, 2006.

[Mas87] S. Mascarenhas. Bioelectrets: electrets in biomaterials and biopolymers. In G. M. Sessler, editor, *Electrets*, pp. 321–346. Springer, Berlin, 2.ª edición, 1987.

[Max54a] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, volumen I. Dover, New York, 1954. Reedición completa de la tercera edición de 1891.

[Max54b] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism.* Dover, New York, 1954. Dos volúmenes. Reedición completa de la tercera edición de 1891.

[MB17] B. A. Moura y T. Bonfim. Benjamin Franklin e a formação de temporais com raios e trovões: tradução comentada de uma carta a John Mitchel. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 34:460–478, 2017. Doi: 10.5007/2175-7941.2017v34n2p460.

[MFsd] G. d. C. Marques y C. Furukawa, [s.d.]. Eletromagnetismo - Tema 2 - O potencial elétrico - Experimento 3: Máquina de indução: eletróforo de Volta. Cursos en línea de la Universidad de São Paulo - USP, São Paulo, Brazil. http://eaulas.usp.br/portal/home/video.action?idItem=5874.

[Mil17] R. A. Millikan. *The Electron: Its Isolation and Measurements and the Determination of Some of Its Properties*. The University of Chicago Press, Chicago, 1917. Editado con una introducción por J. W. M. DuMond.

[Mor04a] B. Morse. Pointy tab blunt tab. Electrostatic Video Series. Wright Center for Innovative Science Education. https://www.youtube.com/watch?v=6pnXOHjYjO0, 2004.

[Mor04b] R. A. Morse, 2004. Benjamin Franklin and Electrostatics. Homepage created and collected by R. A. Morse. https://www.compadre.org/student/items/detail.cfm?ID=3383.

[MW08] L. S. McCarty y G. M. Whitesides. Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 47:2188–2207, 2008. Doi: 10.1002/anie.200701812.

[MWW07] L. S. McCarty, A. Winkleman y G. M. Whitesides. Ionic electrets: electrostatic charging of surfaces by transferring mobile ions upon contact. *Journal of the American Chemical Society*, 129:4075–4088, 2007. Doi: 10.1021/ja067301e.

[Net94] L. F. Netto. Eletreto (o ímã da eletrostática). http://web.archive.org/web/20181014170944/http://www.feiradeciencias.com.br, 1994.

[Netsd] L. F. Netto. Feira de ciências. http://web.archive.org/web/20181014170944/http://www.feiradeciencias.com.br, [s.d.].

[New16] I. Newton. *Principios matemáticos de la filosofía natural.* Traducción: Eloy Rada García. ePub, base r1.2, casc 29.05.16.

[New34] I. Newton. *Mathematical Principles of Natural Philosophy.* University of California Press, Berkeley, 1934. Cajori edition.

[New52] I. Newton. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, volumen 34, pp. 1–372 of *Great Books of the Western World.* Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952. Traducido por A. Motte y revisado por F. Cajori.

[New90] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural.* Nova Stella/Edusp, São Paulo, 1990. Livro I: O Movimento dos Corpos. Traducción al portugués por T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring y M. H. C. Célia.

[New90a] I. Newton. *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle.* Tome I. Éditions Jacques Gabay, Sceaux, France, 1990. Traduit par feue Madame la Marquise du Chastellet. Reimpresión de la publicación de 1759.

[New99] I. Newton. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy.* University of California Press, Berkeley, 1999. A new translation by I. B. Cohen and A. Whitman, assisted by J. Budenz.

[New08] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural.* Edusp, São Paulo, 2008. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência). Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Traducción al portugués por A. K. T. Assis.

[New10] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural.* Folha de São Paulo, São Paulo, 2010. Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Coleção Folha de São Paulo: Livros que Mudaram o Mundo, volumen 9. Traducción al portugués por A. K. T. Assis.

[Nol46] Abbé Nollet. Observations Sur quelques nouveaux phénomènes d'Électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 1–23, 1746.

[Oer20a] H. C. Oersted. Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée. *Annales de Chimie et de Physique*, 14:417–425, 1820.

[Oer20b] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. *Annals of Philosophy*, 16:273–277, 1820. Translated from a printed account drawn up in Latin by the author and transmitted by him to the Editor of the *Annals of Philosophy*. Reimpreso en *Selected Works of Hans Christian Ørsted* (Princeton, Princeton University Press, 1998), traducido y editado por K. Jelved, A. D. Jackson y O. Knudsen.

[Oer65] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*, pp. 113–117, New York, 1965. Pergamon. Translation from Thomson's *Annals of Philosophy*, October 1820. Translated from a

printed account drawn up in Latin by the author and transmitted by him to the Editor of the *Annals of Philosophy*.

[OF38] G. S. Ohm y G. T. Fechner. *Das Grundgesetz des elektrischen Stromes*, volumen 244 de *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*. Akad. Verlagsgesellsch., Leipzig, 1938. Drei Abhandlungen von Georg Simon Ohm (1825 und 1826) und Gustav Theodor Fechner (1829). Herausgegeben von C. Piel.

[Ohm25] G. S. Ohm. Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten. *Journal für Chemie und Physik*, 44:10–118, 1825. Reimpreso en *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), pp.1–7.

[Ohm26] G. S. Ohm. Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators. *Journal für Chemie und Physik*, 46:137–166, 1826. Reimpreso en *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), pp. 8–29.

[Ohm66] G. S. Ohm. The galvanic circuit investigated mathematically. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, volumen 2, pp. 401–506, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation. Traducción al inglés por W. Francis.

[OP09] K. Ovchinnikova y G. H. Pollack. Can water store charge? *Langmuir*, 25:542–547, 2009. Doi: 10.1021/la802430k.

[Ørs86] H. C. Ørsted. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10:115–122, 1986. Traducido por R. d. A. Martins.

[Per44] E. Perucca. *Física General y Experimental*, volumen II: Optica, Electricidad y Magnetismo. Editorial Labor, Barcelona, 1944. Traducido de la cuarta edición italiana por J. Melis y J. M. V. Llenas.

[Pla52] Plato. *Timaeus*. In Great Books of the Western World, R. M. Hutchins, Editor in Chief, Vol. 7, pp. 442–477, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Traducido por B. Jowett.

[Pla09] Platao. *Timeu e Crítias ou A Atlântida*. Hemus, São Paulo, 2009. Traducido al portugués por N. d. P. Lima.

[Pol13] G. H. Pollack. *The Fourth Phase of Water: Beyond Solid, Liquid, and Vapor*. Ebner & Sons, Seattle, 2013.

[Pot84] A. Potier. *Collection de Mémoires relatifs a la Physique*, volumen 1: *Mémoires de Coulomb*. Gauthiers-Villars, Paris, 1884.

[Pri75] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity, with Original Experiments*, volumen II. C. Bathurst and T. Lowndes, London, 3rd edition, 1775.

[Pri66] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity*, volumen 2. Johnson Reprint Corporation, New York, 1966. The Sources of Science, Number 18. Reimpreso en la 3.ª edición, London, 1775.

[Rai15] A. C. Raicik. Experimentos exploratórios: os contextos da descoberta e da justificativa nos trabalhos de Gray e Du Fay. Tesis de maestría, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Brazil, 2015.

[Ram53] C. Ramsauer, 1953. Das Ohmsche Gesetz (1826), in C. Ramsauer, *Grundversuche der Physik in historischer Darstellung* (Springer, Berlin, 1953), volumen 1: Von der Fallgesetzen bis zu den elektrischen Wellen.

[Roc89] J. Roche. Applying the history of electricity in the classroom: a reconstruction of the concept of 'potential'. In M. Shortland and A. Warwick, editores, *Teaching the History of Science*, pp. 168–184. Basil Blackwell, Oxford, 1989.

[Ros90] F. Rosenberger. *Die Geschichte der Physik*, volumen 3. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1887–1890.

[Ros57] L. Rosenfeld. The velocity of light and the evolution of electrodynamics. *Il Nuovo Cimento*, Supplement to vol. 4:1630–1669, 1957. Reimpreso en Cohen, R. S. y Stachel, J. J. (eds.), *Selected Papers of Léon Rosenfeld.* Boston Studies in the Philosophy of Science, volumen 21. Springer, Dordrecht, capítulo 14, pp. 134–177.

[Ros81] L. Rosenfeld. Kirchhoff, Gustav Robert. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 7, pp. 379–383, New York, 1981. Charles Scribner's Sons.

[RP13a] A. C. Raicik y L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma abordagem histórica e experimental à eletricidade em uma disciplina sobre a evolução dos conceitos da física. Anais do XX Simpósio Nacional de Ensino de Física - SNEF, São Paulo, SP. pp. 1–8.

[RP13b] A. C. Raicik y L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma discussão sobre os contextos da descoberta e da justificativa nos estudos de Du Fay. Anais do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências - IX ENPEC, Águas de Lindóia, SP, 10 a 14 de novembro. pp. 1–8.

[RP13c] A. C. Raicik y L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma análise da terminologia *descoberta* e sua contextualização nos livros didáticos: os estudos de Gray e Du Fay. Anais do V Encontro Estadual de Ensino de Física, Porto Alegre, RS. pp. 1–13.

[RP15a] A. C. Raicik y L. O. Q. Peduzzi. Potencialidades e limitações de um módulo de ensino: uma discussão histórico-filosófica dos estudos de Gray e Du Fay. *Investigações em Ensino de Ciências*, 20:138–160, 2015.

[RP15b] A. C. Raicik y L. O. Q. Peduzzi. Um resgate histórico e filosófico dos estudos de Charles Du Fay. *Revista Ensaio*, 17:105–125, 2015. Doi: 10.1590/1983-211720175170105.

[RP16] A. C. Raicik y L. O. Q. Peduzzi. A estrutura conceitual e epistemológica de uma descoberta científica: reflexões para o ensino de ciências. *Alexandria - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, 9:149–176, 2016. Doi: 10.5007/1982-5153.2016v9n2p149.

[RR57] D. Roller y D. H. D. Roller. The Development of the Concept of Electric Charge. In J. B. Conant, editor, *Harvard Case Studies in Experimental Science*, chapter 8, pp. 541–639. Harvard University Press, Cambridge, 1957.

[San11] L. P. Santos *et al.* Water with excess electric charge. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115:11226–11232, 2011. Doi: 10.1021/jp202652q.

[Sav89] I. V. Savelyev. *Physics: A General Course*, volumen II: Electricity and Magnetism, Waves and Optics. Mir, Moscow, 1989. Traducido del ruso por G. Leib.

[Sch63] M. Schagrin. Resistance to Ohm's law. *American Journal of Physics*, 31:536–547, 1963.

[Sch07] L. B. Schein. Recent progress and continuing puzzles in electrostatics. *Science*, 316:1572–1573, 2007.

[Sco59] W. T. Scott. Who was Earnshaw? *American Journal of Physics*, 27:418–419, 1959.

[Ses87] G. M. Sessler (ed.). *Electrets*. Springer, Berlin, deuxième edition, 1987.

[SGS31] J. B. Seth, B. Gulati y S. Singh. On an electromotive force between two metals in relative motion. *Philosophical Magazine*, 12:409–429, 1931. Doi: 10.1080/14786443109461818.

[Sil10a] V. A. Silva Júnior. Fabricação e aplicação de eletretos. Tesis de fin de carrera realizada en el Instituto de Física de la Universidad de Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. https://www.ifi.unicamp.br/~assis y https://sites.ifi.unicamp.br/lunazzi/files/2014/03/ValterA-Assis_RF1.pdf, 2010.

[Sil10b] V. A. Silva Júnior. História e propriedades dos eletretos. Tesis de fin de carrera realizada en el Instituto de Física de la Universidad de Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. https://www.ifi.unicamp.br/~assis, 2010.

[Sil10c] F. L. d. Silveira. Resenha - Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27:411–415, 2010. https://www.researchgate.net/publication/315130099.

[Sil11] F. L. d. Silveira. Video in Portuguese on electrostatic experiments. https://www.if.ufrgs.br/~lang y https://www.youtube.com/watch?v=GhYKeb99OgA, 2011.

[Sil16] F. L. d. Silveira. Descarga elétrica através do ar NÃO é consequente do arrancamento de elétrons dos eletrodos! https://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=1652, 2016.

[SP06] C. C. Silva y A. C. Pimentel, 2006. Benjamin Franklin e a história da eletricidade em livros didáticos. Proceedings of the X Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Londrina, PR, Brazil, 15 to 19/08/2006. https://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/x/sys/resumos/T0150-1.pdf.

[SP08] C. C. Silva y A. C. Pimentel. Uma análise da história da eletricidade presente em livros didáticos: o caso de Benjamin Franklin. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:141–159, 2008.

[Tho68] W. Thomson. On a self-acting apparatus for multiplying and maintaining electric charges, with applications to illustrate the voltaic theory. *Proceedings of the Royal Society of London*, 16:67–72, 1867–1868.

[Tho84a] W. Thomson. Atmospheric electricity. In W. Thomson, editor, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pp. 192–239. Macmillan, London, 2.ª edición, 1884. Article XVI. Reimpreso en Nichol's *Cyclopaedia*, 2.ª edición, 1860.

[Tho84b] W. Thomson. A mathematical theory of magnetism. In W. Thomson, editor, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pp. 345–430. Macmillan, London, 2.ª edición, 1884. Article XXIV. Reimpreso en *Philosophical Transactions*, volumen 141, pp. 243–268 y 269–285 (1851).

[Tho84c] W. Thomson. Measurement of the electromotive force required to produce a spark in air between parallel metal plates at different distances. In W. Thomson, editor, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pp. 247–259. Macmillan, London, 2.ª edición, 1884. Article XIX. Reimpreso en *Proceedings of the Royal Society*, volumen 10, pp. 326–338 (1860).

[Tho84d] W. Thomson. On the mathematical theory of electricity in equilibrium. In W. Thomson, editor, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pp. 42–68. Macmillan, London, 2.ª édición, 1884. Articles IV (pp. 42–51) y V (pp. 52–68). Reimpreso en *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, volumen 3, pp. 131–148 y 266–274 (1848).

[Tho21] J. J. Thomson. *Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 5.ª edición, 1921.

[TM09] P. A. Tipler y G. Mosca. *Física para Cientistas e Engenheiros*, volumen 2: Eletricidade e Magnetismo, Óptica. LTC, Rio de Janeiro, 6.ª edición, 2009. Traducción al portugués por N. M. Balzaretti.

[TP11] J. D. M. Tamayo y M. G. T. Palacio. *El Papel del Experimento en la Construcción del Conocimiento Físico, el Caso de la Construcción del Potencial Eléctrico como una Magnitude Física. Elementos para Propuestas en la Formación Inicial y Continuada de Profesores de Física.* Universidad de Antioquia - Facultad de Educación, Medellín, 2011. Trabajo de Investigación como requisito parcial para optar al título de Magister en Educación, línea de Educación en Ciencias Experimentales. Director: A. E. R. Chacón.

[Vas05] G. M. S. Vasconcelos. Experimentos de eletrostática de baixo custo para o ensino médio. Tesis de fin de carrera realizada en el Instituto de Física de la Universidad de Campinas — UNICAMP, Brazil. Supervisor: A. K. T. Assis. https://www.ifi.unicamp.br/~assis y https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2005/GeraldoM_Assis_RF1.pdf, 2005.

[VF80] R. N. Varney y L. H. Fisher. Electromotive force: Volta's forgotten concept. *American Journal of Physics*, 48:405–408, 1980.

[Vol00a] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Transactions*, 90:403–431, 1800. Carta en francés de A. Volta a J. Banks fechada el 20 de marzo de 1800. Fue leída ante la Royal Society el 26 de junio de 1800.

[Vol00b] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Magazine*, 7:289–311, 1800.

[Vol64] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. In B. Dibner, *Alessandro Volta and the Electric Battery*, pp. 111–131. Franklin Watts, New York, 1964. Traducido del artículo del autor publicado en francés en *Philosophical Transactions* en 1800, parte 2.

[WB09] B. Wolff y C. Blondel. La balance électrique de Coulomb pouvait-elle constituer sa propre cage de Faraday? https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique, 2009.

[WB11] B. Wolff y C. Blondel. Quelques questions encore posées aujourd'hui par l'histoire de l'électrostatique. *Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 105:705–717, 2011.

[Web46] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen — Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung. *Abhandlungen bei Begründung der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften am Tage der zweihundertjährigen Geburtstagfeier Leibnizen's herausgegeben von der*

Fürstlich Jablonowskischen Gesellschaft (Leipzig), pp. 211–378, 1846. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 3, H. Weber (editor), (Springer, Berlin, 1893), pp. 25–214.

[Web48] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 73:193–240, 1848. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 3, H. Weber (editor), (Springer, Berlin, 1893), pp. 215–254.

[Web52a] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über Diamagnetismus. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 1:485–577, 1852. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 3, H. Weber (editor), (Springer, Berlin, 1893), pp. 473–554.

[Web52b] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 1:199–381, 1852. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 3, H. Weber (editor), (Springer, Berlin, 1893), pp. 301–471.

[Web64] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über elektrische Schwingungen. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 6:571–716, 1864. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 4, H. Weber (editor), (Springer, Berlin, 1894), pp. 105–241.

[Web71] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über das Princip der Erhaltung der Energie. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 10:1–61, 1871. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 4, H. Weber (editor), (Springer, Berlin, 1894), pp. 247–299.

[Web72] W. Weber. Electrodynamic measurements — Sixth memoir, relating specially to the principle of the conservation of energy. *Philosophical Magazine*, 43:1–20 y 119–149, 1872. Translated by Professor G. C. Foster, F.R.S., from the *Abhandlungen der mathem.-phys. Classe der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, volumen X (January 1871).

[Web78] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über die Energie der Wechselwirkung. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 11:641–696, 1878. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 4, H. Weber (editor), (Springer, Berlin, 1894), pp. 361–412.

[Web92a] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, E. Riecke (editor), volumen 2, *Magnetismus*. Springer, Berlin, 1892. http://archive.org/details/wilhelmweberswe01fiscgoog.

[Web92b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, W. Voigt, (editor), volumen 1, *Akustik, Mechanik, Optik und Wärmelehre*. Springer, Berlin, 1892.

[Web93a] H. Weber. *Wilhelm Weber — Eine Lebensskizze*. Eduard Trewendt, Breslau, 1893. https://books.google.de/books/about/Wilhelm_Weber.html?id=pu3mpnrYpuUC&redir_esc=y.

[Web93b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, H. Weber (editor), volumen 3, *Galvanismus und Elektrodynamik*, primera parte. Springer, Berlin, 1893. http://archive.org/details/wilhelmweberswe02fiscgoog.

[Web94a] W. Weber. Aphorismen. In H. Weber, editor, *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 4, pp. 630–632, Berlin, 1894. Springer.

[Web94b] W. Weber. Ueber die Einrichtung des Bifilargalvanometers. In H. Weber, editor, *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 4, pp. 584–615, Berlin, 1894. Springer.

[Web94c] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, H. Weber (editor), volumen 4, *Galvanismus und Elektrodynamik*, deuxième partie. Springer, Berlin, 1894.

[Web66] W. Weber. On the measurement of electro-dynamic forces. In R. Taylor, editor, *Scientific Memoirs*, volumen 5, pp. 489–529, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation.

[Web07] W. Weber, 2007. Determinations of electrodynamic measure: concerning a universal law of electrical action, *21st Century Science & Technology*, posted March 2007, translated by S. P. Johnson, edited by L. Hecht y A. K. T. Assis. http://21sci-tech.com/translation.html y https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Web08] W. Weber, 2008. Determinations of electrodynamic measure: particularly in respect to the connection of the fundamental laws of electricity with the law of gravitation, *21st Century Science & Technology*, posted November 2008, translated by G. Gregory, edited by L. Hecht y A. K. T. Assis. http://21sci-tech.com/translation.html y https://www.ifi.unicamp.br/~assis.

[Whe43] C. Wheatstone. An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit. *Philosophical Transactions*, 133:303–327, 1843.

[Whi73a] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volumen 1: *The Classical Theories*. Humanities Press, New York, 1973.

[Whi73b] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volumen 2: *The Modern Theories*. Humanities Press, New York, 1973.

[Wie60] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Webers Stellung in der Entwicklung der Elektrizitätslehre. Dissertation, Universität Hamburg, 1960.

[Wie67] K. H. Wiederkehr. *Wilhelm Eduard Weber — Erforscher der Wellenbewegung und der Elektrizität (1804–1891)*, volumen 32 de *Grosse Naturforscher*, H. Degen (editor). Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1967.

[Wil12] M. W. Williams. What creates static electricity? *American Scientist*, 100:316–323, 2012. Doi: 10.1511/2012.97.316.

[Wis81] M. N. Wise. German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845–1880. In G. N. Cantor y M. J. S. Hodge, editores, *Conceptions of Ether — Studies in the History of Ether Theories 1740–1900*, pp. 269–307, Cambridge, 1981. Cambridge University Press.

[WK56] W. Weber y R. Kohlrausch. Über die Elektricitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fliesst. *Annalen der Physik und Chemie*, J. C. Poggendoff (editor), 99:10–25, 1856. Reimpreso en *Wilhelm Weber's Werke*, volumen 3, H. Weber (editor), (Springer, Berlin, 1893), pp. 597–608.

[WK08] W. Weber y R. Kohlrausch. Sobre a quantidade de eletricidade que flui através da seção reta do circuito em correntes galvânicas. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 1:94–102, 2008. Traducción al portugués por A. K. T. Assis.

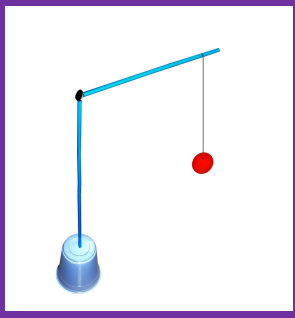
[Woo68] A. E. Woodruff. The contributions of Hermann von Helmholtz to electrodynamics. *Isis*, 59:300–311, 1968.

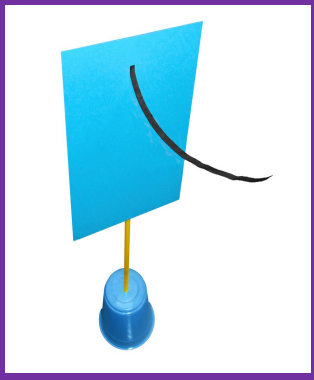
[Woo81] A. E. Woodruff. Weber, Wilhelm Eduard. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 14, pp. 203–209, New York, 1981. Charles Scribner's Sons.

El volumen 2 del texto «Los fundamentos experimentales e históricos de la electricidad» aborda los aspectos más fundamentales de la física. Esta obra describe los principales experimentos y descubrimientos de la historia de la electricidad. Trata sobre las atracciones y repulsiones, las cargas positivas y negativas, los conductores y los aislantes, la electrificación por fricción, por contacto o por inducción, de la serie triboeléctrica, de la electrificación de las cintas adhesivas, del equilibrio y la distribución de las cargas en los conductores, del blindaje eléctrico, del efecto punta, de las chispas y las descargas eléctricas en el aire, de los electretes y de la conservación temporal de la electrificación de los cuerpos.

Esta obra explica cómo construir varios instrumentos: el versorio, el péndulo eléctrico, el electroscopio, el colector de cargas, el comprobador de circuitos, el electroforo, la botella de Leiden y los condensadores, entre otros. Todos los experimentos se describen con claridad y se llevan a cabo con materiales sencillos y de bajo costo. Estos experimentos conducen a conceptos, definiciones y leyes claras que describen estos fenómenos. Se presentan los aspectos históricos, acompañados de citas pertinentes de los principales científicos. Al final del libro se incluye una extensa bibliografía.

Acerca del autor:
André Koch Torres Assis nació en Brasil en 1962. Obtuvo su doctorado en física en 1987. Trabaja en el Instituto de Física de la Universidad de Campinas (UNICAMP) desde 1989. Ocupó puestos de posdoctorado en el Laboratorio de Culham (Autoridad Británica de Energía Atómica, Oxfordshire, Inglaterra, de 1988 a 1989), en la Universidad Northeastern (Boston, Estados Unidos, de 1991 a 1992), en la Universidad de Hamburgo (Alemania, de 2001 a 2002 y también en 2009), en la Universidad Técnica de Dresde (Alemania, 2014) y en la Universidad de Augsburgo (Alemania, 2023).





Sus cuatro estancias en Alemania fueron financiadas por becas de investigación Humboldt otorgadas por la Fundación Alexander von Humboldt de Alemania. Ha publicado más de 30 obras sobre la electrodinámica de Weber; los cálculos de inductancia y fuerza en circuitos eléctricos; los principales trabajos de Wilhelm Weber sobre la electrodinámica traducidos al inglés; Arquímedes, el centro de gravedad y la ley de la palanca; el modelo planetario del átomo de Weber; el método de Arquímedes; la fuerza eléctrica de una corriente; la electrodinámica de Ampère; las memorias de Coulomb sobre la torsión, la electricidad y el magnetismo traducidas al inglés; y la mecánica relacional y la aplicación del principio de Mach a la fuerza gravitacional de Weber. Página de inicio: https://www.ifi.unicamp.br/~assis

ISBN 978-1-9879805-3-0
9 781987 980530