

TESIS DOCTORAL

**EL CONOCIMIENTO *AL FINAL DE UN HILO.*  
LA COMETA A TRAVÉS DE LA HISTORIA DE LA  
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA**

JUAN MIGUEL SUAY BELENGUER  
Ingeniero Industrial



FACULTAD DE FILOSOFÍA  
DEPARTAMENTO DE LÓGICA, HISTORIA Y FILOSOFÍA DE LA CIENCIA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA  
2013



DEPARTAMENTO DE LÓGICA, HISTORIA Y FILOSOFÍA DE LA  
CIENCIA  
FACULTAD DE FILOSOFÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

**EL CONOCIMIENTO *AL FINAL DE UN HILO.*  
LA COMETA A TRAVÉS DE LA HISTORIA DE LA  
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA**

Presentada por  
**Juan Miguel Suay Belenguer**  
Ingeniero Industrial

Dirigida por  
**Dr. David Teira Serrano**



## AGRADECIMIENTOS

---

Deseo compartir mi satisfacción con diversas personas, sin cuya colaboración esta Tesis no hubiera sido posible. En primer lugar al Dr. Antonio García Belmar, profesor titular del departamento de Enfermería Comunitaria, Medicina Preventiva y Salud Pública e Historia de la Ciencia de la Universidad de Alicante, quien fue el primero en creer en este proyecto de investigación sobre las cometas. Pero, sobre todo, debo manifestar mi gratitud al director de esta Tesis, el Dr. David Teira Serrano, por su inestimable dedicación en la concepción, orientación y realización de esta investigación.

Muchas personas me han ayudado en mi investigación, de entre ellas destaco:

A los Drs. Manuel Sellés García y Carlos Solís Santos del departamento de Lógica, Historia y Filosofía de la Ciencia de la UNED, por sus aportaciones durante la redacción y evolución de mi trabajo final del Master en Filosofía, origen del contenido de la presente investigación.

Al Dr. Paolo Brenni presidente de la *Scientific Instrument Commission of the International Union of History and Philosophy of Science*, y presidente también de la *Scientific Instrument Society*, así como al Dr. Alistair Kwan del *Center for Excellence in Teaching and Learning* de la Universidad de Rochester, por sus referencias sobre instrumentos y juguetes científicos.

Al Dr. Jan Golinski, profesor de historia y humanidades del departamento de historia de la Universidad de New Hampshire, así como al Dr. Mike Lynn, profesor de historia del departamento de Ciencias Sociales del *College of Liberal Arts Purdue University North Central*, por su información y referencias sobre la influencia del público en la actividad científica en el siglo XVIII.

A La Dra. Susana Gómez López, profesora titular de historia de la ciencia de la Universidad Complutense de Madrid, por sus referencias sobre ciencia y arte.

Al Dr. Javier Ordóñez catedrático del departamento de Lingüística, Lenguas Modernas, Lógica y Filosofía de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Madrid, por sus comentarios en la revisión de mi artículo publicado en la revista Llull “La cometa en las obras de física y de divulgación científica de los siglos XVIII y XIX”, publicación relacionada con el tema de investigación de esta Tesis, requisito para la presentación de la misma en esta universidad.

Al Dr. Manuel Palomares, de la Agencia Estatal de Meteorología, por su información sobre la historia de la meteorología. Sobre todo debo especial gratitud a los Drs. Fernando Ory Ajamil y Emilio Cuevas, observador y director respectivamente del Observatorio Atmosférico de Izaña (Tenerife), perteneciente a la Agencia Estatal de Meteorología, por la información documental y gráfica sobre las cometas utilizadas en dicho observatorio.

A la Dra. Kelly Hamilton, que me facilitó información sobre el trabajo aeronáutico del filósofo austriaco Wittgenstein, así como a Eyal Catz, estudiante en el *Cohn Institute for the History and Philosophy of Science and Ideas* de la Universidad de Tel-Aviv, que se encuentra investigando sobre modelos de pájaros en aeronáutica, por sus referencias aportadas sobre modelos en ingeniería.

Al Dr. Julián Simón Calero, Ingeniero aeronáutico jubilado del INTA y doctor en Filosofía por sus comentarios sobre Jorge Juan y las cometas.

A mi amigo José Antonio Martínez Climent, biólogo, músico, poeta y gran escritor, por la revisión formal del texto. Por último, y no por ello menos importante, a mi mujer Inmaculada por armarse de paciencia y asumir, junto con mi hija Lucía, que consagrarse más tiempo a las cometas que a su compañía.

La dedicatoria más especial es para mi padre Juan Suay Artal, por haberme animado siempre a empezar y terminar los proyectos más importantes de mi vida.

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1 OBJETOS CIENTÍFICOS .....	10
2 EL FRACASO DE LOS OBJETOS CIENTÍFICOS.....	14
3 LAS FORMAS DE LAS COMETAS.....	17
3.1 COMETAS DE UN SOLO HILO.....	18
1. Planas.....	18
2. Curvadas.....	21
3. Celulares o compuestas .....	23
4. Semiflexibles .....	26
5. Parafoil.....	27
6. Sacos de viento o catavientos.....	28
7. Rotor .....	31
3.2 COMETAS DE VARIOS HILOS.....	32
<b>2 LAS COMETAS ELÉCTRICAS .....</b>	<b>35</b>
1 INTRODUCCIÓN.....	35
2 LA NATURALEZA ELÉCTRICA DEL RAYO DURANTE EL SIGLO XVII .....	38
3 EL EXPERIMENTO DE LA COMETA DE FRANKLIN .....	41
4 LAS <i>CERFS-VOLANTS ELECTRIQUES</i> DE ROMAS .....	45
5 LA COMETA EN LOS ESTUDIOS DE LA ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA DURANTE LOS SIGLOS XVIII Y XIX....	49
6 CONCLUSIONES.....	55
<b>3 LA COMETA Y LA MECÁNICA.....</b>	<b>57</b>
1 INTRODUCCIÓN.....	57
2 LOS EULER Y EL ESTUDIO DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS DESDE LA MECÁNICA RACIONAL.....	58
3 EL VUELO DE LA COMETA SEGÚN JOHANN ALBERT EULER .....	61
3.1 LA DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LA COMETA .....	62
3.2 LA FÍSICA DE LA COMETA .....	66
3.3 EL ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LA COMETA .....	69
3.4 APLICACIONES PRÁCTICAS.....	74
3.5 LA COMETA NO REMONTA EL VUELO.....	78
4 LA COMETA EN LAS OBRAS DE FÍSICA Y DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA DE LOS SIGLOS XVIII Y XIX.....	79
4.1 LA COMETA EN LOS TRATADOS Y ENCICLOPEDIAS DE FÍSICA DEL SIGLO XVIII Y XIX .....	80
4.2 LA COMETA COMO RECREACIÓN CIENTÍFICA.....	85
5 CONCLUSIONES.....	91
<b>4 COMETAS METEOROLÓGICAS .....</b>	<b>93</b>
1 INTRODUCCIÓN.....	93
2 EL NACIMIENTO DE LA AEROLOGÍA Y LA PREDICCIÓN DEL TIEMPO .....	94
3 PRIMERAS OBSERVACIONES CON GLOBOS Y COMETAS.....	100
4 SONDEOS CON COMETAS.....	103
4.1 COMETAS METEOROLÓGICAS TIPO HARGRAVE.....	106
4.2 PROCEDIMIENTO DEL SONDEO CON COMETAS.....	109
5 SONDEOS CON COMETAS EN ESPAÑA.....	112
6 SONDEOS CON GLOBOS .....	116
6.1 GLOBOS SONDA .....	116
6.2 GLOBOS PILOTO .....	117

7	METEORÓGRAFOS PARA GLOBOS Y COMETAS.....	120
8	CONCLUSIONES.....	125
<b>5</b>	<b>LA COMETA Y EL AEROPLANO .....</b>	<b>127</b>
1	INTRODUCCIÓN.....	127
2	PRIMEROS DESARROLLOS EN LA TECNOLOGÍA DEL AEROPLANO.....	131
2.1	<i>PROBLEMAS TEÓRICOS FRENTE A SOLUCIONES PRÁCTICAS .....</i>	<i>132</i>
2.2	<i>PRIMERAS MÁQUINAS VOLADORAS MÁS PESADAS QUE EL AIRE.....</i>	<i>137</i>
3	LA OBRA AERONÁUTICA DE LAWRENCE HARGRAVE. LA COMETA CELULAR.....	141
4	LA COMETA COMO ENSAYO DEL AEROPLANO.....	146
4.1	<i>ENSAYOS CON PLANEADORES Y COMETAS .....</i>	<i>146</i>
4.2	<i>LOS ENSAYOS DIRECTOS CON COMETAS EN EL AEROPLANO DE LOS HERMANOS WRIGHT .....</i>	<i>152</i>
5	EL AUGE DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	154
6	EPÍLOGO: LAS COMETAS TETRAÉDRICAS DE ALEXANDER GRAHAM BELL.....	156
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>161</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>169</b>
<b>1</b>	<b>LA COMETA EN JORGE JUAN Y SANTACILIA .....</b>	<b>169</b>
1	INTRODUCCIÓN.....	169
2	LA RAZÓN COMPUESTA DUPLICADA FRENTE A LA SIMPLE RAZÓN .....	170
3	EL MODELO DE LA COMETA SEGÚN JORGE JUAN .....	177
4	TRANSCENDENCIA DEL MODELO DE LA COMETA DE JORGE JUAN.....	184
<b>2</b>	<b>OTROS USOS DE LAS COMETAS .....</b>	<b>187</b>
1	INTRODUCCIÓN.....	187
2	COMETAS TRIPULADAS.....	187
2.1	<i>SISTEMAS DE ELEVACIÓN DE PERSONAS CON COMETAS .....</i>	<i>187</i>
2.2	<i>COMETAS EN APLICACIONES MILITARES .....</i>	<i>190</i>
3	FOTOGRAFÍA AÉREA CON COMETAS (KAP) .....	198
4	SOCIEDADES DE AFICIONADOS Y VUELOS DE COMETAS .....	202
5	COMETAS PARA SALVAMENTO MARÍTIMO .....	204
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>211</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIG. 1 COMETAS PLANAS .....	18
FIG. 2 PORTADA <i>THE MYSTERYES OF NATURE AND ART</i> (1634) DE JOHN BATE (1). COMETA DE BATE (2). VERSIÓN DE LA COMETA DE DELLA PORTA EN <i>MUNDUS SUBTERRANEUS</i> (1665) DE ATHANASIVS KIRCHER (1601-1680) (3). COMETA DEL CÓDICE DE VIENA (1430) (4). COMETA ESTANDARTE EN <i>BELLIFORTIS</i> (1405) DE KYESER (5). COMETA DE PERA DE POCOCK (6) .....	19
FIG. 3 ROGALLO CON SU COMETA DELTA (1). PRUEBAS DEL PARACAÍDAS CON UNA CAPSULA GÉMINIS (2) (NASA) .....	20
FIG. 4 PATENTE DE LA COMETA DE EDDY (1900) (1). REPRODUCCIÓN EN VUELO DE UNA COMETA DE EDDY (2). GEORGE STEPHEN KEMP (1857-1933) ASISTENTE DE MARCONI CON UNA COMETA <i>LEVITOR</i> USADA PARA ELEVAR UNA ANTENA EN LOS EXPERIMENTOS DE LA PRIMERA TRANSMISIÓN DE RADIO TRANSATLÁNTICA EN <i>SIGNAL HILL</i> (SAN JUAN DE TERRANOVA) (3). GARBADO DEL TENDIDO DE LA ANTENA EN <i>SIGNAL HILL</i> EL 12 DE DICIEMBRE DE 1901 (4). COMETAS <i>ROLLOPLANO</i> (5-6). COMETA <i>ROLLER</i> (7) .....	21
FIG. 5 <i>SANJO-ROKKAKU</i> (1). <i>EDDO</i> (2). COMETA DE COMBATE INDIA (3). <i>NAGASAKI HATA</i> (4).....	22
FIG. 6 REPRODUCCIÓN DE LA COMETA DE HARGRAVE (1). PLANO DE LA COMETA EN LA OBRA DE LECORNU <i>LES CERFS-VOLANTS</i> (1910) (2).....	23
FIG. 7 REPRODUCCIÓN ACTUAL DE UNA COMETA DE CODY (1). PATENTE DE LA COMETA DE CODY (1901) (2). COMETA DE BELL COMPUESTA DE 1300 CÉLULAS TETRAÉDRICAS, BAUTIZADA CON EL NOMBRE <i>FROST KING</i> (3). COMETA DE CONYNE (4).....	24
FIG. 8 PATENTE DE LA COMETA DE BELL (1907) (1) Y DE CONYNE (1902) (2).....	25
FIG. 9 PATENTES DE LA COMETA DE FRANCIS ROGALLO (1951) (1) Y WILLIAM M. ALLISON (1956) (2).....	25
FIG. 10 COMETA DE ALLISON (1), MODIFICACIÓN DE FRANK SCOTT (2) (3) Y EDWIN L. GRAUEL (4). COMETA CON TUBOS HINCHABLES (5).....	26
FIG. 11 PATENTE DE JALBERT (1). <i>PARAFOIL</i> (2). <i>FLOWFORM</i> (3). ESCULTURAS VOLANTES TIPO <i>PARAFOIL</i> (4) .....	27
FIG. 12 <i>DRACOS</i> EN LA COLUMNA DE TRAJANO (SIGLO I) (1). ESTANDARTES <i>DRACO</i> EN EL TAPIZ DE BAYEUX (SIGLO XI) (2). <i>DRACO</i> CON ANTORCHA EN EL CÓDICE <i>PSALTERIUM AUREUM</i> DEL SIGLO IX (3).....	28
FIG. 13 GRABADO DEL <i>DE NOBILITATIBUS</i> (1326), DE MILEMETE (1). VERSIÓN DE LA COMETA PLANA DE DELLA PORTA EN EL <i>DELICIA PHYSIC-MATHEMATICAE</i> (1636), DE SCHWENTER (2). VERSIÓN DE LA COMETA PLANA DE DELLA PORTA EN EL <i>ARS MAGNA LUCIS ET UMBRAE</i> (1646), DE KIRCHER (3). ESTRUCTURA CON FORMA DE DRAGÓN EN EL <i>DELICIA PHYSIC-MATHEMATICAE</i> (1636), DE SCHWENTER (4). SACO DE VIENTO MUSICAL EN EL <i>MUSURGIA UNIVERSALIS</i> (1650), KIRCHER (5). SACOS DE VIENTO EN EL <i>KODOMONO HI</i> (FESTIVAL DE LOS NIÑOS) EN JAPÓN (6). REPRODUCCIÓN ACTUAL DE UN SACO DE VIENTO COMETA EN FORMA DE DRAGÓN (7).....	30
FIG. 14 AUTOGIRO CIERVA C.8W (1). <i>FOCKE-ACHGELIS FA 330</i> EN VUELO ARRASTRADO POR UN SUBMARINO ALEMÁN DURANTE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL (2). REPRODUCCIÓN ACTUAL DEL FA 330 (3). COMETA ROTOR ACTUAL (4) .....	31
FIG. 15 TIPOS DE COMETAS DE VARIOS HILOS (1). MODOS DE CONTROLAR UNA COMETA DE DOS HILOS (2) Y DE CUATRO HILOS (3).....	32
FIG. 16 PRÁCTICA DEL <i>KITESURF</i> (1). <i>COMETA-VELA</i> PROPULSORA PARA BARCOS (2) .....	33
FIG. 17 FRONTISPICIO DE LA OBRA DEL ABATE FRANCIS JEAN-ANTOINE NOLLET (1700-1770) <i>ESSAI SUR L'ELECTRICITE DES CORPS</i> (1746). EN EL MISMO SE REPRODUCE EL MÁS FAMOSO EXPERIMENTO ELÉCTRICO DEL FÍSICO EXPERIMENTAL INGLÉS STEPHEN GRAY (1666-1736). A UN MUCHACHO SUSPENDIDO HORIZONTALMENTE POR MEDIO DE UNOS HILOS DE SEDA, SE LE ACERCA UN TUBO DE VIDRIO CARGADO OBSERVANDO QUE PODÍA ATRAER OBJETOS CON LAS MANOS Y LA NARIZ .....	35
FIG. 18 GRABADO DE LA OBRA <i>EXPERIMENTS AND OBSERVATIONS ON ELECTRICITY</i> DE FRANKLIN (1751) (1). GRABADO MOSTRANDO EL EXPERIMENTO DE MARLY EN LA OBRA <i>LES MERVEILLES DE LA SCIENCE</i> (1867) DE LOUIS FIGUIER (2). RETRATO DE FRANKLIN, PINTADO EN 1762 POR EL ARTISTA INGLÉS MASON CHAMBERLIN (1727-1787), DONDE SE OBSERVA LAS CAMPANAS DETECTORAS DE TORMENTAS (3). FUNCIONAMIENTO DE LAS CAMPANAS DE FRANKLIN (4). 40	40
FIG. 19 ESQUEMA DEL EXPERIMENTO DE LA COMETA DE FRANKLIN (ARRIBA IZQUIERDA). EN SU <i>HISTORY AND PRESENT STATE OF ELECTRICITY</i> (1767), PRIESTLEY, SOSTIENE QUE BENJAMÍN FRANKLIN, DURANTE EL EXPERIMENTO, FUE AYUDADO POR SU HIJO WILLIAM FRANKLIN (1730-1813). LA VARIADA ICONOGRAFÍA DEL EXPERIMENTO, SOBRE TODO DURANTE EL SIGLO XIX, REFLEJA ESTA CIRCUNSTANCIA .....	42
FIG. 20 ALGUNOS EJEMPLOS DE LA ICONOGRAFÍA POPULAR DEL EXPERIMENTO DE LA COMETA DE FRANKLIN: SELLO CONMEMORATIVO DEL 250 ANIVERSARIO DEL NACIMIENTO DE BENJAMÍN FRANKLIN (1). DÓLAR DE PLATA CONMEMORATIVO DEL TRICENTENARIO DE SU NACIMIENTO (2006) (2). ANUNCIO PUBLICITARIO DE 1953 DE LA COMPAÑÍAS DE MANUFACTURAS DE COBRE <i>CHASE BRASS AND COPPER COMPANY, INCORPORATION</i> SITUADA EN	

WATERBURY CONNECTICUT (USA) (3). ANUNCIO PUBLICITARIO DE 1939 DE LA MARCA DE WHISKEY <i>HAIG &amp; HAIG FIVE STAR PINCH SCOTCH</i> (4) JARRA DE CERVEZA CON EL BUSTO DE FRANKLIN (5) .....	44
FIG. 21 GRABADO DEL EXPERIMENTO DE ROMAS SEGÚN SU <i>MÉMOIRE, SUR LES MOYENS...</i> (1776) (1). GRABADO DEL CARRO ELÉCTRICO DE ROMAS SEGÚN EL <i>DICTIONNAIRE DE PHYSIQUE</i> (1781) DE BRISSON (2). GRABADOS DE LA REVISTA FRANCESA <i>LA NATURE</i> DE 1877, DESCRIBIENDO LAS EXPERIENCIAS DE ROMAS (3) .....	46
FIG. 22 EXPERIMENTO DE ROMAS REALIZADO EN NÉRAC (FRANCIA) EL 7 DE JUNIO DE 1753, EN EL QUE SE VE UTILIZANDO UN <i>EXCITADOR</i> , SEGÚN EL GRABADO DE LA OBRA <i>LES MERVEILLES DE LA SCIENCE</i> (1867) DE LOUIS FIGUIER (1). COMETA ORIGINAL DEL SIGLO XVIII DEL TIPO UTILIZADO POR ROMÁS (2). EXPERIMENTO DE FRANKLIN EN <i>LES MERVEILLES DE LA SCIENCE</i> (1867) DE LOUIS FIGUIER (3). <i>LA COMETA</i> (1778) DE FRANCISCO DE GOYA (1746-1828) (4) .....	47
FIG. 23 <i>TREATISE</i> (1782) DE CAVALLO: FIG. 8 DE LA PLANCHA II (1). FIG. 4 DE LA PLANCHA I (2). FIG. 8 DE LA PLANCHA III (3). FIG. 1 Y 2 DE LA PLANCHA III (4) .....	49
FIG. 24 EQUIPAMIENTO PARA EXPERIMENTOS CON COMETAS EN <i>PRACTICAL ELECTRICITY AND GALVANISM</i> (1821) DE CUTHBERTSON .....	53
FIG. 25 MÁQUINAS HIDRÁULICAS ESTUDIADAS POR JOHANN ALBERT EULER EN SU MEMORIA (A2) <i>ENODATIO QUAESTIONIS QUOMODO VIS AQUAE ALIUSVE FLUIDI...</i> ESCRITA EN 1754. FRENTE AL MODELO GEOMÉTRICO DE LAS MISMAS SE MUESTRA UN GRABADO SEGÚN LA <i>ENCICLOPEDIA</i> .....	60
FIG. 26 MODELO GEOMÉTRICO DE LA COMETA SEGÚN J. A. EULER .....	62
FIG. 27 MODELO GEOMÉTRICO DE UN MOLINO SEGÚN LEONARD EULER (IZQUIERDA), COMPARADO CON LA REPRESENTACIÓN DE LA MISMA MÁQUINA EN LA PLANCHA <i>HYDRAULIQUE MOULINS A VENT DE MEUDON</i> EN LA <i>ENCICLOPEDIA DE DIDEROT Y D'ALEMBERT</i> (1751-72) .....	63
FIG. 28 LOS TRES MODELOS PARA LA COMETA EMPLEADOS POR J. A. EULER .....	64
FIG. 29 TEORÍA DE IMPACTO .....	67
FIG. 30 PRIMER MODELO DE LA COMETA DE J. A. EULER .....	69
FIG. 31 SEGUNDO MODELO DE LA COMETA DE EULER .....	71
FIG. 32 ADICIÓN A LA MEMORIA DE J. A. EULER .....	73
FIG. 33 APLICACIÓN PRÁCTICA DEL PRIMER MODELO PARA LA COMETA DE J. A. EULER .....	75
FIG. 34 APLICACIÓN PRÁCTICA DEL SEGUNDO MODELO PARA LA COMETA DE J. A. EULER .....	76
FIG. 35 APLICACIÓN PRÁCTICA DEL TERCER MODELO PARA LA COMETA DE J. A. EULER .....	77
FIG. 36 PLANCHA XIII DEL VOLUMEN PRIMERO DEL <i>INTRODUCTIO AD PHILOSOPHIAM NATURALEM</i> (1762) DE MUSSCHENBROEK .....	80
FIG. 37 PLANCHA 2 DEL SUPLEMENTO A <i>L'ENCYCLOPÉDIE</i> , LA COMETA APARECE EN LA PARTE SUPERIOR DERECHA .....	81
FIG. 38 GRABADO DEL ESQUEMA DEL VUELO DE UNA COMETA DEL <i>LECTURES ON NATURAL PHILOSOPHY AND MECHANICAL ARTS</i> (1807) DE YOUNG (1). GRABADO DEL TÉRMINO <i>DRACHE, ELEKTRISCHER</i> ESCRITO POR BRANDES EN EL DICCIONARIO ALEMÁN <i>PHYSIKALISCHES WÖRTERBUCH</i> (1825-1845) (2) .....	82
FIG. 39 FRONTISPICIO DE <i>LECTURES ON ELECTRICITY</i> (1844) DE NOAD .....	84
FIG. 40 EL <i>DRAGON VOLADOR</i> EN EL TOMO 4 DE LA EDICION DE 1775 DE <i>NOUVELLES RECREATIONS PHYSIQUES ET MATHEMATIQUES</i> DE GUYOT .....	86
FIG. 41 DIBUJOS DEL <i>PHILOSOPHY IN SPORT</i> (1853): MR. TWADDLETON Y LA FAMILIA SEYMOUR ESTUDIANDO LA CAÍDA DE LOS GRAVES EN UN POZO (1). JUEGOS AL <i>AIRE LIBRE</i> (2). VOLANDO COMETAS (3). CENTRO DE GRAVEDAD EN UNA COMETA (4). CONSTRUCCIÓN DE LA COMETA (5). COMPOSICIÓN DE FUERZAS EN EL VUELO DE UNA COMETA (6). COMPOSICIÓN DE MOVIMIENTOS (7) .....	88
FIG. 42 COMETA DE PAPIROFLEXIA (1) Y COMETA PLANA Y CELULAR (2) EN EL <i>CIENCIA RECREATIVA</i> DE ESTALELLA. COMPOSICIÓN DE FUERZAS EN UNA COMETA EN <i>FÍSICA RECREATIVA</i> DE PERELMAN (3) .....	90
FIG. 43 PRIMEROS MAPAS METEOROLÓGICOS. ESTE MAPA MUESTRA UNA DEPRESIÓN SOBRE EL ESTE DE ESTADOS UNIDOS EN 1842. PUEDEN VERSE LAS ISOLINEAS DE PRESIÓN Y DE TEMPERATURA. LAS FLECHAS REPRESENTABAN LA DIRECCIÓN DEL VIENTO Y LOS DISTINTOS COLORES LAS ÁREAS CON CIELO DESPEJADO, NUBLADO, CON LLUVIA O CON NIEVE .....	95
FIG. 44 PARTICIPANTES EN EL II CONGRESO METEOROLÓGICO INTERNACIONAL, ROMA 1879. EL TERCERO POR LA IZQUIERDA, ENTRE LOS SENTADOS, ES D. ANTONIO AGUILAR Y VELA, DIRECTOR DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO Y METEOROLÓGICO DE MADRID. DE PIE JUSTO DETRÁS DE AGUILAR APARECE D. CECILIO PUJAZÓN, DIRECTOR DEL REAL OBSERVATORIO DE SAN FERNANDO .....	97
FIG. 45 INSTRUMENTOS DE GLAISER PARA SER TRANSPORTADOS EN UN GLOBO TRIPULADO (1). METEORÓGRAFO DE RICHARD ASSMANN (2) .....	101
FIG. 46 TREN DE COMETAS DE EDDY EN EL OBSERVATORIO DE <i>BLUE HILL</i> (ESTADOS UNIDOS), GRABADO DEL <i>SCIENTIFIC AMERICAN</i> DE 15 DE SEPTIEMBRE DE 1894 (1). GRABADO DE UNA COMETA CELULAR DE HARGRAVE (2). GLOBO COMETA (3) .....	104

FIG. 47 COMETA DE POTTER (1). COMETA METEOROLÓGICA DE <i>MARVIN-HARGRAVE</i> EMPLEADA EN EL <i>U.S. WEATHER BUREAU</i> (2). EL METEORÓLOGO INGLÉS W. H. DINES Y SU MODELO DE COMETA DE HARGRAVE (3) LANZAMIENTO DE UNA COMETA DE DINES DESDE UN BARCO (1910) (4).....	107
FIG. 48 ESTRUCTURA (1) DE LA <i>SCHIRMKASTENDRACHEN</i> (COMETA PARAGUAS INGLÉS) (2). DETALLES CONSTRUCTIVOS DE LA DENOMINADA <i>GRUNDSCHER DRACHEN</i> USADA EN ALEMANIA, DURANTE LA SEGUNDA DÉCADA DEL SIGLO XX (3).108	
FIG. 49 EVOLUCIÓN DE LOS TORNOS USADOS EN BLUE HILL (ESTADOS UNIDOS) A FINALES DEL XIX (1). COMETA PRINCIPAL Y DE SEGURIDAD TRANSPORTANDO EL METEORÓGRAFO EN UN SONDEO S FINALES DEL SIGLO XIX (2). CASETA DEL TORNO EN EL OBSERVATORIO DE LINDENBERG (ALEMANIA) (3). ORGANIZACIÓN DE LA LÍNEA AÉREA, SEGÚN LA OBRA DE FRANCISCO DE PAULA Y ROJAS <i>APLICACIÓN DE LAS COMETAS A LA METEOROLOGÍA</i> (1919) (4). SISTEMA DE SUJECCIÓN DE LA COMETA AUXILIAR (KLEINSCHMIDT, 1935, P. 490) (5). LANZAMIENTO DE UNA COMETA METEOROLÓGICA EN 1899 (6).....	110
FIG. 50 RED AEROLÓGICA DE ESPAÑA EN 1946. INCLUIDO EN LA PUBLICACIÓN DE LA SERIE C (INSTRUCCIONES), NÚMERO 19, DE LA OFICINA CENTRAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, TITULADA <i>EL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL DE ESPAÑA (ANTECEDENTES Y ORGANIZACIÓN)</i> . “...TAN PRONTO COMO PUEDAN SER VENCIDAS LAS PRESENTES DIFICULTADES, PUEDEN FUNCIONAR NORMALMENTE TODOS LOS OBSERVATORIOS AEROLÓGICOS QUE FIGURAN EN EL MAPA NÚMERO 1. LOS SONDEOS AEROLÓGICOS, TANTO EN AVIÓN COMO POR MEDIO DE RADIOSONDA, SERÁN EFECTUADOS CON REGULARIDAD, Y PARA COMPLETAR LOS DATOS DE ELLOS SE CONTARÁ CON LAS OBSERVACIONES DE LOS OBSERVATORIOS DE MONTAÑA, CUYA CONSTRUCCIÓN ESTÁ EN EJECUCIÓN, ADEMÁS DE LOS QUE EN EL MISMO MAPA SE MARCAN COMO PROYECTADOS, PERO CUYA INSTALACIÓN NO HA DE TARDAR.” (P.25)..	112
FIG. 51 SONDEO TERMODINÁMICO EN IZAÑA CON COMETA A MITAD DEL SIGLO XX (1). METEORÓGRAFO <i>GEBRÜDER-WINTER</i> (Nº 932) EMPLEADO EN LOS SONDEOS (2). BOMBA DE VACÍO PARA CALIBRAR LOS METEORÓGRAFO (3) <i>GRUNDSCHER DRACHEN</i> EMPLEADAS EN EL OBSERVATORIO DE LINDENBERG. EN IZAÑA SEGÚN EL INVENTARIO DE 1958 POSEÍA UNA COMETA DE 42 m <sup>2</sup> , DOS DE 16 m <sup>2</sup> Y UNA DE 25 m <sup>2</sup> (4).....	115
FIG. 52 LANZAMIENTO DE UN GLOBO SONDA (1904) (1) MÉTODOS DE COLOCAR EL PARACAÍDAS EN UN GLOBO SONDA SEGÚN ASSMANN (2) (3).....	117
FIG. 53 BALANZA PARA LASTRAR GLOBOS.....	118
FIG. 54 LANZAMIENTO DE UN GLOBO PILOTO (1). TEODOLITO DE A. DE QUERVAIN (1905) PARA SONDEOS CON GLOBOS PILOTO (2). FUNDAMENTO DE LA OBSERVACIÓN CON GLOBOS PILOTO (3).....	119
FIG. 55 REGISTROS DE UN METEORÓGRAFO.....	121
FIG. 56 METEORÓGRAFO <i>BOSCH – HERGESELL</i> (1). TERMÓGRAFO (2) PARTES DE UN TERMÓGRAFO DE RICHARD GRABADO DEL <i>SCIENTIFIC AMERICAN</i> DE 15 DE SEPTIEMBRE DE 1894 (3) METEORÓGRAFO DE CUATRO ELEMENTOS (1899) (4) TERMOANEMÓGRAFO (1895) (5). METEORÓGRAFO DE RICHARD. (6).....	122
FIG. 57 METEORÓGRAFO DE <i>MARVIN</i> (1). METEORÓGRAFO DE <i>MARVIN – ASSMMAN</i> (2). METEOROGRAFO DE <i>DINES</i> (3): (A) MANECILLAS PARA REGISTRAR LA LECTURA DEL HUMEDAD. (B) PRESIÓN BAROMÉTRICA. (C) TEMPERATURA. (D) VELOCIDAD DEL VIENTO. (E) RECIPIENTE CONTENIENDO EL PELO DEL HIGRÓMETRO. (F) MECANISMO DE LECTURA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO. (G) TUBO DE COBRE CONTENIENDO ALCOHOL QUE CONSTITUYE EL TERMÓMETRO. (H) MECANISMO DE RELOJERÍA PARA MOVER EL DISCO GRÁFICO. (I) CAJA ANEROIDE DEL BARÓMETRO.....	123
FIG. 58 FORMA DE COLOCAR LOS METEORÓGRAFOS EN EL OBSERVATORIO DE <i>BLUE HILL</i> (ESTADOS UNIDOS): EN (A) EL METEORÓGRAFO ESTÁ COLOCADO DENTRO DE LA COMETA, PERO EL ANEMÓMETRO SE ENCUENTRA SUSPENDIDO. EN (B) EL METEORÓGRAFO ESTÁ SUSPENDIDO DEL CABLE DE LA COMETA (1). METEORÓGRAFO DE <i>MARVIN</i> COLOCADO EN LA ESTRUCTURA DE UNA COMETA DEL <i>U.S. WEATHER BUREAU</i> (2).....	125
FIG. 59 DISCO DE PLATA, QUE SE CONSERVA EN EL <i>SCIENCE MUSEUM</i> DE LONDRES, EN EL QUE CAYLEY DIBUJA, EN 1799, EL PROBLEMA MECÁNICO DE UNA MÁQUINA VOLADORA MÁS PESADA QUE EL AIRE (1) DIAGRAMA DE FUERZAS SOBRE UNA PLACA EXPUESTA A UNA CORRIENTE DE AIRE (2).....	131
FIG. 60 LAS TRES ECUACIONES DE EULER PARA UN FLUIDO INCOMPRESIBLE Y NO VISCOSO EN EL PÁRRAFO XXI DE LA MEMORIA <i>PRINCIPES GÉNÉRAUX DU MOUVEMENT DES FLUIDES</i> (1755).....	133
FIG. 61 ECUACIONES DE <i>NAVIER – STOKES</i> . DONDE $u, v, w$ SON LAS TRES COMPONENTES DEL VECTOR VELOCIDAD $V(x, y, z, t)$ , $G_x, G_y, G_z$ SON LAS COMPONENTES DE LA FUERZA DE GRAVEDAD POR UNIDAD DE VOLUMEN, $p(x, y, z)$ ES LA PRESIÓN POR UNIDAD DE VOLUMEN EN UN PUNTO, $\rho$ ES LA DENSIDAD Y $\epsilon$ REPRESENTA EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DEL FLUIDO.....	134
FIG. 62 BALANZA EMPLEADA EN LOS EXPERIMENTOS DE CARLEY (1). PERFILES CURVADOS PATENTADOS POR HORATIO F. PHILLIPS (2).....	135
FIG. 63 PRIMERA PÁGINA DE LA REVISTA INGLESA <i>ILLUSTRATED TIMES</i> DE 4 JULIO DE 1868, CON UN GRABADO DE LA EXHIBICIÓN DE <i>AERONAUTICAL SOCIETY OF GREAT BRITAIN</i> EN EL <i>CRYSTAL PALACE</i> DE LONDRES (1). TRIPLANO DE STRINGFELLOW (1868) (2).....	137

FIG. 64 PLANEADOR DE CAYLEY DE 1804 (1). PLANEADOR DE CAYLEY (1818) (2). <i>GOVERNABLE PARACHUTES</i> (1852) (E) COLA PARA EL CONTROL DE ELEVACIÓN Y CABECEO, POR PARTE DEL PILOTO. (D) COLA AJUSTABLE MEDIANTE EL CABLE (B) (3).....	139
FIG. 65 MONOPLANO DE MOY (1879) (1). MAQUINA VOLADORA DE MAXIM (1874) (2). <i>ÉOLE</i> DE ADER (1890) (3)....	140
FIG. 66 MÁQUINA VOLADORA DE MOTOR AIRE COMPRIMIDO (1891) (1). COMETAS EXPERIMENTALES (1893) (2). REPRODUCCIÓN Y PLANO DE LA COMETA CELULAR DE HARGRAVE (3). TREN DE COMETAS DE HARGRAVE, CON EL QUE VOLÓ EL 12 DE NOVIEMBRE DE 1894, EN LA PLAYA DE STANWELL PARK (NUEVA GALES DEL SUR. AUSTRALIA) (4) .	142
FIG. 67 REMOLINO FORMADO SEGÚN HARGRAVE DEBAJO DE UNA SUPERFICIE CURVA DE UN ALA (HARGRAVE, 1898, P. 219) (1). APARATO EXPERIMENTAL DE HARGRAVE PARA DEMOSTRAR LA MAYOR SUSTENTACIÓN GENERADA POR UNA SUPERFICIE CURVA (2). <i>SOARING KITE</i> (1897) (3). DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA PROBAR LA EFICACIA DE LAS COMETAS PLAYA DE <i>STANWELL PARK</i> (NUEVA GALES DEL SUR. AUSTRALIA). SOLTANDO LA COMETA EN A, COMPROBABA SI VOLABA A SOTAVENTO (B) O A BARLOVENTO (C), ES DECIR, AVANZABA RESPECTO DEL VIENTO, COMO HACEN LOS PÁJAROS CUANDO PLANEAN (4). <i>SOARING MACHINES</i> (1898) (5) .....	143
FIG. 68 PLANEADOR CON FLOTADORES DE <i>VOISIN-ARCHDEACON</i> (1905) (1). <i>AEROPLANO-FARMAN</i> (1909) (2). <i>AEROPLANO 14BIS</i> DE SANTOS-DUMONT (1906) (3) .....	146
FIG. 69 BALANZAS UTILIZADAS POR LILIENTHAL PARA HALLAR LAS FUERZAS GENERADAS EN LOS PERFILES (1). RECORRIDO DE UNA CORRIENTE DE AIRE SOBRE UN PLANO Y UNA SUPERFICIE CURVA SEGÚN LILIENTHAL (2) COMETAS DE LILIENTHAL (1874) (3).....	147
FIG. 70 PLANEADORES DE LILIENTHAL (1). COLINA ARTIFICIAL EN <i>GROSS LICHTERFELDE</i> (BERLIN) (2). DIFERENTES RECORRIDOS DE LOS DISTINTOS PLANEADORES DESDE LA COLINA DE <i>GROSS LICHTERFELDE</i> (3) .....	149
FIG. 71 <i>LADDER KITE</i> DE CHANUTE (1895), QUE CONSTRUYO HERRING (SHORT, 2011, FOTO P. 207) (1). PLANEADOR BASADO EN EL TABAJO DE LILIENTHAL, FORMADO POR SEIS ALAS DOBLES (CHANUTE, 1897, PLATE V) (2). COMETA DE HERRING (1896) (HERRING, 1897, PLATE XI) (3). PLANEADOR BIPLANO DE CHANUTE (1896) (4).....	151
FIG. 72 DIBUJO DE LA COMETA DE 1899, REALIZADO EN 1912 NO SE CONSERVAN FOTOS DE SU VUELO (1). PLANEADOR VOLANDO COMO UNA COMETA EL 5 DE OCTUBRE DE 1900 (2). PLANEADOR DE 1901 VOLANDO COMO COMETA (3). PLANEADOR DE 1902 VOLANDO COMO COMETA (4). CONTROL DE LOS TRES EJES (CABECEO, ALABEO Y GUILLADA) DEL <i>FLYER I</i> (5) .....	153
FIG. 73 VUELO DEL <i>FLYER I</i> , EL 17 DE DICIEMBRE DE 1903, PILOTADO POR ORVILLE, CORRIENDO EN EL LADO DEL ALA WILBUR .....	154
FIG. 74 DIBUJOS DE LAS ESTRUCTURAS TETRAÉDRICAS BÁSICAS EN EL ARTÍCULO DEL <i>NATIONAL GEOGRAPHIC MAGAZINE</i> ...	157
FIG. 75 <i>FROST KING</i> (1905) (1). <i>CYGNET I</i> (1908) (2). <i>CYGNET II</i> (1909) (3). <i>AEROPLANO JUNE BUG</i> DISEÑADO POR GLENN CURTISS (1908) (4). <i>AEROPLANO RED WING</i> DE THOMAS SELFRIDGE (1908) (5).....	159
FIG. 76 ILUSTRACIÓN QUE ACOMPAÑA EN RELATO <i>LA COMETA DE SIM VEDDER</i> DONDE SE MUESTRA UNA GRAN COMETA PLANA HEXAGONAL TIPO <i>PUERTA DE GRANERO</i> , AL FONDO, SUJETA POR UN HOMBRE EN POSICIÓN VERTICAL, SE VE UNA COMETA PLANA CON <i>FORMA DE PERA</i> . ESTE ÚLTIMA FORMA ES LA MÁS UTILIZADA EN LA ICONOGRAFÍA POPULAR DE LA COMETA EN LA INGLATERRA DEL SIGLO XIX, EN CONTRASTE CON LA <i>PUERTA DE GRANERO</i> PROPIA DE LAS ILUSTRACIONES EN LOS CUENTOS NORTEAMERICANOS (VAN RIET, 2012, P. 60) .....	167
FIG. 77 SOBRE LA FIG. 2 DE <i>PLANCHA XV</i> DE LA <i>L'ENCYCLOPEDIE DE DIDEROT ET D'ALEMBERT</i> SE HAN DIBUJADO LA FUERZA L GENERADA EN LA VELA (ED) PARA UN VIENTO DE VELOCIDAD W, Y LA RESISTENCIA D QUE OFRECE LA FRACCIÓN DEL CASCO QUE RECIBE LA CORRIENTE (ZONA REMARCADA). M ES EL MOMENTO GENERADO POR EL TIMÓN Y LAS VELAS ASIMÉTRICAS PARA QUE EL BARCO NAVEGUE DE MANERA ESTABLE. EL ÁNGULO DE DERIVA ( $\lambda$ ) ES EL ÁNGULO QUE FORMA LA LÍNEA DE PROA A POPA CON LA DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL NAVÍO RESPECTO AL AGUA (Vs) .....	170
FIG. 78 FUERZA SOBRE UNA SUPERFICIE SUMERGIDA EN UN FLUIDO SEGÚN LA TEORÍA DE JORGE JUAN .....	173
FIG. 79 MODELO GEOMÉTRICO DE LA COMETA EN JORGE JUAN. SE HA SEÑALADO EL HILO, LA BRIDA Y LA COLA .....	179
FIG. 80 MODELO GEOMÉTRICO DE LA COMETA DE JORGE JUAN, EN EL QUE SE HAN REPRESENTADO LAS FUERZAS ACTUANTES Y EL VALOR DE LAS DIMENSIONES DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA PLANTEADA ENTRE LOS PÁRRAFOS 47 A 59 DEL APÉNDICE I DEL <i>EXAMEN MARÍTIMO</i> .....	180
FIG. 81 MODELO GEOMÉTRICO DE LA COMETA DE JORGE JUAN REDUCIDO AL MODELO SEGUNDO DE J. A. EULER.....	181
FIG. 82 COMETA DE MAILLOT 1886 (1). SISTEMA DE LAMSON (2). ASCENSIÓN CON EL SISTEMA DE WISE 1896 (3). LANZAMIENTO DE UN TREN DE COMETAS <i>LEVITOR</i> (4). ASCENSIÓN DEL CAPITÁN BADEM-POWELL (5). ESQUEMA DEL SISTEMA DE BADEN-POWELL (6).....	188
FIG. 83 MODELO ALEMÁN DE GLOBO-COMETA <i>PARSEVAL</i> (1). MODELO FRANCÉS DE GLOBO-COMETA <i>CAQUOT B</i> (2).....	190
FIG. 84 COMETA (1) Y SISTEMA (2) DE SCHREIBER (1903). COMETA (3) Y SISTEMA (4) DE MADIOT (1909). COMETA (5) Y SISTEMA (6) DE SACONNEY (1910). (7) ELEVACIÓN DEL SISTEMA DE SACONNEY EN EL CRUCERO DE GUERRA FRANCÉS <i>EDGARD GUINIET</i> EL 8 DE SEPTIEMBRE DE 1911. SISTEMA (8) Y COMETA (9) COMERCIALIZADA EN 1911 POR LA CASA FRANCESA AUG. C. GOMES & C° .....	191

FIG. 85 CROMO ALEMÁN REPRESENTANDO LA COMETA DE CODY (1). CODY A LOS MANDOS DE UN AVIÓN (2). SISTEMA DE CODY EN UN BARCO DE LA MARINA INGLESA (3). EL MAN-LIFTING SYSTEM DE CODY (4).....	192
FIG. 86 ELEVACIÓN DE LA ANTENA DE MARCONI EN 1901 (1). COMETA TIPO COYNE UTILIZADA COMO ANTENA EN LOS AÑOS VIENTE DEL SIGLO XX (2). ELEVACIÓN DE UNA GIBSON GIRL (3). EQUIPAMIENTO COMPLETO (4). INSTRUCCIONES DE MONTAJE DE LA COMETA ANTENA (5). FORMA DE CONECTAR EL EMISOR (6).....	193
FIG. 87 ELEVACIÓN DE UNA COMETA EN EL BUQUE DE LA ARMADA ESTADOUNIDENSE USS MARYLAND EN 1916 (1). ELEVACIÓN EN EL USS FLORIDA (2). COMETA DE CODY UTILIZADA POR LA ARMADA BRITÁNICA (1903) (3). IZADO DE UNA NAVAL KITE EN UN CROMO DE LOS AÑOS VEINTE DEL SIGLO XX (4). ELEVACIÓN EN EL USS PILLSBURY EN 1925 (5).....	194
FIG. 88 USS NAVY TARGET KITE (1). FOTOGRAFÍA DE LA TARGET KITE APARECIDA EN LA REVISTA POPULAR MECHANIC. DIBUJOS DE STEWART ROUSE DEL USO DE LA TARGET KITE EN EL ARTÍCULO DE POPULAR SCIENCE 1945 (2). MECANISMOS DE CONTROL POR PARTE DEL PILOTO (3). OPERACIÓN DE LA COMETA DURANTE EL EJERCICIO DE TIRO (4). MANIOBRAS BÁSICAS (5).....	195
FIG. 89 BARRERA DE GLOBOS Y CABLES SOBRE EL CIELO DE LONDRES (1917-1918) (1). GLOBO BARRERA DURANTE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL (2). H. C. SAULS CON SU COMETA (3). MANIOBRAS DE DESPEGUE DE UNA COMETA BARRERA EN EL ATLÁNTICO, POPULAR SCIENCE MAGAZINE (1944) (4) .....	196
FIG. 90 NADAR ELEVANT LA PHOTOGRAPHIE A LA HAUTEUR DE L'ART, LITOGRAFIA DE HONORE DAUMIER, APARECIDA EN LE BOULEVARD, EL 25 DE MAYO DE 1863 (1). SISTEMA DE BATUT (1890) (2). FOTOGRAFÍA AÉREA DE LA CIUDAD DE LABRUGUIERE (FRANCIA) TOMADA POR BATUT EL 29 DE MARZO DE 1889 A 60 METROS (3). SISTEMA DE WENZ (1897) (4). COLOCACIÓN DE LA CÁMARA EN LA BRIDA DE LA COMETA EN EL SISTEMA DE WENZ (5). FOTOGRAFÍA AÉREA DE LA CIUDAD DE SABLES-D'OLONNES TOMADA CON EL SISTEMA DE WENZ (6) .....	199
FIG. 91 SISTEMA DE FOTOGRAFÍA CON COMETAS DESCRITO POR LECORNU EN LE CERF-VOLANT (1910) (1). MODOS DE COLOCACIÓN DE LA CÁMARA CON EL SISTEMA DE LECORNU (2). COMETA MULTICELULAR DE LECORNU (3). CATÁLOGO DE LA CASA AUG. C. GOMES & Cº (4). SISTEMA GOMES DE FOTOGRAFÍA (5). DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN Y DISPARO EN EL SISTEMA GOMES (6). FOTOGRAFÍA AÉREA DE LA PLACE PÉREIRE DE PARÍS TOMADA CON EL SISTEMA GOMES EL 11 DE ABRIL DE 1911 (7).....	200
FIG. 92 DIBUJO DE UN TREN DE COMETAS DE EDDY TRANSPORTANDO UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA McCLURE'S MAGAZINE (1896) (1). DIBUJO DEL DETALLE DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE EDDY CENTURY ILLUSTRATED MONTHLY MAGAZINE (1897) (2). FOTOGRAFÍA AÉREA DE NUEVA YORK TOMADA POR EDDY EN 1896 (3). SISTEMA DE PICAVET (1912) (4). SISTEMA DE FOTOGRAFÍA AÉREA CON UNA TREN DE COMETAS DE CODY (5). ELEVACIÓN DE LA SUSPENSIÓN DE LA CÁMARA DESDE EL BUQUE FRANCÉS DESAIX EN LA RADA DE MOGADOR (MARRUECOS) EN 1909 (6).....	201
FIG. 93 PORTADA DE LA REVISTA LE CERF-VOLANT SEPTIEMBRE 1910 (1). CARTEL DEL GRAND CONCOURS INTERNACIONAL DE CERF VOLANTS SCIENTIFIQUES ET MILITAIRES DE SPA (BELGICA) 1912 (2).....	202
FIG. 94 COMETA DE SALVAMENTO DE DANSEY (1822) (1). COMETA DE SALVAMENTO DE NARES (1861) (2). GRABADOS DEL LIBRO SEAMANSHIP QUE MUESTRAN EL USO DE LA COMETA DE NARES (3) (4).....	204
FIG. 95 COMETA DE BIOT (1). GRABADO DEL SISTEMA DE SALVAMENTO DE JOBERT (2) .....	206
FIG. 96 COMETA DE SALVAMENTO DE WOODBRIDGE. ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO (1). GRABADOS DE LOS USOS DE LA COMETA EN SALVAMENTO MARÍTIMO (2) (3) .....	207
FIG. 97 SISTEMA DE SALVAMENTO SOBRE EL SOPORTE DE LECORNU (1). SISTEMA DE BROSSARD DE CORBIGNY (2) (3): LA CUERDA DE LA COMETA SE ATABA EN EL PUNTO (A), MIENTRAS QUE LA BRIDA SUPERIOR (E) DE LA MISMA, SE HACÍA EN EL GANCHO (B). CUANDO LA COMETA SOBREVOLABA LA COSTA, SE ENVIABA UN MENSAJERO PROVISTO DE VELA (F), EL CUAL DISPARABA EL GANCHO (D) AL CHOCAR CON (C), SOLTANDO LA BRIDA (E) Y, POR LO TANTO, LA COMETA, SE DESESTABILIZABA Y CAÍA AL SUELO .....	208
FIG. 98 UTILIZACIÓN DE UN TREN DE COMETAS COMO POSTE DE SEÑALES SEGÚN UN GRABADO DE LA OBRA LE CERF-VOLANT DE LECORNU (1910) (1). GRABADO DE LA COMETA DE LA NOVELA DOS AÑOS DE VACACIONES DE VERNE (1888) (2). UTILIZACIÓN DE UNA COMETA DE SEÑALES EN UN NAUFRAGIO (3). COMETA MODERNA DE SALVAMENTO (4). COMETA REFLECTOR DE RADAR DE ROGALLO (1967) (5) .....	209
FIG. 99 USOS DE LAS COMETAS EN UNA ENCICLOPEDIA DE PRINCIPIOS DEL SIGLO XX .....	224



# 1 INTRODUCCIÓN

---

De la cometa encontramos por primera vez una definición en el *Diccionario de Autoridades* publicado por la *Real Academia Española* a finales del siglo XVIII:

Llaman tambien à una figúra que imita la del cometa, hecha de papel engrudado con sus alambres, y un cordel de muchas brazas de largo: la qual quando hai viento, dándolo cuerda, se remonta de manéra, que parece ave que vuela: y de noche la suelen poner unos farolillos con luz, con que burlan à ignorantes y muchachos, creyendo que es otra cosa. Lat. *Rhombus papyraceus, quem filo innixum, animi causa, pueri venti ludibrio committunt.* (RAE, 1729)

El Diccionario de la Real Academia Española, en su última edición<sup>1</sup>, define la palabra COMETA, en su segunda acepción, como:

f. Armazón plana y muy ligera, por lo común de cañas, sobre la cual se extiende y pega papel o tela; en la parte inferior se le pone una especie de cola formada con cintas o trozos de papel, y, sujeta hacia el medio a un hilo o bramante muy largo, se arroja al aire, que la va elevando, y sirve de diversión a los muchachos.

Como podemos comprobar, la definición no ha variado en más de doscientos cincuenta años. Es decir, a lo largo de los dos últimos siglos la cometa fue y aún continúa siendo un juguete. En esta Tesis pretendo rescatar la carrera científica y tecnológica de la cometa durante este mismo periodo, que podríamos delimitar simbólicamente entre 1752 y 1900. En 1752 Benjamín Franklin realiza su todavía hoy famoso experimento, elevando un pararrayos con una cometa en medio de una tormenta. En 1900 los hermanos Wright hacen volar por primera vez su planeador, cuyas alas diseñaron y probaron utilizando cometas como modelos a escala. Durante 150 años numerosos científicos y tecnólogos intentaron incorporar de múltiples modos la cometa al acervo científico. Pero, como se adivina ya en las definiciones anteriores, todos ellos fracasaron.

Esta Tesis doctoral pretende construir la biografía de la cometa como objeto científico y tecnológico *fracasado*. Detengámonos primero en intentar justificar esta idea, precisando ambos conceptos.

---

<sup>1</sup>La 22ª edición del año 2001.

## 1 OBJETOS CIENTÍFICOS

En una conferencia celebrada en 1966 ante *Société canadienne d'histoire et de philosophie des sciences*<sup>2</sup> (Montréal), el historiador y filósofo francés Georges Canguilhem (1904-1995) intentaba aclarar cuál era el objeto de la historia de la ciencia:

La historia de la ciencia es la historia de un objeto [un discurso] que es una historia, que tiene una historia; mientras que la ciencia es ciencia de un objeto que no es historia, que no tiene historia. (Canguilhem, 1983/2009, p. 205)

En esta frase Canguilhem intentaba distinguir entre lo que *históricamente* la historia de la ciencia ha tratado, es decir, los distintos *conocimientos* o *discursos metódicos* acerca de un objeto (naturaleza) como algo inamovible. Además, según este filósofo e historiador, este objeto natural o común sobre el que se articula el discurso no es un objeto científico<sup>3</sup>. La naturaleza no está formada por objetos y fenómenos científicos, sino que:

[e]s la ciencia la que constituye su objeto a partir del momento en que inventa un método para construir, a través de proposiciones susceptibles de ser compuesta integralmente, una teoría marcada por el miedo a ser sorprendida en un error. (Canguilhem, 1983/2009, p. 205)

Por lo tanto, distinguimos una separación de los aspectos epistemológicos de los ontológicos en el ámbito de la historia del conocimiento, “una dicotomía entre sujeto-historizado y objeto-eterno” (Moscoso, 2001, p. 151). Una versión más radical de esta Tesis, que nos sirve para ilustrar todo su alcance, la propuso el sociólogo de la ciencia francés Bruno Latour en su ensayo *La historicidad de las cosas. ¿Dónde estaban los microbios antes de Pasteur?* (Latour, 2001). Sostenía allí Latour que no sólo los sujetos, sino también los objetos tienen historia. Así los fermentos, descubiertos por el químico Louis Pasteur a mediados del siglo XIX, tienen una historia, surgen en 1858, no antes. Pero no tiene porqué compartir esa historia con la de sus atributos o representaciones institucionales, ya que pueden haber estado allí siempre o no haber estado nunca

---

<sup>2</sup> Posteriormente, en 1983. El texto fue corregido y publicado forma de artículo (Canguilhem, 1983/2009).

<sup>3</sup> En 1928, la introducción a la obra *The Nature of the Physical World* del astrónomo inglés Arthur Eddington (1882-1944) explica la diferencia entre los objetos de la experiencia cotidiana y los objetos de la ciencia por medio del ejemplo de las dos mesas. Eddington se plantea la visión distinta de una simple mesa según se mire a simple vista (objeto común) o bien a través de la mirada de los físicos (objeto científico). Como objeto cotidiano, la mesa es un cuerpo material continuo que ocupa un volumen en el espacio, que posee un color y una determinada forma geométrica. La otra visión de la mesa, como objeto científico está compuesta por una multitud de cargas eléctricas muy pequeñas y un espacio vacío entre ellas. Por lo que ninguna de las propiedades que el físico atribuye a ese agregado de partículas puede identificarse con las propiedades de la mesa del hombre común (Eddington, 1930, pp. xi-xii).

(Latour, 2001, p. 179). Por lo tanto, el debate de lo que es real o lo que es construido o lo descubierto frente a lo inventado se muestra, para Latour, claramente fútil.

Sin llegar a la radicalidad de Latour, la denominada *epistemología histórica* (Fragio, 2007) recupera la intuición de Canguilhem. Se intenta articular una perspectiva filosófica e historiográfica en la que la ciencia se analizaría atendiendo a la variabilidad temporal y local de las entidades que son objeto de conocimiento y práctica científica.

Para la epistemología histórica la cognición científica ni es única ni está determinada de una vez por todas. Antes bien, debe ponerse en relación con la producción de mundos científicos diferenciados, con nichos epistémicos dados históricamente y, por tanto, caracterizados por su singularidad. (Fragio, 2007, p. 31-2)

Uno de los temas planteados por esta corriente es la de la relación entre la ciencia y la experiencia científica (Fragio, 2007, pp. 29-55); es decir, el análisis de los métodos y técnicas de legitimación de los saberes y técnicas (o *estilos de pensamiento*) como parte de la propia historia del conocimiento científico.

La importancia de reflexionar sobre el *estilo de pensamiento* que predomina en un momento dado para entender o valorar la probabilidad de que se plantee una hipótesis determinada ante unos determinados hechos científicos. Pues, ¿de qué datos científicos hablamos? ¿Quién los legitima como tales y excluye otros? ¿Cómo y para qué se constituye una evidencia? (Barona, Moscoso y Pimentel, 2003, p. 10)

En esta Tesis doctoral pretendo utilizar el concepto de *objeto científico*, en el sentido de esta tradición para poder dar cuenta de las peculiaridades de la cometa. Son cuatro las categorías objetuales en las que encontramos cometas científicas. En primer lugar, como parte de un dispositivo experimental en la física del XVIII, para probar la naturaleza eléctrica del rayo. En segundo lugar, como modelo teórico en la mecánica racional de la época. A lo largo del XIX, la cometa se convierte en objeto tecnológico, al desarrollarse diseños especializados para su uso en la observación meteorológica (elevando instrumentos de medición). Finalmente, en la segunda mitad del XIX, la cometa se convierte en un modelo a escala en la naciente ingeniería aeronáutica, para perfeccionar el desarrollo del ala. Los capítulos siguientes documentará el auge y caída de la cometa en estas cuatro categorías.

Precisemos entonces el concepto de objeto científico a partir de la propuesta de Lorraine Daston en su introducción a la colección de ensayos *Biographies of Scientific Objects*. Daston (2000, pp. 1-13) argumenta que la ciencia posee objetos de atención

teórica dotados de diversa capacidad para organizar la investigación científica. Ello depende, en primer lugar, de lo que denomina su *notoriedad (saliencia)*: “con esta noción se conceptúan los grados de presencia-existencia de entidades científicas y sus mecanismos de producción en el seno de una comunidad investigadora” (Fragio, 2007, p. 33). Los objetos científicos tienen también una dimensión *emergente*: al ingresar en la ciencia un objeto adquiere una novedad radical, ya que sugiere un cambio tanto respecto a la propia institución científica como a la experiencia cotidiana (Daston, 2000, pp. 9-10). Por otro lado está su *productividad*, es decir, cómo los resultados, implicaciones, manipulaciones, explicaciones, aplicaciones y sorpresas asociados a un objeto les otorgan un *mayor estatus ontológico*. La esencia de un objeto científico es su potencial para superar las expectativas vigentes en el pensamiento y en el trabajo de los científicos (Daston, 2000, pp. 10-2). Por último, los objetos científicos se incrustan (*embeddedness*) a través de la institucionalización de las prácticas y los instrumentos que se ocupan de ellos (Daston, 2000, pp. 12-4).

Para incluir un objeto cotidiano al reino de los objetos científicos, históricamente se ha apelado a un gran conjunto de criterios (regularidad, utilidad, predictibilidad, significado cultural, etc.), pero estos criterios, claramente epistémicos, son impuestos a la cruda realidad para resaltar unos aspectos y ocultar otros (Daston, 2000, p. 16). Daston, en un trabajo posterior, se pregunta: “¿de qué características ontológicas, epistemológicas, metodológicas, funcionales, simbólicas y/o artísticas depende que un objeto se convierta en objeto de estudio científico y otro no?” (Daston, 2012, p. 14). Para intentar responder a esta pregunta, analiza como durante los siglos XVI y XVIII se dio un interés epistemológico por lo extraño, milagroso o asombroso, en el que se mezclaron estudios serios y rigurosos con otros muchos que no lo fueron tanto.<sup>4</sup> En este contexto aparece filósofo inglés Francis Bacon (1561-1626), que desconfía de la pasión por el asombro y la admiración y rechaza la recreación o regocijo de lo extraño, ya que genera una *quiebra del raciocinio*, por lo que recomienda seguir una disciplina estricta (Daston, 2012, p. 29). La tesis de Daston es que la ciencia moderna, en algún sentido, habría seguido los pasos de Bacon: “la atención y la curiosidad científica, que parte del

---

<sup>4</sup> Daston destaca como en revistas publicadas por las primeras sociedades científicas como, por ejemplo, *Philosophical transactions (Royal Society of London)* o *Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, se divulga desde la investigación sobre becerros deformes de Boyle hasta un estudio sobre formaciones de soldados. Leibniz, por ejemplo, publica tanto los resultados de la cuadratura aritmética como un artículo sobre perros que ladran palabras, etc. (Daston, 2012, p. 29).

gusto por lo extraño, milagroso o asombroso, pasa a dirigirse a lo cotidiano y a convertirse en una forma de trabajar sobria y severa.” (Veciana, 2004, p.59).

La cometa, en este sentido, es un objeto de uso absolutamente cotidiano en múltiples culturas, entre ellas la nuestra. Al captar la atención científica a mediados del siglo XVIII, comienzan a apreciarse en ella las cuatro características mencionadas. Quizá la más notable sea cómo la cometa permite incrustar (*embeddedness*) la práctica científica dentro de una cultura material más amplia: al utilizar un juguete ampliamente arraigado en nuestra tradición cultural, el experimento de Franklin movilizó a los públicos más diversos. Como veremos en los dos capítulos siguientes, la cometa inicia su vuelo en el contexto de la ciencia ilustrada, como tantos otros objetos que combinaban valores epistémicos con la utilidad y el entretenimiento. La fascinación popular con el experimento de Franklin y sus réplicas explica la supervivencia de la cometa como objeto científico pese a la ausencia de resultados originales o relevantes en su estudio. De hecho, su caída no se produce de un modo abrupto: gradualmente, desaparece de artículos y manuales para ingresar en el acervo de la física recreativa, donde aun desempeña un papel mientras perdura su popularidad como juguete.

Un segundo rasgo de los destacados por Daston sería la *notoriedad* (*salience*), la dimensión que adquiere un objeto, previamente carente de interés epistémico, al ser incorporado a la actividad científica. Desde este punto de vista, veremos cómo la cometa se convierte en un *juguete científico*, por usar la expresión de Gerard L'E Turner (1987). El experimento de Franklin propulsó el desarrollo de cometas capaces de ascender más alto y con materiales aislantes. Un desarrollo que no se basó simplemente en el ensayo y error, sino en modelos teóricos como los de Johann Albert Euler. Las necesidades de la observación meteorológica impulsaron asimismo la invención de nuevas formas de cometa, afinados después al construirse modelos a escala de alas de aviones.

Desde este punto de vista, la cometa podría definirse como una máquina voladora, una aeronave según el criterio de la *Organización de Aviación Civil Internacional* (OACI): “Toda máquina que puede sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra.” (OACI, 2006). Sin embargo, como nos recuerda el DRAE, pese a los ciento cincuenta años de notoriedad científica, la cometa se ha quedado en un juguete. Quizá esto se deba, siguiendo la caracterización de Daston, a su falta de *productividad*: los objetos científicos, lejos de ser inertes, producirían “resultados, implicaciones, sorpresas”. La

cometa no produjo muchas: como apuntábamos antes, y analizaremos con detalle en los dos capítulos siguientes, el dispositivo experimental de Franklin no arrojó resultados novedosos más allá del original, ni tampoco el análisis teórico del vuelo de la cometa. Como instrumento auxiliar en la observación meteorológica, la cometa no pudo resistir la competencia de los globos, primero, y después la aviación. Y como modelo a escala en ingeniería en apenas unas décadas fue superado por el análisis dimensional.

Más que *emerger*, por finalizar con la caracterización de Daston, la cometa como objeto científico se *sumerge*, de modo tal que tanto para científicos como para el público su pasado experimental, teórico y tecnológico es prácticamente desconocido. Ese olvido es quizá el indicio más claro de su *fracaso*. Detengámonos ahora en este segundo concepto.

## 2 EL FRACASO DE LOS OBJETOS CIENTÍFICOS

El fracaso y, por extensión, el éxito científico son conceptos potencialmente más controvertidos que el anterior. Definir el éxito científico exige comprometerse con una visión internista o externista de la ciencia, sobre las cuales dista de haber acuerdo. Para un sociólogo de, por ejemplo, la Escuela de Edimburgo, el éxito de una empresa científica dependerá de los valores sociales que alcance a realizar. Para una visión internista, dependerá del objetivo que se le asigne a la ciencia: éxito predictivo, explicativo, etc. No pretendo resolver semejantes debates, pero para poder caracterizar el fracaso de la cometa como objeto científico posiblemente no haga falta tanto. Si en la sección anterior me acogía a un enfoque historiográfico reciente, el de la epistemología histórica, aquí me basta con un planteamiento ya canónico, el de Thomas S. Kuhn.

En el enfoque de Kuhn, el éxito de un objeto científico sería incorporarse al *paradigma* sobre el que se articula una *ciencia normal*. Tal como establece en el epílogo añadido a la edición original de la *Estructura de las Revoluciones Científicas* en 1969 (Kuhn, 2006, pp. 301-53), un paradigma se modula alrededor de dos conceptos. En primer lugar un concepto de paradigma global, que abarca todos los intereses y compromisos compartidos de un grupo científico (Kuhn, 1983, p. 318). Este es un concepto de índole sociológica, y Kuhn lo asemeja a lo que denomina *matriz disciplinar* que abarca “a toda constelación de creencias, valores, técnicas y demás, compartidos por lo miembros de una comunidad dada” (Kuhn, 2006, p. 302). El segundo concepto sobre el que se articula el paradigma es más filosófico y es lo que Kuhn denomina

*ejemplares* entendido como un “conjunto de ilustraciones recurrentes y casi estándar de diversas teorías en sus aplicaciones conceptuales, observacionales e instrumentales” (Kuhn, 2006, p. 117). Para Kuhn, estos *ejemplares* aparecen en los libros de texto, en las prácticas experimentales y en las clases donde se forman nuevos científicos. Por lo tanto, son el canon que establece la manera estandarizada de resolver los problemas o hacer *buena ciencia* dentro de una tradición<sup>5</sup>. El éxito de un objeto científico, por tanto, en una perspectiva kuhniana, consiste en que una comunidad científica decida compartirlo como parte de una matriz disciplinar o, más específicamente, que se convierta en un ejemplar dentro de la misma.

El fracaso de la cometa como objeto de interés de la ciencia radica entonces en que no llegó a consolidarse dentro de ninguna de las matrices disciplinares que atravesó en su vuelo. En el capítulo 2 analizaremos cómo la cometa entra como dispositivo experimental en la comunidad de los electricistas del siglo XVIII, para probar la naturaleza eléctrica del rayo. Durante este siglo, la electricidad era una ciencia inmadura, no poseía un paradigma universalmente aceptado. Había tres formas de explicar la ontología de los fenómenos eléctricos: unos consideraban la atracción y la generación por fricción, otros la atracción y la repulsión, y un tercer grupo creía que la electricidad como un efluvio que emanaba de los cuerpos no conductores. Los experimentos de Benjamín Franklin, sobre todo con ayuda de la botella Leyden, impusieron el paradigma de la electricidad como un fluido (Kuhn, 2006, pp. 75-7). A partir de este momento los *electricistas* pasan a practicar ciencia normal, la investigación sobre los hechos por imponer sus ideas han cesado, la comunidad no busca nuevas explicaciones, ya que “la ciencia normal no pretende encontrar novedades de hechos y teorías, y cuando tiene éxito, no las encuentra” (Kuhn, 2006, p. 129). La cometa, como parte del dispositivo experimental diseñado por Franklin, sirvió para establecer la naturaleza eléctrica del rayo. En el siglo XVIII se sabía que los fenómenos eléctricos, al contrario de los magnéticos, podía ser generados por el hombre, por lo tanto, había un interés especial por demostrar que esta electricidad generada artificialmente también estaba presente en los rayos producidos por una tormenta. En la perspectiva de Kuhn, el experimento de la cometa sería una actividad de *determinación*

---

<sup>5</sup> Los ejemplares son un componente más de la matriz disciplinar, los otros componentes pueden ser: las generalizaciones simbólicas, es decir los componentes formales lógicos ( $f(x)$ ,  $f = m \cdot a$ ,  $\phi(x,y,z)$ , etc.), que la comunidad acepta, los modelos (por ejemplo, pensar en un gas como un movimiento aleatorio de una bolas de billar) y los objetos de compromiso metafísico (como pensar en la temperatura como medida de la energía del sistema) (Kuhn, 1983, p. 321).

*del hecho significativo*, en este caso sobre un fenómeno eléctrico. Una vez determinada la naturaleza del rayo, sin embargo, la replicación del experimento no generó nuevos resultados de interés, ni tampoco generó anomalías. Frente a otros objetos científicos de la época que sí ingresaron en el paradigma eléctrico, como la botella de Leyden (Kuhn, 2006, pp. 142-4), la cometa pasó a convertirse en parte de la física recreativa.

En el capítulo 3 consideraremos como la cometa entra como modelo teórico en la mecánica racional del siglo XVIII, impulsado por la popularidad en los experimentos eléctricos. En este caso el paradigma en que entra no es otro que la fuertemente consolidada mecánica newtoniana. Aquí, la cometa se aplica como modelo de máquina hidráulica, y se trata de verificar si se cumplen en ella las predicciones teóricas. Tenemos aquí un caso típico de investigación normal, pues Johann Albert Euler aplica a la cometa las leyes de la mecánica de Newton y su teoría de la resistencia de un cuerpo dentro de un fluido (la teoría de impacto), de la misma manera que se realizaba con otras máquinas hidráulicas (bombas, ruedas, navíos, etc.). El objetivo no es otro que hallar los puntos de contacto entre la teoría y la naturaleza del paradigma newtoniano, aplicar las leyes de Newton para resolver el problema del vuelo de la cometa. En palabras de Kuhn, “los científicos resuelven rompecabezas tomando como modelo las soluciones anteriores de otros rompecabezas” (Kuhn, 2006, p. 324). Sin embargo, el de la cometa no resultó particularmente difícil de resolver y, puesto que el principal valor práctico del modelo era facilitar el propio experimento de Franklin, su interés se perdió con éste y pasó también a formar parte de la física recreativa.

En el capítulo 4 veremos cómo la cometa se convierte en objeto tecnológico, al desarrollarse diseños especializados para su uso en la observación meteorológica de las altas capas de la atmosfera. Como analizaremos, el paradigma de la meteorología de finales del siglo XIX y principios del XX requería de una precisión y frecuencia en la toma de datos, ya que “al utilizarlos en la resolución de problemas, el paradigma ha hecho que merezca la pena determinarlos con mayor precisión, sino con mayor variedad de situaciones” (Kuhn, 2006, p. 91). El paradigma necesitaba de un dispositivo diseñado al efecto que permitiera elevar instrumentos de medición en la atmosfera para recolectar gran cantidad de datos. Como ya había sucedido en el pasado y sigue sucediendo en la actualidad, la ciencia ha necesitado “para tales propósitos aparatos especiales complejos, y la invención, construcción y despliegue de tales aparatos han exigido talentos de primera línea, abundante tiempo y considerable apoyo financiero” (Kuhn, 2006, p. 92). La meteorología se aprovechó de los nuevos diseños de cometas,

destinadas al desarrollo del aeroplano, para estos fines. Sin embargo, tampoco aquí la cometa llegó a consolidarse por razones esta vez económicas: la aparición de dispositivos de elevación menos complejos y más precisos la desplazó.

Finalmente, en el capítulo 5 analizaremos como en la segunda mitad del XIX, la cometa se convierte en un modelo a escala en el desarrollo de la forma de las alas de un aeroplano. En este caso estamos en una incursión al margen del paradigma existente en la aerodinámica, como parte de la mecánica que estudia el movimiento del aire alrededor de un objeto inmenso en él. En esta subdivisión de la mecánica no se disponía de un paradigma único, era una ciencia inmadura en la que existían varios modelos explicativos del comportamiento de aire alrededor de un cuerpo (Bird, 2002, pp. 101-3). La cometa aparece como modelo de ingeniería con el fin de construir una máquina voladora: es un objeto de ensayo, no se utiliza para afianzar el modelo teórico de un paradigma y el resultado es una revolución tecnológica más que científica. Precisamente cuando por fin triunfó un paradigma en aerodinámica y se le dio contenido teórico a los ensayos con modelos en ingeniería a través del análisis dimensional, la cometa como modelo a escala se reveló prescindible.

Iniciemos a continuación, este vuelo de la cometa como objeto científico analizando cada uno de los contextos señalados. Pero antes de iniciar este análisis, en lo que resta de la introducción, presentaremos brevemente los distintos tipos y formas de las cometas, a modo de referencia para el resto de la Tesis.

### **3 LAS FORMAS DE LAS COMETAS**

Las cometas, por su número de hilos, se pueden clasificar en dos tipos:

1) Cometas de un hilo, también denominadas *cometas estáticas*, son aquellas que permanecen estables en el aire alrededor de una posición de equilibrio. Necesitan sólo un hilo para su control.

2) Cometas varios hilos son aquellas que, como su nombre indica, poseen más de un hilo, por medio de ellos se puede dirigir a la cometa en su vuelo. Dependiendo del número de ellos que emplean para este control, las cometas pueden ser de dos, tres y cuatro hilos.

### 3.1 COMETAS DE UN SOLO HILO

#### 1. PLANAS

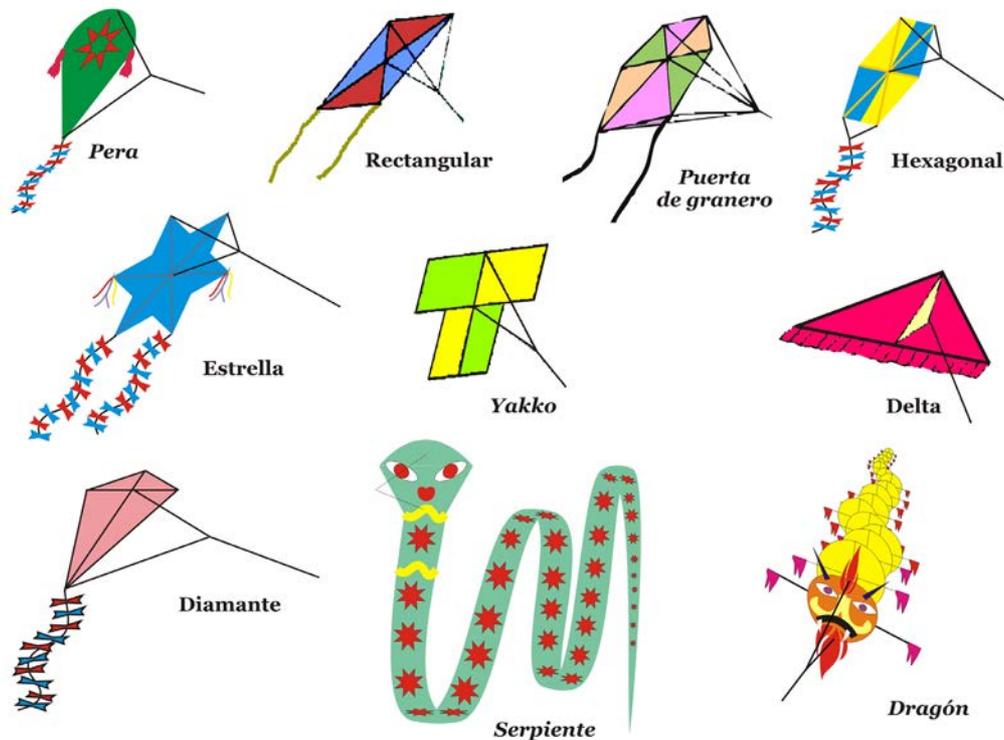
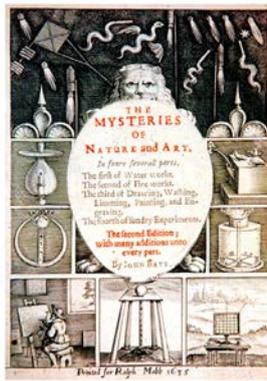


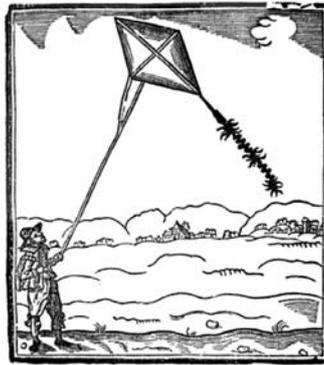
Fig. 1 Cometas Planas

La cometa en forma de *diamante* (Fig. 1) es la representación con que popularmente se reconoce a las cometas, su origen lo podemos fijar en extremo oriente. Fue introducida a través de la Ruta de la Seda (Hart, 1982, pp. 31-2). Aparece en numerosos grabados de los siglos XVII y XVIII, como por ejemplo el que aparece en el libro *The Mysteryes of Nature and Art* (1634) escrito por el inglés John Bate. En una ilustración de este libro se muestra una cometa para ser usada en espectáculos pirotécnicos, y para ello dispone de una cola con fuegos de artificios. (Fig. 2.1-2)

En el libro *Magiae Naturalis* (1589), el filósofo y mago natural italiano Giovanni Battista della Porta (1535-1615) describe un tipo de cometa plana rectangular con una brida triple (Fig. 1), que denomina *dragón volador* (Fig. 2.3). Comenta que se usa para elevar luces o fuegos artificiales (Hart, 1982, pp. 84-93).



1



2



3



4



5



6

**Fig. 2** Portada *The Mysteries of Nature and Art* (1634) de John Bate (1). Cometa de Bate (2). Versión de la cometa de Della Porta en *Mundus subterraneus* (1665) de Athanasius Kircher (1601-1680) (3). Cometa del códice de Viena (1430) (4). Cometa estandarte en *Bellifortis* (1405) de Kyeser (5). Cometa de *pera* de Pocock (6)

La forma hexagonal (Fig. 1) posee una gran estabilidad si se le proporciona una buena cola. Tiene su origen en oriente, y es la base de otras formas geométricas (poliedros y estrellas). La cometa *puerta de granero* es empleada, en el siglo XIX, por el meteorólogo Alexander George McAdie (1863-1943) para elevar instrumentos meteorológicos en el Observatorio de Blue Hill, cerca de Harvard (USA) (Hart, 1982, pp.109-10).

La cometa en forma de *pera* (Fig. 1) es originaria de la isla de Java, se populariza en Europa gracias a los comerciantes portugueses. Llega a ser muy famosa<sup>6</sup> en Inglaterra y Francia, durante los siglos XVIII y XIX. En 1826, el maestro de escuela

<sup>6</sup> Como muestra de esta popularidad, a modo de ejemplo, podemos leer en una obra escrita en 1939 por R. Byne-Powell, que trata sobre los juegos de los niños en la Inglaterra del siglo XVIII: "Kite Flying, thought it never became the sport that it is in China and Japan, was very popular in the eighteenth century, indeed we find in many pictures of fields and open spaces, the figure of a boy flying a kite." (Citado en: Hart, 1982, p. 94).

inglés George Pocock (1774–1843) emplea un tren de dos de estas cometas como método de tracción para arrastrar carricoches y barcos (Pocock, 1827; Hart, 1982, pp. 165-7) (Fig. 2.6).

La cometa *serpiente* (Fig. 1), originaria de Tailandia y Camboya, está formada por una cabeza, que es una cometa plana en forma de arco con una inmensa cola de gran longitud que recuerda a esos reptiles. En el siglo XV es descrita por Konrad Kyeser (1366 – c.1405) en su tratado sobre tecnología militar *Bellifortis* (1405) como estandarte (Fig. 2.5). Una descripción más pormenorizada se encuentra en un manuscrito del año 1430 que se conserva en Viena<sup>7</sup>, donde se detalla la forma de construir el armazón de la cabeza, así como las telas a emplear como vela. (Fig. 2.4)

Las formas de animales han fascinado a los constructores de cometas de todo el mundo. Una variante de estas formas es el ciempiés o *dragón* (Fig. 1), muy popular en China, construida formando un largo tren de cometas circulares de tamaño decreciente unidas unas a otras.

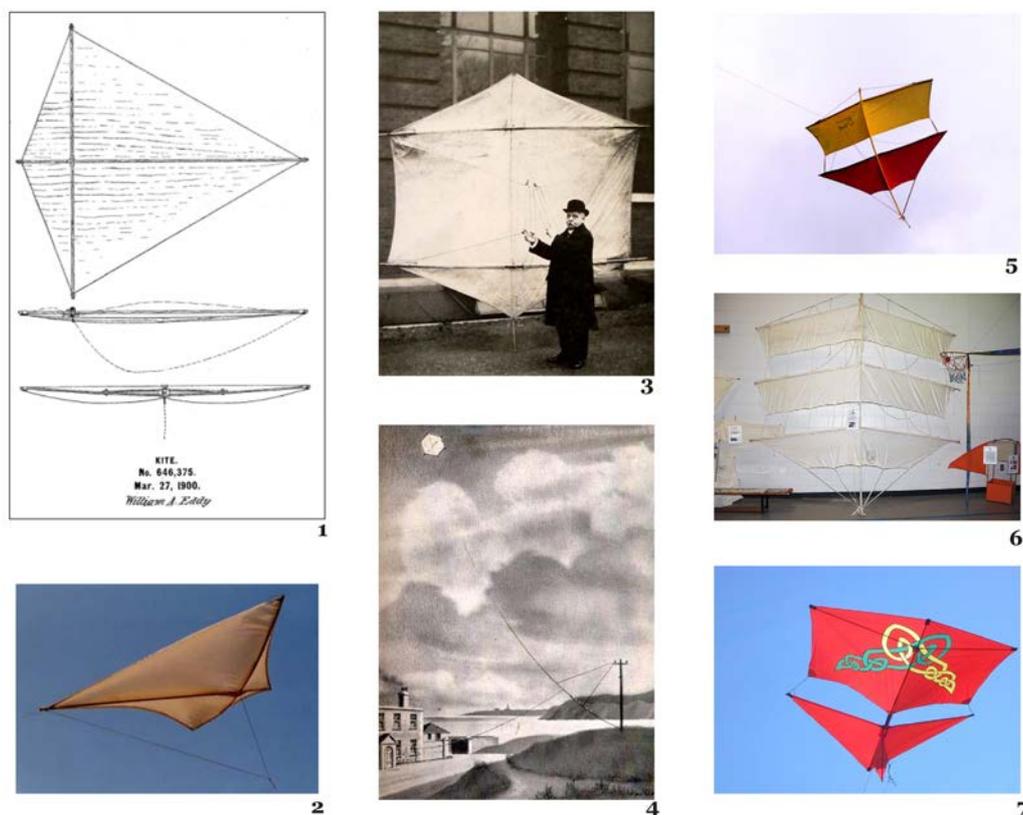
La cometa *delta*, denominada así por su semejanza con la cuarta letra del alfabeto griego (Fig. 3.1), tiene su origen en los experimentos llevados a cabo en los años cincuenta por el ingeniero americano Francis Rogallo (1912– 2009). Su objetivo era desarrollar un paracaídas (Pelham, 1976, pp. 80-3) para ser utilizado como freno de las cápsulas espaciales en su reentrada en la atmósfera (Fig. 3.2).



**Fig. 3** Rogallo con su cometa delta (1). Pruebas del paracaídas con una capsula Géminis (2) (NASA)

<sup>7</sup> Viena, Österreichische Nationalbibliothek, codex 3064, ff. 4<sup>v</sup>-7<sup>r</sup>. (Transcrito en Hart, 1982, pp. 71-2). Sobre las cometas en la Edad Media véase: (Hart, 1969).

## 2. CURVADAS

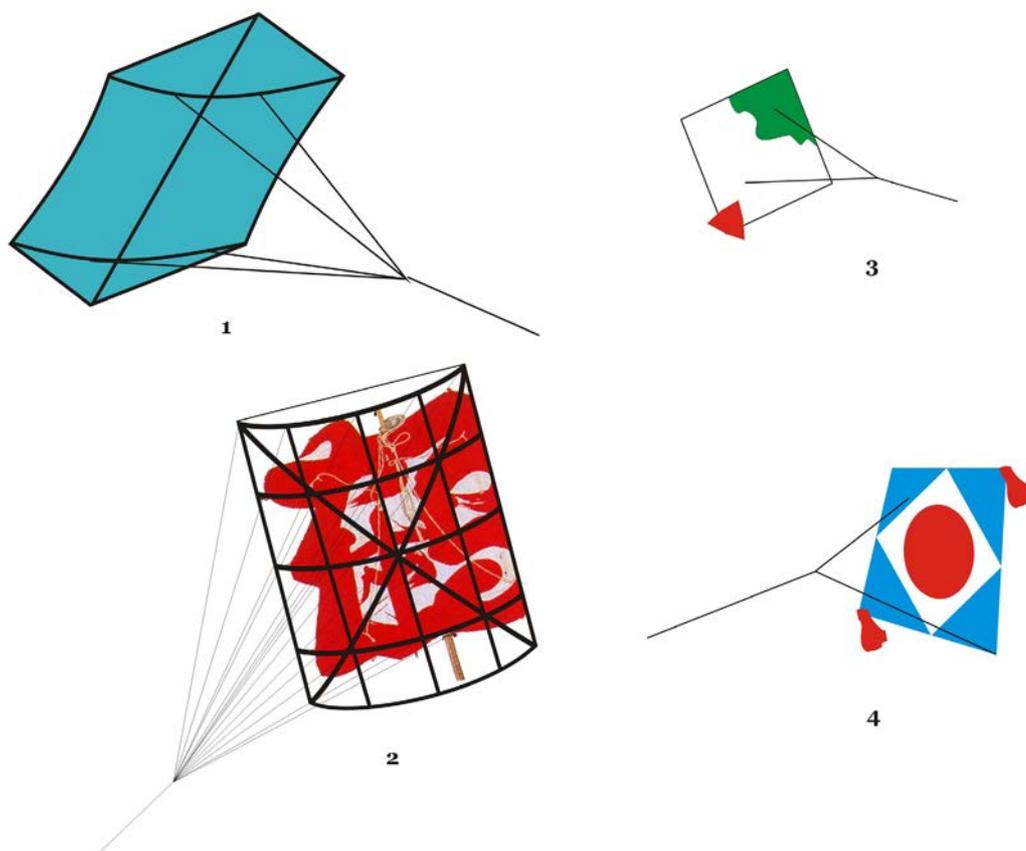


**Fig. 4** Patente de la cometa de Eddy (1900) (1). Reproducción en vuelo de una cometa de Eddy (2). George Stephen Kemp (1857-1933) asistente de Marconi con una cometa *Levitor* usada para elevar una antena en los experimentos de la primera transmisión de radio transatlántica en *Signal Hill* (San Juan de Terranova) (3). Garbado del tendido de la antena en *Signal Hill* el 12 de diciembre de 1901 (4). Cometas *Rolloplano* (5-6). Cometa *Roller* (7)

La cometa *curvada* se caracteriza por no tener cola. Su estabilidad se consigue gracias al ángulo diedro que se forma al arquear el travesaño horizontal. En el siglo XIX, el periodista y fotógrafo americano William Abner Eddy (1850 – 1909) patenta un modelo de este tipo de cometa (Fig. 4.1), para utilizarla en las observaciones meteorológicas (Eddy, 1894; 1897; 1898). Su objetivo evitar los enredos en las colas que se producían en los trenes de cometas planas (Fig. 4.2).

En el siglo XIX, el mayor inglés Baden Fletcher Smyth Baden-Powell (1860–1937) diseña una cometa hexagonal curvada denominada *Levitor* (Fig. 4.3). El 12 de diciembre de 1901, Guglielmo Marconi (1874-1937) usa este tipo de cometa para elevar una antena a una altura de 122 m. en la transmisión de radio transatlántica desde Poldhu (Inglaterra) a *Signal Hill* en San Juan de Terranova (Fig. 4.4) (Baker, 1970, pp. 61-73; Bussey, 2000).

El *Roloplano* (Fig. 4.5-6) es un original diseño del empresario alemán Richard Steiff (1877-1939). Esta cometa alcanza una gran popularidad en Alemania, comercializándose los primeros modelos en 1909. La marca de juguetes STEIFF la mantuvo en su catálogo hasta en 1968. Por su gran capacidad de carga y estabilidad se empleó en fotografía aérea y para colgar carteles publicitarios. Se da la circunstancia que una versión especial la utilizó el ejército alemán como blanco de tiro. La denominada cometa *Roller* (Fig. 4.7) es una patente del constructor de cometas inglés Alick Pearson (1895-1984). Su forma es la de un *Roloplano* al que se le ha añadido una quilla, este elemento le da una gran estabilidad (Eden, 1989, pp. 210-6).



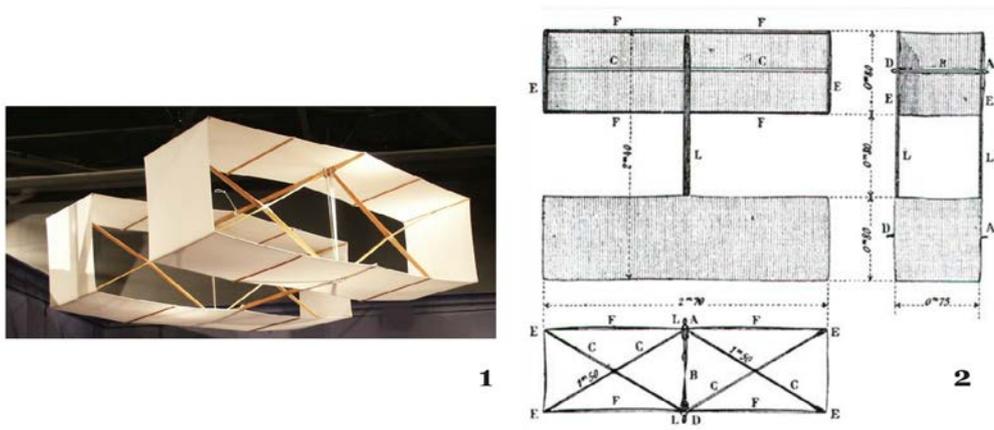
**Fig. 5** *Sanjo-Rokkaku* (1). *Eddo* (2). Cometa de combate india (3). *Nagasaki Hata* (4)

Las cometas de combate indias (Fig. 5.3) son cometas inestables que al soltarlas al vuelo tienen tendencia a girar sobre el eje del hilo. Al tirar del hilo, debido a la disposición de las bridas se *abomban* por la acción del viento, estabilizándose y siguiendo la dirección hacia la que apunta el vértice superior. Así con maniobras del hilo de tirar/aflojar/tirar se controla su vuelo, con el fin de hacer caer o derribar la

cometa del contrincante. Estas cometas se construyen de bambú y papel de seda o similar (Gallot, 1989). En Japón se emplea un modelo parecido denominado *Nagasaki Hata* (Fig. 5.4). Por otro lado la *Sanjo-Rokkaku* (Fig. 5.1) y la *Eddo* (Fig. 5.2) son las grandes cometas curvadas tradicionales japonesas, que se usan como cometas de combate, construidas con bambú y seda profusamente decoradas, volando por equipos se intenta abatir las cometas de los contrincantes (Hart, 1982, pp. 37-44).

### 3. CELULARES O COMPUESTAS

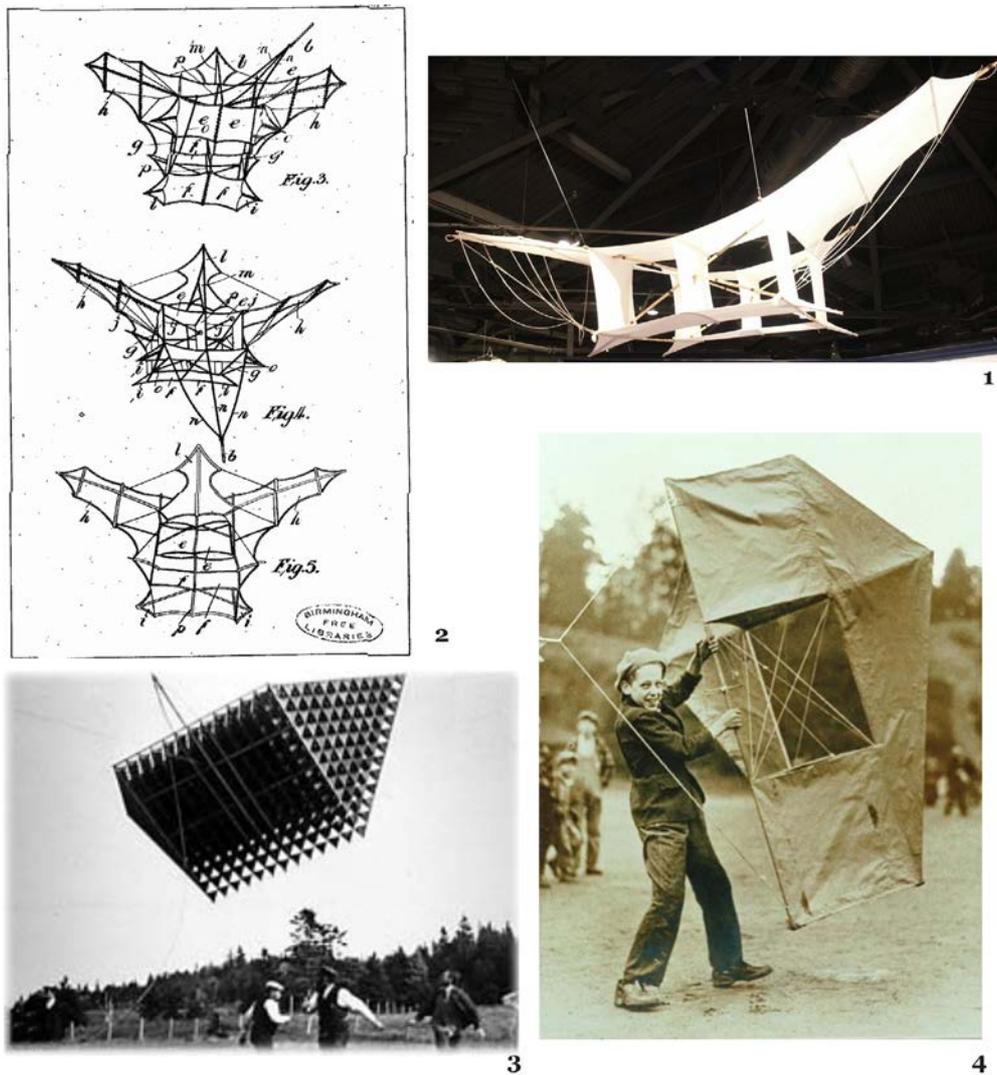
En 1893, el ingeniero inglés afincado en Australia, Lawrence Hargrave (1850-1915) inventa la cometa celular (Fig. 6). Su gran capacidad de sustentación y estabilidad hace que sea la base de diseño de la mayoría de las cometas, que a finales del siglo XIX y principios del XX, se emplean en observaciones meteorológicas, en sistemas para elevar a personas y en el desarrollo de los primitivos aviones, como se verá en los capítulos posteriores.



**Fig. 6** Reproducción de la cometa de Hargrave (1). Plano de la cometa en la obra de Lecornu *Les cerfs-volants* (1910) (2)

Partiendo del diseño original de Hargrave, la cometa sufrió posteriormente, múltiples modificaciones, sobre todo por la adición de alas y la adopción de nuevas geometrías, naciendo las cometas conocidas por *compuestas*. Podemos destacar de entre ellas la cometa inventada por Samuel Franklin Cody (1867-1913), que estaba formada por dos celdas dobles de Hargrave adosadas (Fig. 7.1-2) y provistas de alas angulares.

Lo original de la construcción es que tan sólo hacen falta dos pares de varas en diagonal para tensar el conjunto.



**Fig. 7** Reproducción actual de una cometa de Cody (1). Patente de la cometa de Cody (1901) (2). Cometa de Bell compuesta de 1300 células tetraédricas, bautizada con el nombre *Frost King* (3). Cometa de Conyne (4)

La *cometa tetraédrica* está constituida de múltiples celdas con forma de tetraedro revestido por dos de sus caras (Fig. 8.1). A principios del siglo XX, Alexander Graham Bell (1847-1922) construyó grandes cometas formadas por un gran número de estas celdas (Fig. 7.3). Su fin era encontrar una forma más eficaz para el ala de un aeroplano, como veremos en el capítulo 5. Otro tipo de cometa es la denominada Conyne (Fig. 7.4), que fue utilizada por el ejército francés como sistema para elevar observadores y como blanco de tiro, por eso se conoce también por *cometa militar francesa* (Lecornu, 1910, p. 94), fue patentada en 1902 por el americano Silas Conyne (Fig. 8.2).

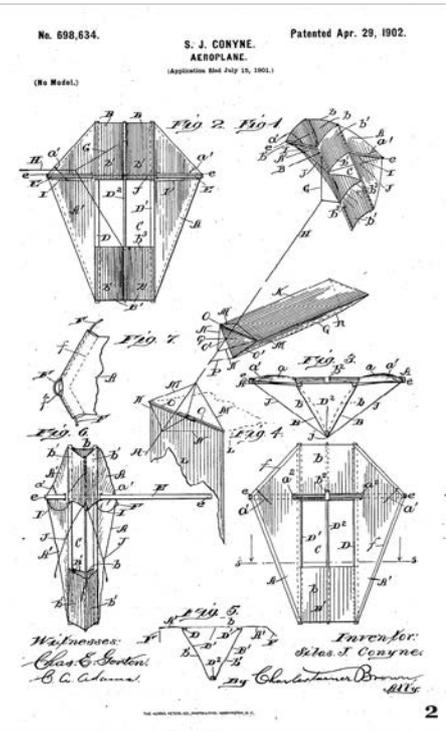
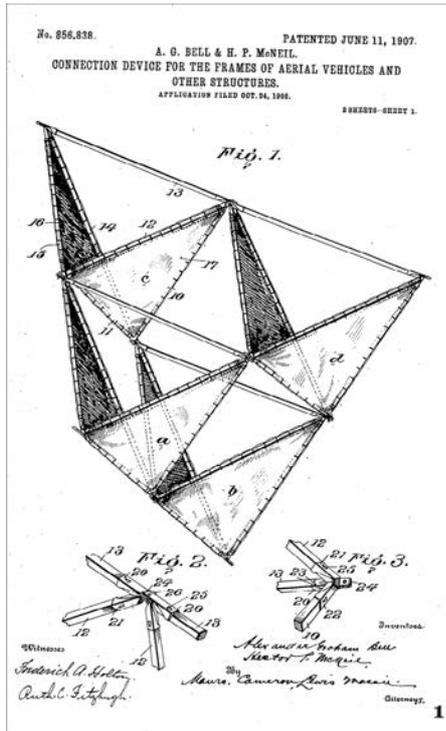


Fig. 8 Patente de la cometa de Bell (1907) (1) y de Conyne (1902) (2)

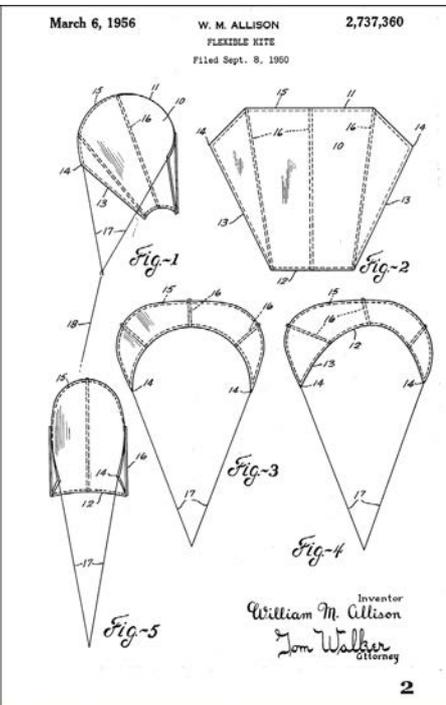
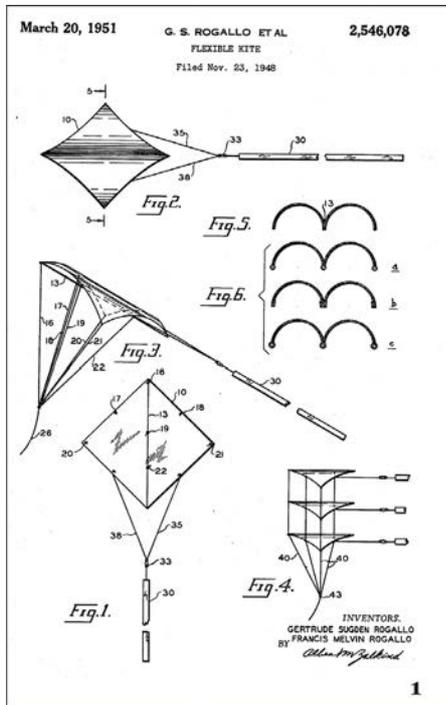
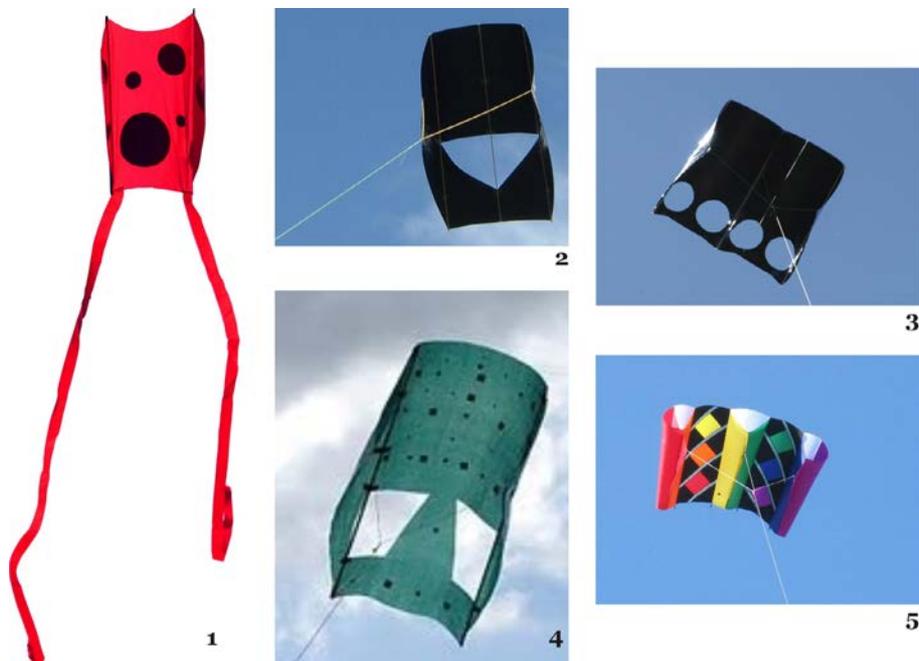


Fig. 9 Patentes de la cometa de Francis Rogallo (1951) (1) y William M. Allison (1956) (2)

#### 4. SEMIFLEXIBLES

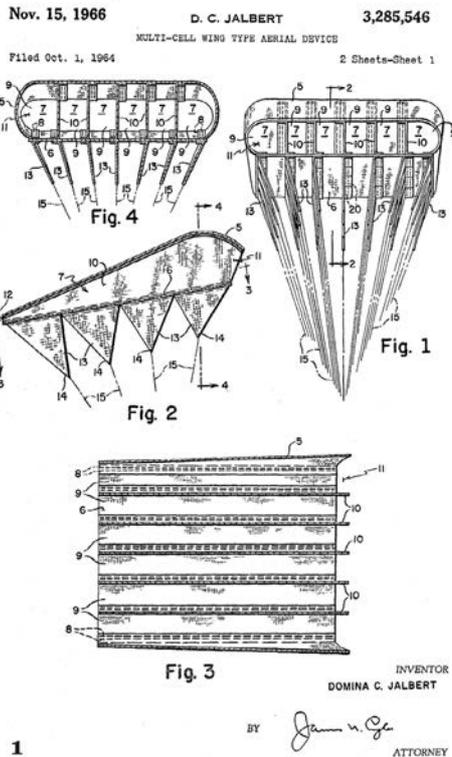
En 1951 el ingeniero americano Francis Rogallo (1912-2009) patenta una nueva forma de cometa, la que se conoce como *semiflexible* (Hart, 1982, pp. 186-7). La característica de esta cometa (Fig. 9.1) es que adquiere su forma por la combinación de la acción del viento y un sistema de seis bridas. Una variante es la cometa *trineo* o *sled*, patentada por William M. Allison en 1956. Formada por dos largueros, una vela flexible y dos bridas, adquiriendo su forma por la acción del viento (Fig. 9.2-Fig. 10.1).

La idea original de Allison carecía de los dos agujeros inferiores, que fueron introducidos en 1964 por Frank Scott (Fig. 10.2-3) y modificados posteriormente por Edwin L. Grauel (1907-2002) (Fig. 10.4). La razón de los mismos es conseguir un vuelo eficaz para vientos moderados (Eden, 2002, pp. 168-79). En los últimos años han aparecido una serie de variaciones de la cometa *trineo*, en las que se han sustituido los largueros por dos tubos (Fig. 10.5) que al inflarse de aire dan rigidez a la cometa, lo que le permite volar. Al carecer de partes rígidas puede plegarse y llevarlas en el bolsillo, pero como contrapartida necesita más viento para volar, pues deben inflarse los tubos.



**Fig. 10** Cometa de Allison (1), modificación de Frank Scott (2) (3) y Edwin L. Grauel (4). Cometa con tubos hinchables (5)

## 5. PARAFOIL



**Fig. 11** Patente de Jalbert (1). *Parafoil* (2). *Flowform* (3). Esculturas volantes tipo *parafoil* (4)

En el año 1966, el americano Domina C. Jalbert (1904-1991) patenta una cometa flexible denominada *parafoil* (Fig. 11.1-2), que tiene todas las ventajas de los principios aerodinámicos de las alas rígidas. La cometa no necesita de ninguna varilla, su forma y rigidez de vuelo se consigue por medio de unas bolsas internas que se hinchan con el viento, obteniéndose una forma alar de gran estabilidad y una gran fuerza de sustentación. El número de estas bolsas determina su fuerza de elevación, lo que permite una construcción en distintos tamaños dependiendo de su uso. En la actualidad, de manera ocasional, se utiliza para elevar cámaras fotográficas o instrumentos científicos en el estudio de la atmósfera<sup>8</sup>.

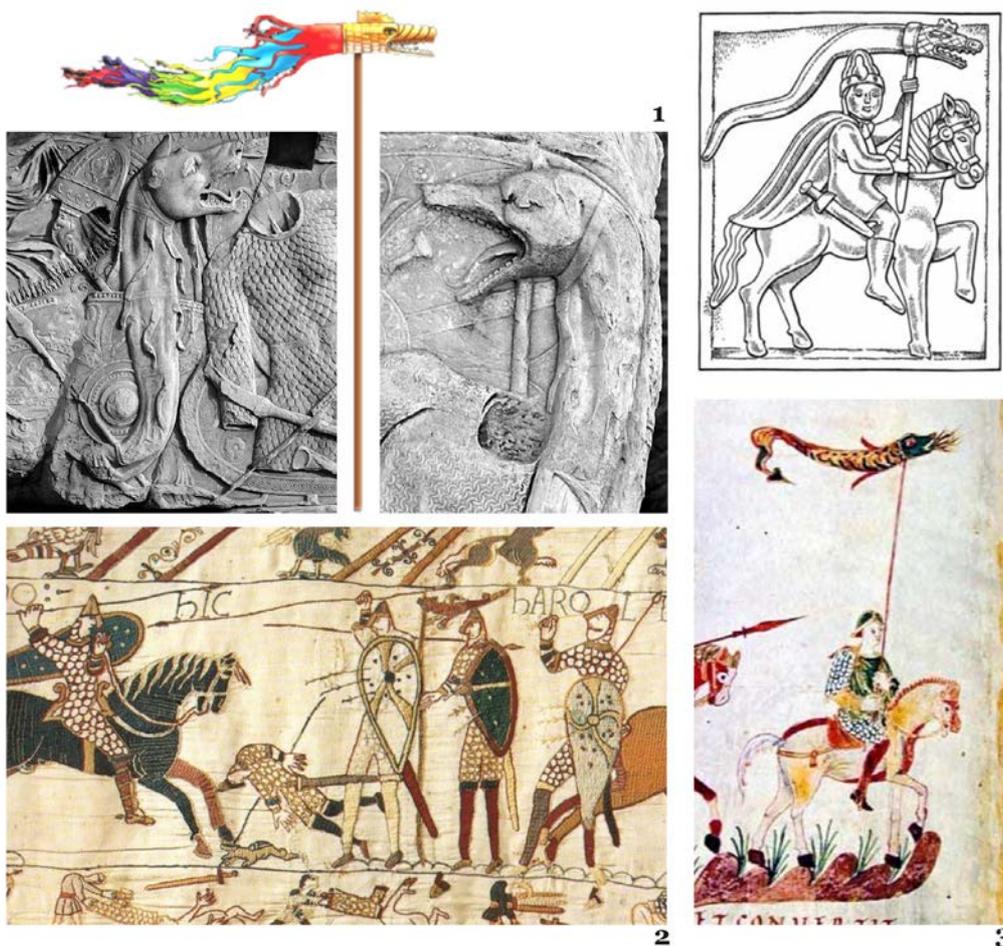
Una de las desventajas del *parafoil* es que se comporta mal ante vientos laterales que tienden a desestabilizar a la cometa, haciendo que la misma se pliegue desinflándose y cayendo al suelo. Con el fin de evitar este inconveniente, el canadiense Steve Sutton introduce una serie de modificaciones al diseño de Jalbert. Estos consisten principalmente en conectar las distintas bolsas mediante orificios que igualan las

<sup>8</sup> Véase nota 2 página 164.

presiones entre las bolsas, permitiendo también la entrada del viento por la parte inferior, a través de una válvula que iguala el exceso de presión dentro de las bolsas. Esta cometa se denomina *flowform* (Fig. 11.3).

El *parafoil* ha inspirado a los constructores de cometas para la realización de auténticas esculturas volantes. (Fig. 11.4)

## 6. SACOS DE VIENTO O CATAVIENTOS



**Fig. 12** *Dracos* en la columna de Trajano (siglo I) (1). Estandartes *draco* en el Tapiz de Bayeux (siglo XI) (2). *Draco* con antorcha en el código *Psalterium aureum* del siglo IX (3)

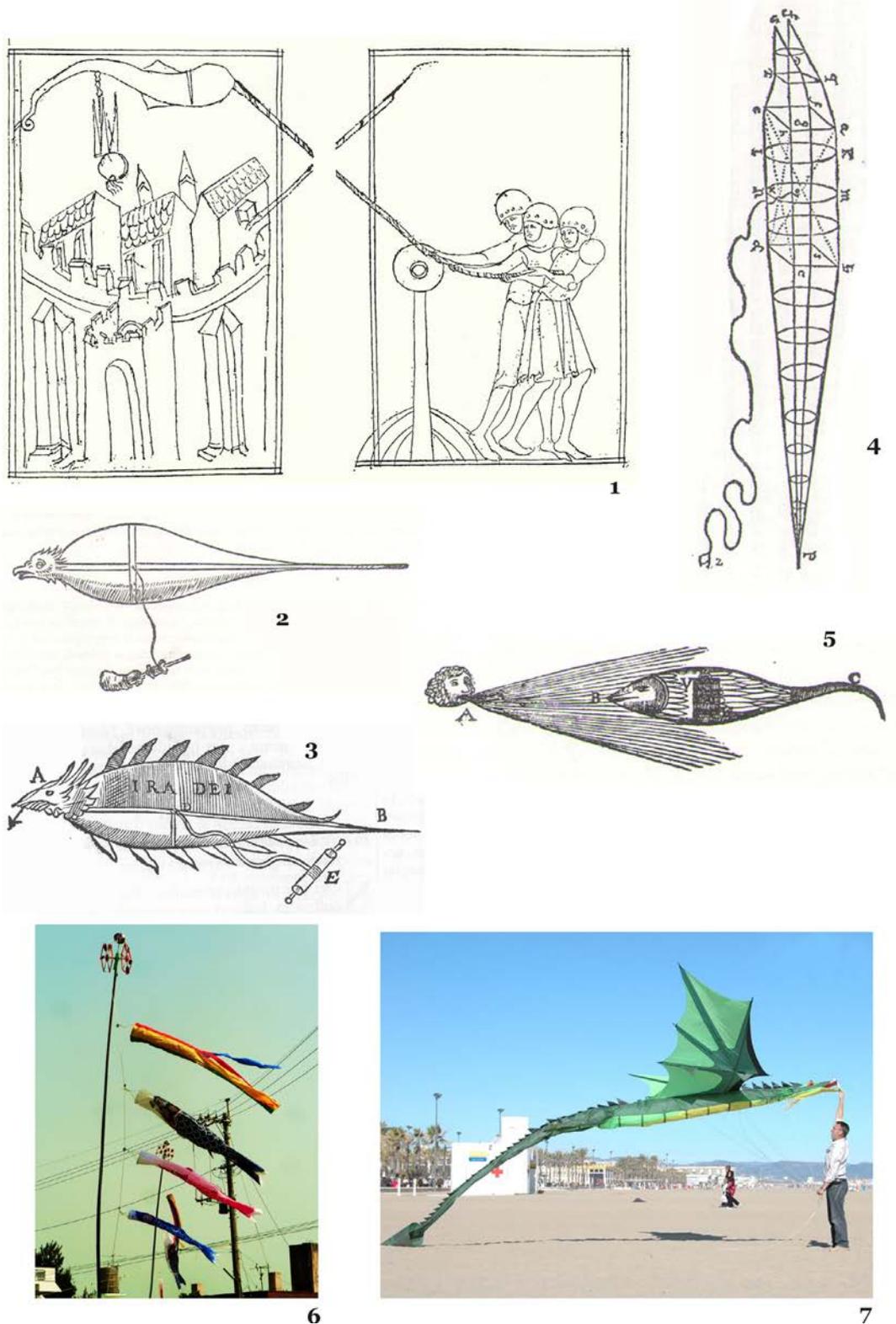
Emplear un saco para saber la dirección del viento o simplemente como estandarte tiene una larga tradición en oriente<sup>9</sup>. En occidente, la primera referencia conocida la encontramos en los estandartes conocidos por *dracos*, utilizados por las legiones

<sup>9</sup> En oriente hay una gran tradición de ondear catavientos en celebraciones o festivales, como por ejemplo el *Kodomo-no hi*, (Festival de los Niños), que se celebra el 5 de Mayo en Japón. En cada hogar en el que ha nacido un hijo, ondea un saco de viento con forma de pez (Hart, 1982, p. 44) (Fig. 13.6).

romanas en los últimos días del Imperio, (Hart, 1972, pp. 32-5). Este catavientos consiste en una cabeza con forma de dragón con cuerpo de tela que ondea con el viento al llevarse atado en lo alto de un mástil (Fig. 12.1). De origen incierto, pero seguramente proveniente de la región de Dacia, es adoptado como símbolo por los romanos, siendo el estandarte segundo en importancia tras el *águila* de la legión (Hart, 1972, p. 33).

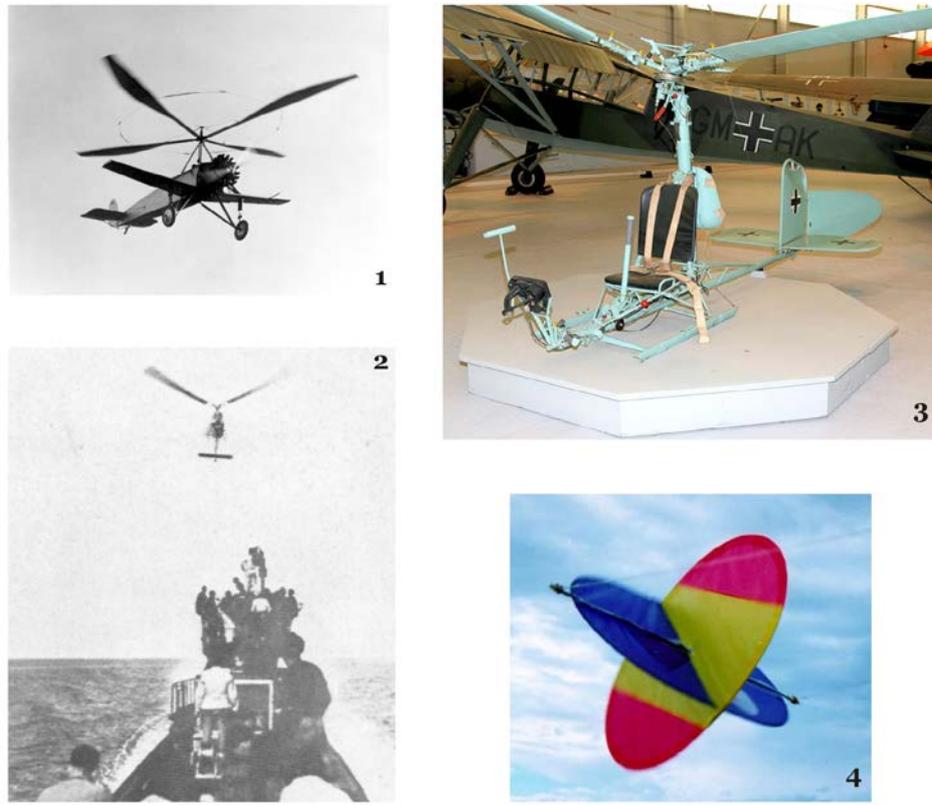
Con la caída del Imperio Romano, el uso de este estandarte se difunde por la Europa Medieval, apareciendo en varios grabados de la época (Fig. 12.2-3). En 1326, en el libro *De nobilitatibus* escrito por el inglés Walter de Milemete (c1300), en el folio 77<sup>v</sup> y 78<sup>f</sup> aparece un grabado (Fig. 13.1) que para algunos autores (Hart, 1969, pp. 1022-4; 1972, pp. 62-77; 1982, pp. 69-70) es la primera representación del vuelo de algo parecido a una cometa en Europa. Todo parece que más que un saco de viento, el grabado muestra el vuelo de una cometa plana del tipo serpiente (Fig. 1).

Continuando la tradición medieval del *draco*, durante los siglos XVI y XVIII, encontramos varios textos en donde describen este tipo de estructuras. Pero existe una tendencia a representar cometas planas con apariencia de dragón, junto con sacos de viento con el mismo aspecto. La descripción de la construcción de una cometa plana en el *Magiae Naturalis* (1589) de Giovanni Battista della Porta no se acompaña de ningún grabado, pero la denominación *draco volans* que le da al artefacto volador hace que otros autores posteriormente dieran su versión particular (Kircher, 1646, Pt. 2 V, pp. 826-7; Hart, 1972, pp. 73-7) (Fig. 13.3). El matemático alemán Daniel Schwenter (1585-1636) en su *Delicia Physic-Mathematicae* (1636), aparte de la construcción de su versión de la cometa plana de Della Porta (Fig. 13.2) (Schwenter, 1636, p. 472), describe una estructura tridimensional con forma de dragón (Fig. 13.4) para ser usado, según dice, como transporte de lámparas e instrumentos musicales (Schwenter, 1636, p. 474). En el libro *Musurgia universalis* (1650) de Athanasius Kircher (1601-1680) utiliza un saco de viento para albergar en su interior un arpa de viento para producir sonidos mientras ondea (Fig. 13.5) (Kircher, 1650, p. 354; Hart, 1972, pp. 44-8).



**Fig. 13** Grabado del *De nobilitatibus* (1326), de Milemete (1). Versión de la cometa plana de Della Porta en el *Delicia Physic-Mathematicae* (1636), de Schwenter (2). Versión de la cometa plana de Della Porta en el *Ars magna lucis et umbrae* (1646), de Kircher (3). Estructura con forma de dragón en el *Delicia Physic-Mathematicae* (1636), de Schwenter (4). Saco de viento musical en el *Musurgia universalis* (1650), Kircher (5). Sacos de viento en el *Kodomo no hi* (Festival de los Niños) en Japón (6). Reproducción actual de un saco de viento cometa en forma de dragón (7)

## 7. ROTOR

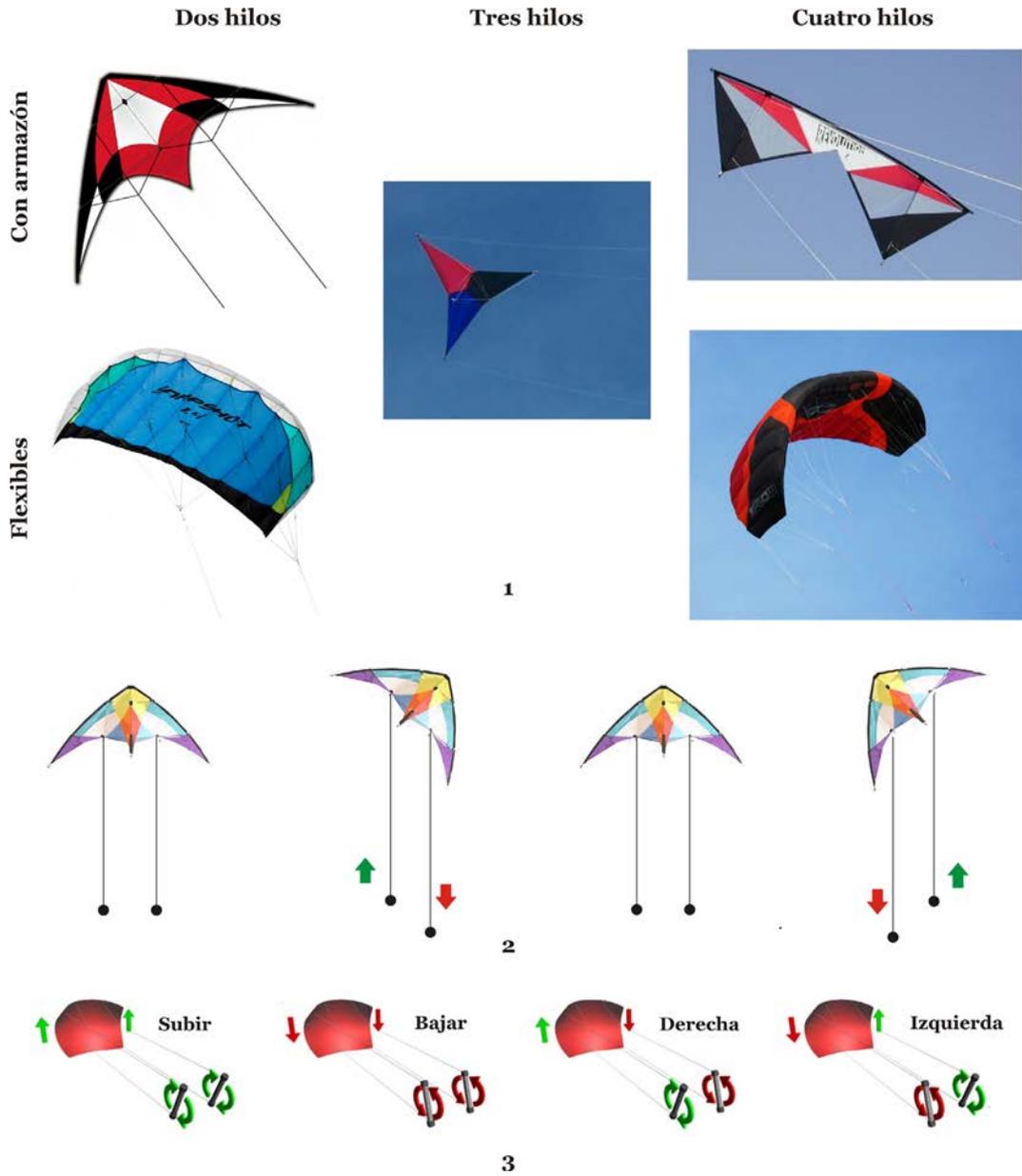


**Fig. 14** Autogiro Cierva C.8W (1). *Focke-Achgelis Fa 330* en vuelo arrastrado por un submarino alemán durante la Segunda Guerra Mundial (2). Reproducción actual del Fa 330 (3). Cometa rotor actual (4)

Estas cometas son básicamente un autogiro sin motor. Su principio de funcionamiento se basa en que un cuerpo en rotación inmerso en una corriente de aire, además de ser arrastrado por la misma, experimenta una fuerza de sustentación vertical hacia arriba. Este principio fue el que el ingeniero español Juan de la Cierva (1895-1936) aplicó en su autogiro (Riesgo, 1992), que no era otra cosa que un avión en el que las alas habían sido sustituidas por unas aspas horizontales que giraban por el avance del mismo, proporcionado por la hélice propulsora, situada en la parte delantera del aparato (Fig. 14.1).

Durante la II Guerra Mundial, en el año 1943, los submarinos alemanes emplean un autogiro sin motor para observación. El observador se sienta en el aparato y vuela al ser arrastrado por el submarino por medio de un cable, elevándose sobre la superficie del mar (Fig. 14.2). A este autogiro cometa, los alemanes lo denominaron *Focke-Achgelis Fa 330 Bachstelze* (Nowarra, 1990, pp. 38-40).

### 3.2 COMETAS DE VARIOS HILOS



**Fig. 15** Tipos de cometas de varios hilos (1). Modos de controlar una cometa de dos hilos (2) y de cuatro hilos (3)

Hasta ahora las cometas que se han descrito son de un solo hilo, pero existen cometas que poseen más de un hilo, por medio de ellos se puede dirigir a la cometa en su vuelo. Dependiendo del número de hilos empleados en este control, las cometas pueden ser de dos, tres y cuatro hilos. Atendiendo a su estructura pueden ser con armazón y flexibles (Fig. 15.1).

Su manejo es sencillo: cuando se tira de uno de los hilos, la cometa se desvía hacia el lado que se ha tirado, y para recuperar su equilibrio se tira del hilo contrario (Fig. 15.2). Este funcionamiento es común a todas las cometas de dos hilos. Dado que con una cometa de este tipo sólo se consiguen movimientos en dos direcciones, si buscamos una mayor variedad de movimientos, es necesario disponer de tres hilos. Si además se desea controlar la velocidad de vuelo, es necesario variar el ángulo de ataque de la vela, para ello se emplean cuatro hilos (Fig. 15.3).

El diseño de cometas flexibles de cuatro hilos (Breukels, 2010) ha experimentado un avance importante, gracias a la aparición de una modalidad deportiva denominada *kitesurf*. Este deporte consiste en deslizarse por el mar sobre una tabla de *surf* siendo arrastrado por una cometa (Fig. 16.1). Esta modalidad ha inspirado el uso de grandes cometas similares como vela auxiliar para propulsar barcos (Fig. 16.2).



1



2

**Fig. 16** Práctica del *Kitesurf* (1). Cometa-Vela propulsora para barcos (2)



## 2 LAS COMETAS ELÉCTRICAS

### 1 INTRODUCCIÓN

La ciencia estaba en auge en la vieja Europa del siglo XVIII. Los salones de París y los cafés de Londres se llenaban de conversaciones en las que se especulaba sobre diversos fenómenos de la naturaleza. La física experimental –es decir, la mecánica, la óptica, la neumática o la electricidad– la explicaban los conferenciantes con ayuda de experimentos, que atraían a un público entregado (Sutton, 1995). A mediados del siglo XVIII, la electricidad se convirtió en una moda (Sutton, 1995, pp. 287-336): el alemán Georg Matthias Bose (1710-1761) podía hacer saltar chispas de los tenedores de los comensales de una mesa o sufrir la descarga eléctrica al besar los labios de una dama aislada y cargada de electricidad (Heilbron, 1999, p. 267).



**Fig. 17** Frontispicio de la obra del abate francés Jean-Antoine Nollet (1700-1770) *Essai sur l'électricité des corps* (1746). En el mismo se reproduce el más famoso experimento eléctrico del físico experimental inglés Stephen Gray (1666-1736). A un muchacho suspendido horizontalmente por medio de unos hilos de seda, se le acerca un tubo de vidrio cargado observando que podía atraer objetos con las manos y la nariz

El interés de los fenómenos eléctricos trascendió más allá de las salas de conferencia de la Academias y las aulas de las Universidades (Guijarro, 2001a), extendiéndose a la Corte y a los salones de los nobles, llegando incluso a los hogares “donde aficionados deseaban repetir en sus salones algunos de los experimentos que habían presenciado en conferencias públicas” (Rider, 1990, p. 141). Los aparatos necesarios para realizar experimentos se comercializaban en tiendas especializadas para disfrute de los aficionados (Ordóñez et al., 2004, pp. 371-79). El más exitoso de los experimentalistas populares fue el abate Jean-Antoine Nollet (1700-1770). El frontispicio de su obra *Essai sur l'électricité des corps* (Nollet, 1746) reproduce a Nollet en una de sus demostraciones públicas, rodeado de una ilustre audiencia en un salón con las paredes llenas de instrumentos (Fig. 17). En la dedicatoria a la *Real Academia Matritense*, el traductor al castellano del *Essai*, Josep Vázquez y Morales, se expresaba de la siguiente manera:

El primor, y destreza en su execucion han hecho tan estupendos, y deliciosos los experimentos de la Electricidad, que no solo se ven en la Academia, sino que se admiran por todas partes, hasta haver llegado à ser expectaculo publico de la Corte. Los Grandes, y los Ministros observan estos experimentos, y yá hay muchos que tienen en sus Gavinetes la Màchina de Rotación, para adelantarlos por sí. No creo que ningún Phenomeno physico haya logrado tanto aplauso, tanta admiración. (Vázquez, 1747, pp. 6-7)

De entre los fenómenos eléctricos, la electricidad atmosférica había sido objeto de fascinación popular desde tiempos inmemoriales. El rayo simboliza la cólera de los dioses. Hesíodo, el poeta griego del siglos VIII a. C. canta en su *Teogonía* cómo un Zeus triunfante recibe de los hermanos de Cronos, “el trueno, el llameante rayo y el relámpago, que antes escondía la inmensa Gea, y apoyando e ellos gobierna sobre mortales e inmortales” (Hesiodo, 1986, p. 50). El rayo era el arma de los dioses para atemorizar a los humanos, un castigo divino:

People often hid under their beds in fear and trepidation or, as our second president, John Adams, described it ‘that panic terror and superstitious horror which was almost universal in violent storms of thunder and lightning’. When a house was set on fire by lightning, firemen applied water to neighboring houses but not to the one on fire, not daring to interfere with God’s judgment. (Block, 2004, p.84)

Los seres humanos no podían defenderse de tan terrible castigo, a menos que un nuevo Prometeo, que con las armas de la razón venciera al fuego del cielo. Cuando en 1752 Benjamín Franklin (1706-1790) anuncia desde Filadelfia que ha utilizado una cometa para hacer descender el *fuego eléctrico* de las nubes, demostrando la naturaleza

eléctrica del rayo (Franklin, 1753, pp. 565-567), se ve como una victoria del intelecto humano contra el poder devastador de las fuerzas de la naturaleza. El pararrayos aparece así como un instrumento:

capaz de [...] liberar nuestras casas y nuestras vidas de aquel terrible meteoro, que infunde en todas partes terror, y exercita con mas violenta su actividad, quanto mayor la robustez y resistencia de los cuerpos que se le oponen. (Juglà, 1788, pp. 4-5)

Podemos apreciar hoy que la popularidad del experimento de la cometa no se debe a su importancia intrínseca, pues, de hecho, eclipsó otros más importantes del propio Franklin sobre los fenómenos eléctricos (Cohen, 1990, p. 66). El experimento “de campo” efectuado con la cometa le sirvió a Franklin como prueba de que la electricidad se comportaba de la misma manera en la naturaleza y en el laboratorio (Hackmann 2009). Pero, como “diseño experimental”, la experiencia de la cometa ocupó un lugar menor en el canon de experimentos eléctricos, pues sucesivas repeticiones confirmaron simplemente los resultados de Franklin, sin aportar novedad alguna (Brenni, 2009, pp. 239-241). Así la popularidad del experimento de la cometa puede achacarse a lo que el filósofo alemán Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) denominó “el uso de lo extravagante al servicio de la sabiduría” (Fernández, 2006, p. 26), que no es otra cosa que enseñar mediante experimentos entretenidos a descubrir los secretos de la naturaleza.

El experimento de la cometa aunaba dos de las características distintivas de la ciencia ilustrada: entretenimiento y utilidad (Bensaude-Vincent & Blondel, 2008, p. 4). El pararrayos como dispositivo de protección contra descargas eléctricas disfrutaría rápidamente de amplia popularidad en Europa y América (Heering et al., 2009). Y el espectáculo de capturar rayos sirviéndose de una cometa constituyó pronto uno más entre los muchos entretenimientos científicos que se ofrecían al público de la época. Son muchas las funciones sociales atribuidas a tales espectáculos: desde la legitimación pública de la investigación científica, la defensa ilustrada del conocimiento empírico o la publicidad y venta de aparatos de física recreativa, por mencionar sólo algunas (Bertucci, 2008; Riskin, 2008).

Como veremos en este capítulo y en el siguiente, creemos que la carrera de la cometa en la física de los siglos XVIII y XIX se explica por su popularidad como juguete, es decir, por su capacidad para captar la atención del público, antes que por el interés de los resultados científicos que se obtuvieron con ella. En este capítulo

recorreremos el experimento de Franklin y sus principales réplicas europeas para mostrar que, efectivamente, no se obtuvo en ellos resultados notables que justificasen nuevas repeticiones. Sin embargo, el experimento pervive en sucesivas réplicas que, poco a poco, ponen de manifiesto su carácter eminentemente recreativo. Desde un punto de vista metodológico, la posibilidad de repetir un experimento se suele presentar como garantía de la veracidad de sus resultados. Pero las réplicas del experimento de Franklin sirvieron más bien para decantar su carácter de entretenimiento científico.

Presentaremos así, en primer lugar, las discusiones sobre la naturaleza eléctrica del rayo, y los experimentos propuestos para determinarlo durante el siglo XVIII. A continuación, expondremos el experimento de la cometa explicado por Franklin, así como el realizado simultáneamente en Francia por Jacques de Romas (1713-1776). Analizaremos después cómo algunos físicos menores (principalmente Tiberius Cavallo) replicaron el experimento durante los dos siglos siguientes sin obtener resultado reseñable. Sin embargo, las réplicas sirvieron para organizar un diseño experimental seguro que evitara muertes por electrocución. Este fue el paso decisivo para permitir que las cometas de Franklin ingresaran definitivamente en el acervo de la física recreativa.

## **2 LA NATURALEZA ELÉCTRICA DEL RAYO DURANTE EL SIGLO XVII**

Durante la primera mitad del siglo XVIII se sabía que los fenómenos eléctricos, al contrario de los magnéticos, podían ser generados por el hombre, ya sea frotando tubos de vidrio u otros materiales (Heilbron, 1999, pp. 234-60), o empleando las máquinas electrostáticas (Heilbron, 1999, pp. 229-45 y 213-9). Por lo tanto, había un interés especial por demostrar que estos fluidos eléctricos generados artificialmente (Heilbron, 1999, pp. 9-96; Fara, 2002, pp. 99-131) también estaban presentes en la naturaleza, como por ejemplo en los rayos producidos durante una tormenta (Heilbron, 1999, pp. 339-43). Había que pensar la manera de comprobar la cualidad de las descargas atmosféricas, y así poder conducir, por medio de algún dispositivo experimental, el fuego eléctrico desde las nubes al suelo, y de esta forma poder comprobar su naturaleza.

En una carta enviada por Franklin a John Lining, el 7 de noviembre de 1749, describe las similitudes entre el fuego eléctrico y el rayo, como por ejemplo, producen luz similar, funden metales, olor sulfuroso, entre otras (Heilbron, 1999, p. 340).

En la carta fechada el 29 de julio de 1749 y enviada por Benjamín Franklin a su amigo Peter Collinson (1694-1768), y publicada en el libro de Franklin *Experiments*

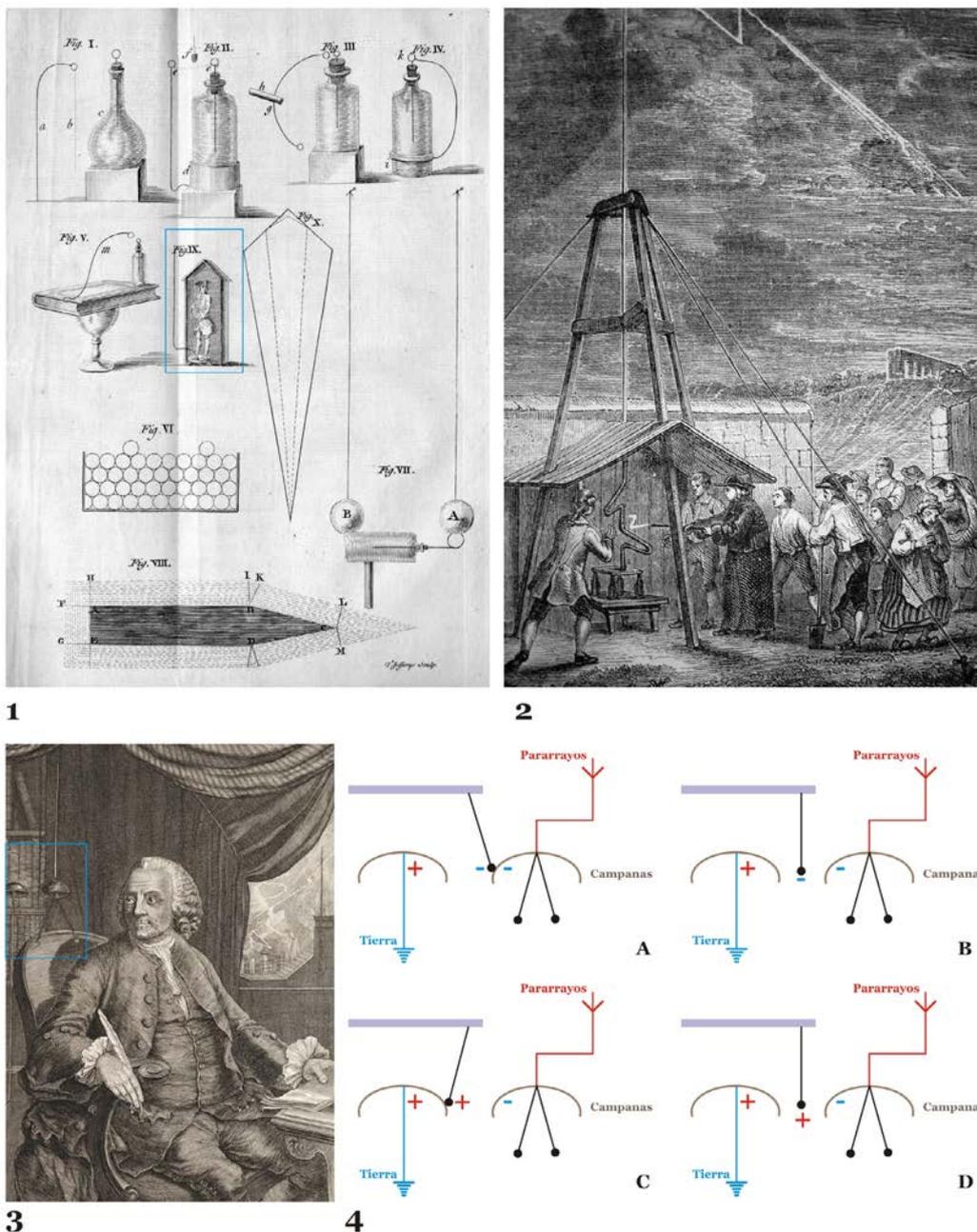
*and Observations on Electricity* (1751) y en ediciones posteriores (Franklin, 1769), plantea el siguiente experimento para determinar la naturaleza del rayo, es lo que se conoce como experimento de la garita (*sentry box*):

To determine the question, whether the clouds that contain lightning are electrified or not, I would propose an experiment to be try'd where it may be done conveniently. On the top of some high tower or steeple, place a kind of sentry-box (Fig. 18.1) big enough to contain a man and an electrical 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; so the sparks, if the rod is electrified, will strike from the rod to the wire, and not affect him. (Franklin, 1769, p. 66)

En 1752, el naturalista francés Thomas-François Dalibard (1709-1799), traductor al francés de la obra de Franklin, realizó el experimento de la garita con éxito y en presencia de testigos, durante una tormenta el 10 de mayo de 1752 sobre la ciudad francesa de Marly (Fig. 18.2). Los resultados se expusieron en una notificación a la *Académie des Sciences*, de París el 13 de mayo de 1752 (Cohen, 1990, p. 72; Heilbron, 1999, pp. 349-51).

Franklin, en este experimento, estaba aplicando una propiedad conocida como poder de las puntas, que es “the wonderful effect of pointed bodies, both in drawing off throwing off the electrical fire” (Franklin, 1769, p. 3). Esta idea, combinada con la de que el rayo es de naturaleza eléctrica, le hace pensar que, colocando una varilla puntiaguda en los edificios, un rayo podía descargar gradualmente a través de ella y por tanto protegerlo:

I say, if these things are so, 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? (Franklin, 1769, pp. 65-6)



**Fig. 18** Grabado de la obra *Experiments and Observations on Electricity* de Franklin (1751) (1). Grabado mostrando el experimento de Marly en la obra *Les Merveilles de la Science* (1867) de Louis Figuier (2). Retrato de Franklin, pintado en 1762 por el artista inglés Mason Chamberlin (1727–1787), donde se observa las campanas detectoras de tormentas (3). Funcionamiento de las campanas de Franklin (4).

Franklin escribió varias descripciones de cómo instalar los pararrayos en los edificios (Cohen, 1990, pp. 77-92; Fara, 2002, pp. 76-81; Schiffer, 2003, pp. 184-205). En una carta fechada en septiembre de 1753, comunica a Collison la colocación de un pararrayos en su casa de Filadelfia en septiembre de 1752, “I erected an iron rod to draw the lightning down into my house, in order to make some experiments on it...”

(Franklin, 1769, p. 112), a continuación menciona que ha instalado un dispositivo formado por dos campanas (Fig. 18.3) como aviso cuando el pararrayos estaba cargado, observando que:

I found the bells rang sometimes when there was no lightning or thunder, but only a dark cloud over the rod; that sometimes after a flash of lightning they would suddenly stop; and, at other times, when they had not rang before, they would, after a flash, suddenly begin to ring. (Franklin, 1769, p. 112)

Una de las campanas se conectaba al pararrayos y la otra a tierra (Fig. 18.4), cuando al acercarse una tormenta la campana conectada a la barra se cargaba negativamente, atrayendo el badajo (A) que se cargará por contacto negativamente (B), que será atraído hacia la otra campana. Al chocar con ella (C) se cargará positivamente repitiéndose el proceso (D). El resultado es un repiqueteo continuo cuando se acerca una tormenta.

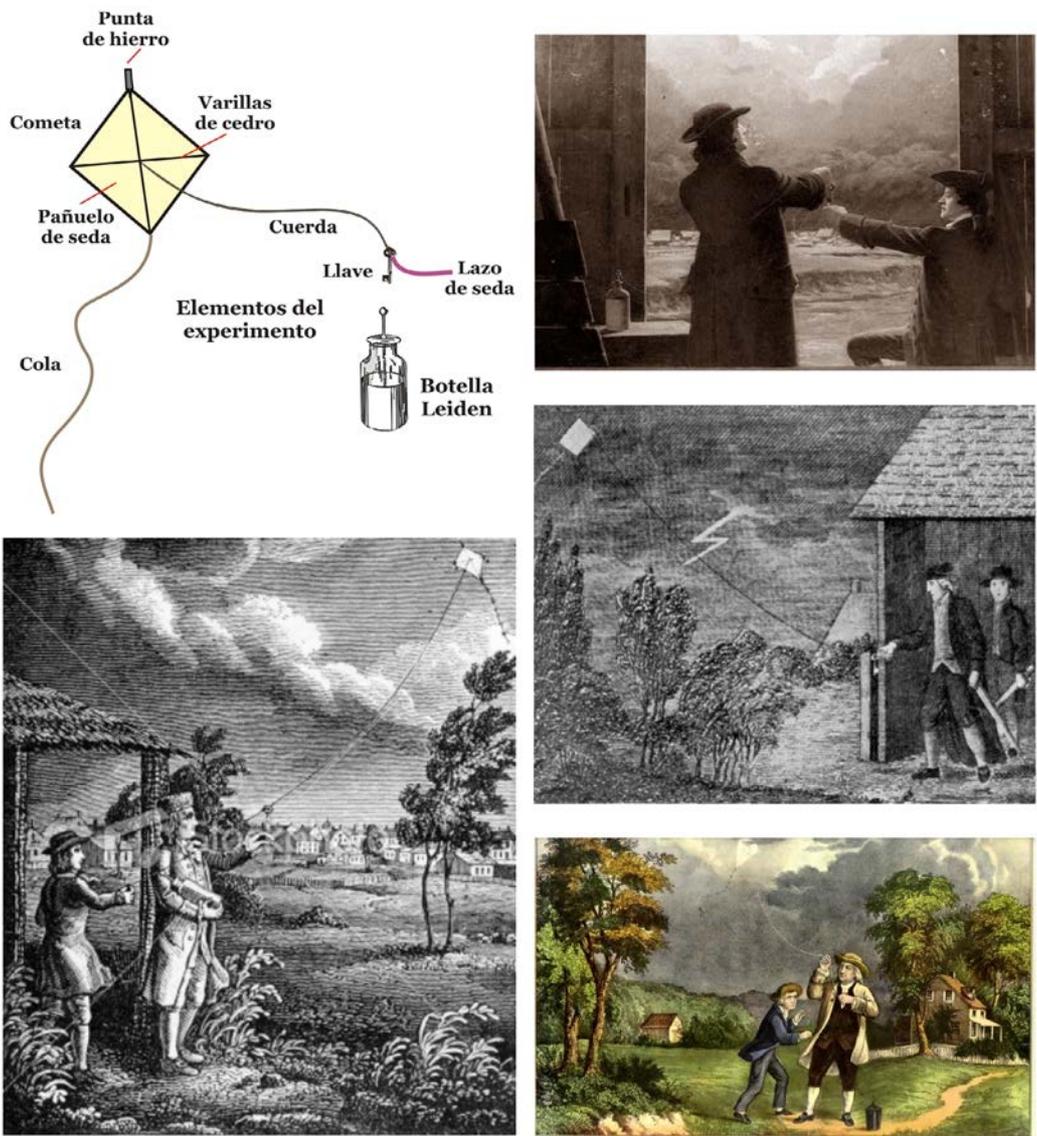
### **3 EL EXPERIMENTO DE LA COMETA DE FRANKLIN**

El experimento de la garita exige que el pararrayos esté en un sitio elevado, por lo que emplear una cometa ofrecía la posibilidad de buscar el rayo allí donde se produce, en lugar de atraerlo hasta la superficie de la tierra. En una carta a Collison fechada el 19 de octubre de 1752, leída en la *Royal Society* de Londres y publicada en 1753 en las *Philosophical Transaction* (Franklin, 1753, pp. 565-7), Franklin hace la siguiente declaración pública:

As frequent mention is made in the public papers from Europe of the Success of the Philadelphia experiment for drawing the electric fire from clouds by means of pointed rods of Iron erected on high buildings, etc. it may be agreeable to the curious to be informed, that the same Experiment has succeeded in Philadelphia, though' made in a different and more easy manner, which any one may try, as follows:

La carta empieza haciendo referencia a que, dada la popularidad del experimento de la garita (que denomina *Experimento de Filadelfia*) como alternativa propone emplear una cometa, que construye de la siguiente manera:

Make a small cross of two light strips of cedar, the arms so long as to reach to the four corners of a large thin silk handkerchief when extended; tie the corners of the handkerchief to the extremities of the cross, so you have the body of a kite; which being properly accommodated with a tail, loop and string, will rise in the air, like those made of paper; but this being of silk is fitter to bear the wet and wind of a thunder gust without tearing.



**Fig. 19** Esquema del experimento de la cometa de Franklin (arriba izquierda). En su *History and Present State of Electricity* (1767), Priestley, sostiene que Benjamín Franklin, durante el experimento, fue ayudado por su hijo William Franklin (1730-1813). La variada iconografía del experimento, sobre todo durante el siglo XIX, refleja esta circunstancia

A continuación coloca en la cometa una punta metálica, que hará de pararrayos y una llave al final del hilo que empleará como detector:

To the top of the upright stick of the cross is to be fixed a very sharp pointed wire, rising a foot or more above the wood. To the end of the twine, next to the hand, is to be tied a silk ribbon, and where the twine and the silk join, a key may be fastened. This kite is to be raised when a thunder gust appears to be coming on, and the person who holds the string must stand within a door, or window, or under some cover, so that the silk ribbon may not be wet; and care must be taken that the silk ribbon may not touch the frame of the door or window. As soon as any of the thunder-clouds come over the kite, the pointed wire will draw the electric fire from them, and the kite, with all the twine

will be electrified, and the loose filaments of the twine will stand out every way, and be attracted by an approaching finger. And when the rain has wet the kite and twine, so that it can conduct the electric fire freely, you will find it stream out plentifully from the key on the approach of your knuckle.

Una vez que tiene el sistema experimental (Fig. 19), describe los experimentos que se pueden realizar para determinar la naturaleza eléctrica del rayo:

At this key the phial<sup>[1]</sup> may be charged; and from electric fire thus obtained, spirits may be kindled, and all the other electric experiments be performed, which are usually done by the help of a rubbed glass<sup>[2]</sup> globe or tube; and thereby the *sameness* of the electric matter with that of lightning completely demonstrated. I was pleased to hear of the success of my experiments in France, and that they there begin to erect points upon their buildings. We had before placed them upon our academy and state-house spires.

El teólogo y químico inglés Joseph Priestley (1733-1804), en su obra *History and Present State of Electricity* (1767) adorna con más detalles la ejecución del experimento, y fija la fecha del mismo en junio de 1752 (Cohen, 1990. P. 69). Es decir, establece que se realizó antes de que Franklin tuviese conocimiento del experimento de Marly. Todo ello generó una serie de polémicas sobre si Franklin verdaderamente llegó a realizar este experimento, que aquí omitiremos<sup>3</sup>.

La fama de este experimento se extendió y pronto se rodeó de leyenda, aunque no aportó ningún dato nuevo a lo que ya se sabía:

Franklin's kite experiment may not have increased the knowledge gained during the Marly test, but it has entered scientific mythology because of its symbolic significance. Franklin's kite promotes a triumphal version of science in which progress is made through individual momentous discoveries. (Fara, 2002, p. 75)

---

<sup>1</sup> Se refiere a la botella de Leiden, que es un primitivo condensador eléctrico, resultado de los experimentos llevados a cabo, en 1745, por el holandés Pieter van Musschenbroek (1692-1761) en la ciudad de Leiden. Ante la necesidad de explicar la naturaleza del fluido eléctrico experimenta con una botella llena de agua y cerrada con un tapón atravesado por una varilla metálica que había sido enganchada al conductor de una máquina electrostática. Cuando un ayudante la descuelga, recibe una fuerte descarga, demostrándose que había acumulado electricidad. Benjamín Franklin realiza varios experimentos con este dispositivo, concluyendo que la electricidad (*fuego eléctrico*) es un fluido *imponderable* existente en toda la *materia ordinaria*, clasificando a las sustancias como eléctricamente positivas y negativas, de acuerdo con el exceso y defecto de este fluido (Cohen, 1990, pp. 24-7; Heilbron, 1999, pp. 312-23; Fara, 2002, pp. 51-61; Schiffer, 2003, pp. 33-55).

<sup>2</sup> Máquina electrostática.

<sup>3</sup> Encontramos autores a favor y en contra, como por ejemplo, el historiador Bertrand Cohen defiende la veracidad del experimento, basándose en las pruebas documentales (Cohen, 1990, p. 93-100). Por otro lado, el historiador Tom Tucker argumenta que Franklin propuso originalmente la idea para el experimento como una broma (Tucker, 2003). Todo ello a causa de que la *Royal Society* había hecho caso omiso de sus cartas sobre sus experimentos eléctricos, según Tucker al proponer el vuelo de la cometa eléctrica era una broma sutil, que no dejaba de ser muy peligroso. Pero cuando su propuesta llegó a Francia, donde el público lo tomó en serio, Franklin decidió seguirle el juego y afirmó que en realidad había llevado a cabo el experimento (Tucker, 2003, pp. xviii-xix).

Pero el símbolo que significa en el experimento de Franklin es una y otra vez la cometa, tal como muestra una y otra vez la iconografía (Fig. 20), más que ningún otro de sus muchos logros (Schiffer, 2003, p.1). Desde su realización, el público quedó cautivado por la imagen de la cometa, por razones que posiblemente se deriven de su simplicidad: el juguete es un símbolo inmediatamente accesible para cualquiera, aunque no se comprenda el objeto del experimento. De ahí su desmedido éxito popular, si lo juzgamos por su valor científico.



**Fig. 20** Algunos ejemplos de la iconografía popular del experimento de la cometa de Franklin: Sello conmemorativo del 250 aniversario del nacimiento de Benjamín Franklin (1). Dólar de plata conmemorativo del tricentenario de su nacimiento (2006) (2). Anuncio publicitario de 1953 de la compañías de manufacturas de cobre *Chase Brass and Copper Company, Incorporation* situada en Waterbury Connecticut (USA) (3). Anuncio publicitario de 1939 de la marca de whiskey *Haig & Haig Five Star Pinch* Scotch (4) Jarra de cerveza con el busto de Franklin (5)

#### 4 LAS CERFS-VOLANTS ELECTRIQUES DE ROMAS

Simultáneamente, en Francia y en concreto en la ciudad de Nérac, Jacques de Romas (1713-1776) reclama la prioridad del experimento con la cometa eléctrica (Cohen, 1990, pp. 100-9). Según relata su libro *Mémoire, sur les moyens de se garantir de la foudre dans les maisons* (1776), aunque el primer experimento lo realizó el 14 de mayo de 1753, tras leer las noticias del experimento de Marly (Romas, 1776, p. 7), se le ocurrió emplear una “cerf volant des enfants” (Romas, 1776, p. 11). Esta circunstancia la comunica mediante una carta (Romas, 1776 p. 11) enviada el 12 de julio de 1752 a la *Académie de Bordeaux*, en la que expone su intención de explorar la electrificación de las nubes con “les Barres électriques de M. Franklin” además de usar “un Jeu d’enfant”. Si se admite la fecha (julio 1752) que fija Priestley para el experimento de Franklin y que la noticia llega a Francia a través de una carta (Romas, 1776, p.110) del inglés William Watson (1715-1787) al abate francés Jean Antoine Nollet (1700-1770) fechada el 15 de enero de 1753, se deduce que Romas no fue el primero en emplear la cometa para demostrar la naturaleza del rayo, sino que fue Franklin (Cohen, 1990, p. 104).

En una memoria presentada a la *l'Académie royale des sciences* de Paris en 1755, describe la construcción de la cometa, así como sus dimensiones (Romas, 1755). Un resumen del contenido de esta memoria se puede leer en la voz COMETA ELÉCTRICO (*Cerf volant électrique*) de la versión castellana del *Diccionario de Física* (1796-1802) escrito por el zoólogo y filósofo francés Mathurin Jacques Brisson (1723-1806):

El cometa de que se valió Romás, tenía 7 pies y 5 pulgadas de alto y 3 pies de ancho en su mayor diámetro; siendo su superficie, reducida al cuadrado de unos 18 pies<sup>[4]</sup>. Romás echó su Cometa, y después de haberlo elevado á una altura perpendicular de unos 600 pies sobre la superficie de la tierra por medio de una cuerda de hilo, como hemos dicho arriba, de 780 pies de longitud, y cuya extremidad inferior se había atado un cordón de seda de algunos pies de largo, le aseguró á una péndola, cuyo peso era una piedra gruesa y que estaba atada debajo del cobertizo de una casa. [Fig. 21.1]

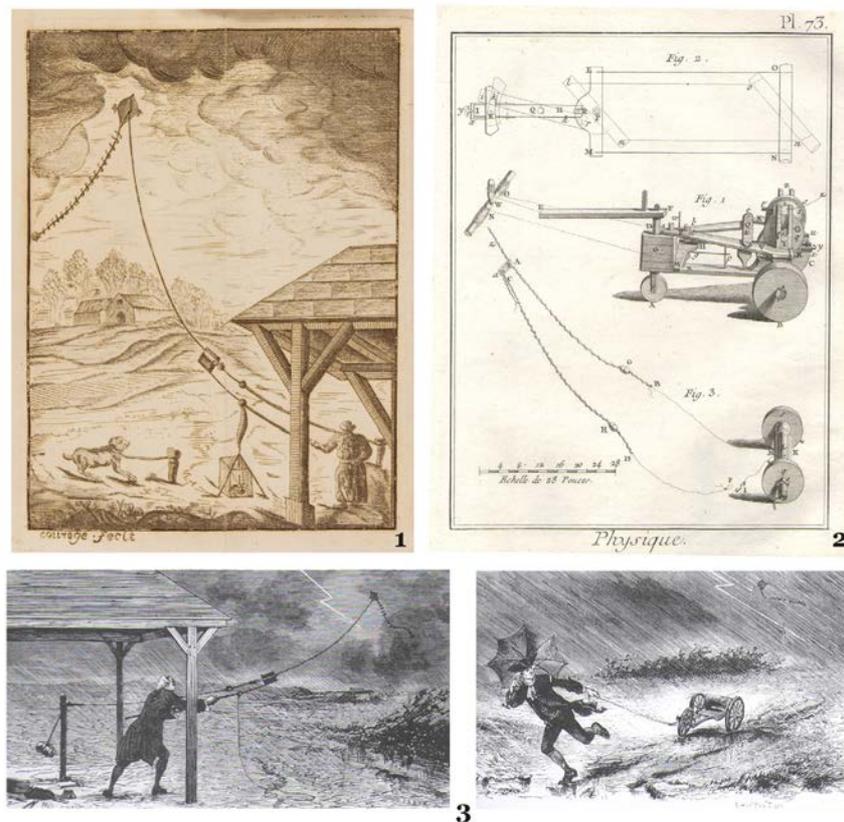
[...]

Además, añadió Romás á la cuerda un tubo de hoja de lata de un pie de longitud y de una pulgada de diámetro para excitar en el las chispas, inmediatamente que estuvieran electrizados la cometa y su cuerda. Pero á fin de evitar los riesgos que pueden correrse en igual caso excitando las chispas con la mano [...] ideo dicho Sabio un instrumentillo compuesto de un tubo de vidrio, y colocó en una de sus extremidades otro de hoja de lata, del que colgaba una cadena de hilo de alambre tan larga que llegase hasta la tierra

---

<sup>4</sup> Que corresponde en medidas actuales a 240,3 cm de alto y 97,2 cm de ancho y una superficie de 1,889 m<sup>2</sup>.

cuando se excitasen las chispas, por cuyo motivo dio a este instrumento el nombre de Excitador... (Brisson, 1796, Tomo III, pp. 143-4)



**Fig. 21** Grabado del experimento de Romas según su *Mémorire, sur les moyens...* (1776) (1). Grabado del carro eléctrico de Romas según el *Dictionnaire de Physique* (1781) de Brisson (2). Grabados de la revista francesa *La Nature* de 1877, describiendo las experiencias de Romas (3)

Si leemos las descripciones de los experimentos con cometas de Romas y lo comparamos con la narración de Franklin, está claro que están más desarrollados, entre otras cosas en el aspecto referentes a los detalles constructivos de la cometa. La usada por Romas debió ser una con forma de *pera* (Fig. 22.2), ya que eran las más populares en Francia en esa época (Hart, 1982, p. 94), y así lo se representa tanto en el grabado de la memoria de Romas (Fig. 21.1) como en grabados posteriores (Fig. 22.1). Por otro lado, Franklin hace su cometa con un pañuelo, luego tendría forma de cuadrilátero (Fig. 22.4), cometa también popular (Hart, 1982, pp.84-93) en Europa durante el XVIII, sin embargo, al contrario que Romas no fija las dimensiones de la misma.

Romas, al contrario que Franklin, realiza varias demostraciones públicas con cometas eléctricas, como la del 14 de mayo y el 7 de junio de 1753, contribuyendo a su popularización en Europa. Durante estas demostraciones sacrifica, con sendas descargas eléctricas, a una paloma y un perro, según se puede apreciar en el grabado de la Fig.

21.1, ya que una de las similitudes entre el rayo y el fuego eléctrico es que ambos matan a las personas y animales (Romás, 1776, pp. 87-9). En una carta (Romás, 1757, pp. 514-7) enviada a Nollet el 26 de abril de 1757, describe como durante una tormenta, en la que vuela su cometa, consigue generar chispas en el excitador de hasta 8 pies (más de dos metros y medio). Por lo tanto:

Esto manifiesta que sería muy peligroso echar el Cometa quando la tempestad está ya muy próxima, o ha comenzado a llover, porque para esa maniobra es necesario tener la cuerda [...] buscó Romás un medio de hacerlo sin tocar jamás á la cuerda, el que creó haber hallado, valiéndose de una pequeña máquina que construyó [Fig. 21.2], de modo que se sujeta de muy lejos con tres cordones de seda á los que puede darse la longitud que se quiera. Esta máquina [...] no es otra cosa que un *carrito*<sup>5</sup> que desenvuelve la cuerda del Cometa... (Brisson, 1796, Tomo III p. 145)



**Fig. 22** Experimento de Romas realizado en Nérac (Francia) el 7 de junio de 1753, en el que se ve utilizando un *excitador*, según el grabado de la obra *Les Merveilles de la Science* (1867) de Louis Figuier (1). Cometa original del siglo XVIII del tipo utilizado por Romás (2). Experimento de Franklin en *Les Merveilles de la Science* (1867) de Louis Figuier (3). *La cometa* (1778) de Francisco de Goya (1746-1828) (4)

<sup>5</sup> Este artefacto es descrito con gran detalle en la voz CARRO ELECTRICO (Brisson, 1796, Tomo II, pp. 290-301).

Tal como le decía Nollet en una carta a Franklin, no podía estar más a favor de los experimentalistas aficionados que alimentaban la admiración de los curiosos con sus demostraciones (citado en Bensaude-Vincent & Blondel, 2008, p. 6), por aterradores que fuesen. La peligrosidad de los experimentos con cometas y pararrayos contribuía a su espectacularidad. El accidente mortal más famoso fue el sufrido por el físico alemán Georg Wilhelm Richmann (1711-1753) en San Petersburgo el 6 de agosto de 1753, quien intentando repetir el experimento de Marly, se aproxima a un pararrayos aislado durante una tormenta, produciéndose una descarga eléctrica mortal (Schiffer, 2003, pp. 165-6).

Los experimentos eléctricos con cometas aúnan pues utilidad y entretenimiento. Respecto a lo primero, los experimentos de Marly y el de la cometa, proporcionaron la tecnología necesaria para el desarrollo del pararrayos (Schiffer, 2003, p. 167). Las distintas réplicas de los experimentos realizadas en América y Europa (Mottelay, 1922, p. 320), así como sus distintos enfoques, permitieron establecer un consenso entre la utilidad y el diseño apropiado del instrumento. Así, por ejemplo, el abate francés Pierre Bertholon (1741-1800) emplea, en sus experimentos (Bertholon, 1787, pp. 32-66), dos estrategias para demostrar la utilidad del pararrayos:

First he demonstrated that atmospheric electricity could not be distinguished from frictional electricity. For this purpose Bertholon charged a conductor with electricity from an electrical kite and performed experiments such as the ignition of spirit, Franklin's bells, the killing of small animals, and the melting of small wires. Having established this identity, Bertholon used this knowledge in the field of natural philosophy to make the utility of lightning rods plausible. (Heering, 2009, p.125)

Así que poco a poco proliferaron los pararrayos instalados en los edificios de América y Europa<sup>6</sup> (Heering et al., 2009, p. 9-10).

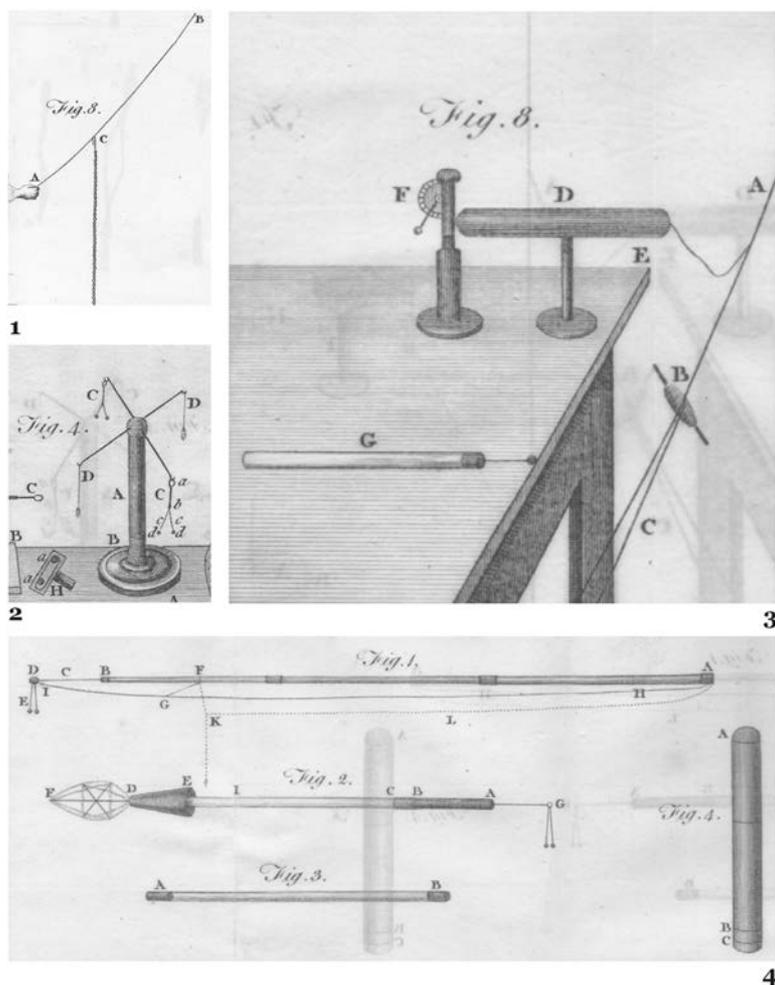
Respecto al entretenimiento, las demostraciones de Romas están cargadas de una mezcla de diversión y temor. En 1759, intentó realizar en Burdeos un experimento con una cometa, en presencia del intendente de la provincia, Mr. Tourny, en un jardín público. Mientras esperaba que viniera la tormenta, guardó el artefacto dentro de un café, con tan mala suerte que cuando llegó la tormenta, cayó un rayo sobre el edificio. El dueño del establecimiento convencido que el rayo había sido atraído por la máquina infernal, destruyó la cometa (Hart, 1982, p. 100; Berger & Amar, 2009, p. 534).

---

<sup>6</sup> La implantación de los pararrayos en Francia sufrió un retraso debido a las reticencias de Nollet, ya que dudaba si un pararrayos protegía o *atraía* los rayos a los edificios, por lo que proponía antes de su uso generalizado establecer no sólo su utilidad, sino la seguridad del mismo (Heering, 2009, pp. 121-2).

Como vamos a ver a continuación, al intentar replicar estos experimentos, su interés científico y su carácter recreativo se van decantando. No se obtienen nuevos resultados, pero el experimento se vuelve más seguro y accesible, por lo que va adquiriendo vida propia como divertimento científico.

## 5 LA COMETA EN LOS ESTUDIOS DE LA ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA DURANTE LOS SIGLOS XVIII Y XIX



**Fig. 23** *Treatise* (1782) de Cavallo: fig. 8 de la plancha II (1). fig. 4 de la plancha I (2). fig. 8 de la plancha III (3). fig. 1 y 2 de la plancha III (4)

Las experiencias con cometas eléctricas pronto se recogieron en los tratados de electricidad (Bertholon, 1787, pp. 32-66; Beccaria, 1776, pp. 461-2; Veau-Delaunay, 1809, pp. 185-6). En algunos, incluso, la cometa fue tratada como un instrumento científico dentro de un sistema experimental para el estudio no solo de los rayos en las tormentas, sino del estado eléctrico de la atmósfera (Cavallo, 1782). Analizaremos la presencia de la cometa en *A Complete Treatise on Electricity* (1777) del electricista

inglés de origen italiano Tiberius Cavallo (1749-1809), uno de los más completos de la época, llega a tener tres tomos en su última edición de 1786-95. En él se describe la construcción de una gran variedad de instrumentos para su uso en experimentos eléctricos. En la parte IV de la segunda edición del libro, de 1782, con el epígrafe *New Experiments in Electricity* trata del estudio de la electricidad en la atmósfera, y describe los instrumentos que se usan para tal fin, siendo el primero la cometa eléctrica:

The first instrument that I made use of to observe the Electricity of the atmosphere, was an electrical kite, which I had constructed, not with a view to observe the Electricity of the air, for this, I thought, was very weak and seldom to be observed; but as an instrument, which could be occasionally used in time of a thunder-storm, in order to observe the Electricity of the clouds. The kite however being just finished, together with its string, which contained a brass wire through its whole length, I raised it the 31st of August 1775, at seven of the clock in the afternoon, the weather being a little cloudy, and the wind just sufficient for the purpose. The extremity of the string being insulated, I applied my fingers to it, which, contrary to my expectation, drew very vivid, and pungent sparks: I charged a coated phial at the string several times; but I did not then observe the quality of the Electricity. This successful experiment induced me to raise the kite very often, and to keep it up, for several hours together, thinking that if any periodical Electricity, or any change of its quality took place in the atmosphere, it might very probably be discovered by this instrument. (Cavallo, 1782, pp. 357-8)

Cavallo piensa, en principio, que con la cometa sólo podía estudiar las descargas eléctricas de las nubes, tal como había descrito Franklin y Romas. Pero en su primer experimento se da cuenta que la cometa está captando la electricidad, lo comprueba por las chispas existentes en la cuerda al acercar los dedos a la misma, y no hay una tormenta. Esto le induce a pensar que puede ser utilizada como instrumento de detección de la electricidad atmosférica. La construcción de la cometa y los electrómetros<sup>7</sup> empleados para *cuantificar* la electricidad captada, son descritos con gran detalle<sup>8</sup>. Cavallo deduce de sus experimentos que la cometa capta la electricidad

---

<sup>7</sup> Instrumento empleado para averiguar si un cuerpo está cargado de electricidad y conocer su signo. Fue uno de los primeros aparatos empleados en el estudio de los fenómenos eléctricos. El más conocido es el denominado *electrómetro de dos hojas*, inventado por el inglés Abraham Bennet (1749-1799) en 1786, que consiste en un recipiente metálico llamado jaula, unido a tierra por un conductor, en el que penetra una varilla metálica terminada en dos finas láminas de oro o de aluminio y cuyo extremo superior termina en una bola. Al aproximar un cuerpo cargado a la bola, las láminas divergen. Los resultados obtenidos están en función del aumento o disminución de la separación de las láminas. (Schiffer, 2003, pp. 176-9)

<sup>8</sup> “The first electrical kite, that I constructed, was seven feet high, and it was made of paper with a stick or straiter, and a cane-bow, like the kites commonly used by school-boys. On the upper part of the straiter I fixed an iron spike, projecting about a foot above the kite, which, I then thought, was absolutely necessary to collect the Electricity, and I covered the paper of the kite with turpentine, in order to defend it from the rain. This kite, perfect as I thought it to be, in its construction, and lit for the experiments, for which it was intended, soon manifested its imperfections, and after being raised a few times, it became quite unfit for farther use; it being so large, and consequently heavy, that it could not be used, except when the wind was strong, and then after much trouble in raising and drawing it in, it often received some damage, which soon obliged me to construct other kites upon a different plan, in order to ascertain which method

del aire a través del hilo, no de la propia cometa. Por lo tanto, con colocarle puntas o revestimientos de metal no se consigue que la cometa capte más electricidad, sino que la hace más pesada y difícil de volar.

Prueba diferentes maneras de construir la cuerda de la cometa para que fuera lo más *conductora* posible, ya que es lo que captaba la electricidad. Establece las medidas de seguridad para aislar la cuerda de la cometa.

[...] In raising me kite when the weather is very cloudy and rainy, in which time there is fear of meeting with great quantity of Electricity, I generally use to hang upon the string AB, fig. 8. Plate II [Fig. 23.1] the hook of a chain C, the other extremity of which falls upon me ground. Sometimes I use another caution besides, which is to stand upon an insulating stool; in which situation, I think, that if any great quantity of Electricity, suddenly discharged by the clouds, strikes the kite, it cannot much affect my person As to insulated reels, and such like instruments, that some gentlemen have used for to raise the kite, without danger of receiving any shock; fit for the purpose as they may appear to be in theory, they are yet very inconvenient to be managed. Except me kite be raised in time of a thunderstorm, there is no great danger for the Operator to receive any shock. Although I have raised my electrical kite hundreds of times without any caution whatever, I have very seldom received a few exceedingly slight shocks in my arms. In time thunderstorm, if the kite has not been raised before, I would not advise a person to raise it while the stormy clouds are just overhead; the danger in such time being very great, even with the precautions above mentioned at that time, without raising the kite, the Electricity of the clouds may be observed by a cork-ball electrometer<sup>9</sup> held in the hand in the open place, or if it rains, by my electrometer for the rain; which will be described hereafter. (Cavallo, 1782, pp. 364-6)

A continuación Cavallo describe otro electrómetro que emplea cuando los experimentos los realiza con lluvia, o si la electricidad atmosférica es lo suficientemente alta:

When the kite has been raised, I generally introduce the string through a window in a room of the house, and fasten it to a strong silk lace, the extremity of which is generally

---

would answer the best for my t purpose. I gradually lessened their size, and varied their form, till I observed upon trial, that a common school-boy's kite was as good an electrical kite as mine. In consequence of which I constructed my kites in the most simple manner, and in nothing different from the children's kites, except that I covered them with varnish, or with well boiled linseed oil, in order to defend them from the rain, and I covered the back part of the straiter with tin-foil, which however has not me least power to increase its Electricity. I also furnish the upper extremity of the straiter with a slender wire pointed, which, in time of a thunder-storm, may perhaps draw the Electricity from the clouds, somewhat more effectually; but, in general, I find [...] that it does not in the least affect the Electricity at the string. The kites, that I generally have used, are about four feet high, and little above two feet wide. This size, I find, is the most convenient, because it renders them easy to be managed, and at the same time they can draw a sufficient quantity of string As for silk or linen kites, they require a good deal of wind to be raised, and then they are not so cheap nor so easy to be made, as paper kites are. The string sometimes breaks, and the kite is lost, or broken, for which reason, these kites should be made as cheap and as simple as possible.” (Cavallo, 1782, pp. 359-62).

<sup>9</sup> El *electrómetro de bolas de corcho* era el electrómetro más sencillo destinado a detentar y “cuantificar” la electricidad existente. Lo describe Cavallo en su *Treatise* (1782) en el capítulo III y en la fig. 4 de la Plancha I (Fig. 23.2), indicando que fue inventado por el inglés John Canton (1718-1772).

tied to a heavy chair in the room. In fig. 8 of Plate III. [Fig. 23.3] A B represents part of the string of the kite which comes within the room; C represents the silk lace; D E, a small prime Conductor, which, by means of a small wire, is connected with the string of the kite; and F represents the quadrant electrometer, fixed upon a stand of glass covered with sealing-wax, which I used to put near the prime Conductor, rather than to fix it in a bale upon the Conductor, because the string A B sometimes shakes so as to pull the prime Conductor down; in which case the quadrant electrometer remains safe upon the table, otherwise it would be broken, as I have often experienced before I thought of this method. G represents a glass tube, about eighteen inches long, with a knobbed wire cemented to its extremity; which instrument I use to observe the quality of the Electricity, when the Electricity of the kite is so strong that I think it not safe to come very near the string. The method is as follows: I hold the instrument by that extremity of the glass tube which is the farthest from the wire, and touch the string of the kite with the knob of its wire, which, being insulated, acquires a small quantity of Electricity from it; which is sufficient to ascertain its quality when the knob of the instrument is brought near an electrified electrometer. (Cavallo, 1782, pp. 366-7)

Con este sistema experimental Cavallo, realiza durante dos años experiencias relacionadas con la electricidad atmosférica. En concreto, la primera está fechada el 2 de septiembre de 1775 y la última el 8 de enero de 1777. Describe un total de veintidós experiencias (Cavallo, 1782, pp. 370-92), deduciendo las siguientes leyes:

- I. The air appears to be electrified at all times <sup>[10]</sup>; its Electricity is constantly positive, and much stronger in frosty, than in warm weather; but it is by no means less in the night than in the day-time.
- II. The presence of the clouds generally lessens the Electricity of the kite: sometimes it has no effect upon it; and it is very seldom that it increases it a little.
- III. When it rains, the Electricity of the kite is generally negative, and very seldom positive.
- IV. The aurora borealis seems not to affect the Electricity of the kite.
- V. The electrical spark taken from the string of the kite, or from any insulated Conductor connected with it, especially when it does not rain, is very seldom longer than a quarter of an inch; but it is exceedingly pungent. When the index of the electrometer is not higher than 20°, the person that takes the spark will feel the effect of it in his legs; it appearing more like the discharge of the electric jar, than the spark taken from the prime Conductor of electrical machine.
- VI. The Electricity of the kite is in general stronger or weaker, according as the string is longer or shorter; but it does not keep any exact proportion to it: the Electricity, for instance, brought down by a string of a hundred yards, may raise the index of the electrometer to 20° when, with double that length of string, the index of the electrometer will not go higher than 25°.
- VII. When the weather is damp, and the Electricity is pretty strong, the index of the electrometer, after taking a spark from the string, or presenting the knob of a coated phial to it, rises surprisingly quick to its usual place; but in dry and warm weather, it rises exceeding flow. (Cavallo, 1782, pp. 392-4)

A continuación describe otros aparatos, distintos a la cometa, los que denomina *Atmospherical Electrometer* y *Electrometer for the Rain* (fig. 1 y 2 de la plancha III)

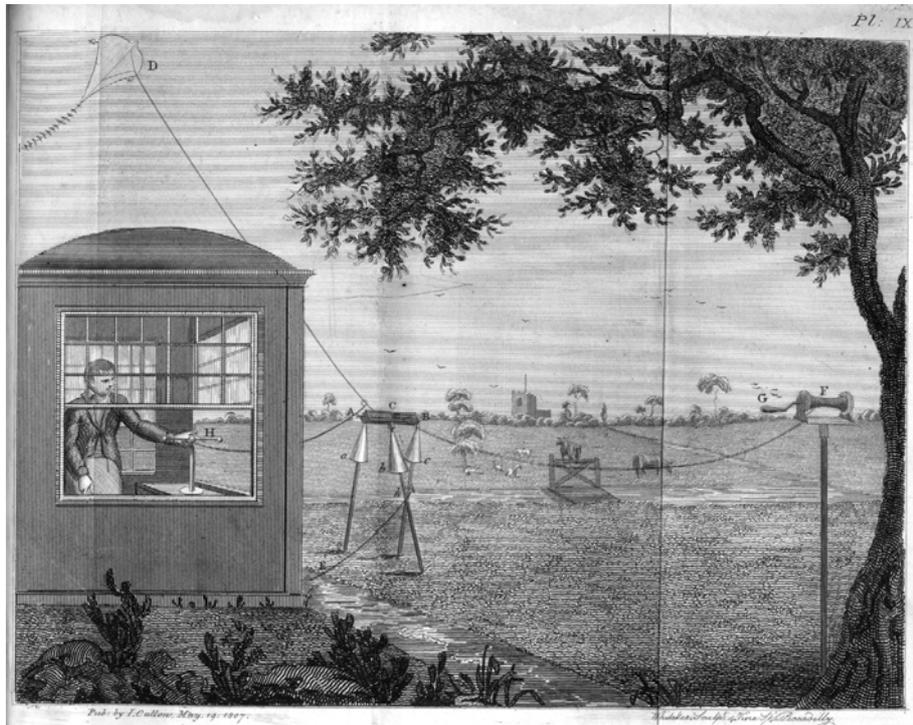
---

<sup>10</sup> El abad italiano Giambattista Beccaria (1716-1781) lo había confirmado en un experimento con cometas en el año 1756 (Cohen, 1990, pp. 107-8).

(Fig. 23.4), con los que realiza otros experimentos con los que obtiene resultados similares.

Cavallo, pese a ser el más sistemático de los experimentadores con cometas de su época, llegó a conclusiones que no tuvieron una gran repercusión. Su mayor logro fue sistematizar la práctica experimental haciendo que el uso de las cometas eléctricas fuera más seguro, circunstancia que facilitaría su reproducción posterior.

Otros físicos experimentales, amigos de Franklin como el reverendo americano Ebenezer Kinnersley (1711-1778) y John Lining realizaron también experimentos con cometas eléctricas (Cohen, 1990, pp. 106-7), sin más aportación que la confirmación de la validez del experimento. El inventor de la botella de Leiden, el holandés Pieter van Musschenbroek (1692-1761), en su obra póstuma *Introductio ad Philosophiam Naturalem* (1762), describe varios experimentos con cometas eléctricas. Musschenbroek genera espectaculares y ruidosas chispas, y como Romas, usa animales para experimentar con ellos el efecto del fuego eléctrico (Musschenbroek, 1762, vol. I pp. 295-6).



**Fig. 24** Equipamiento para experimentos con cometas en *Practical Electricity and Galvanism* (1821) de Cuthbertson

A finales del XVIII, el empleo de la cometa como instrumento de estudio de la electricidad fue paulatinamente desapareciendo. A la falta de nuevos resultados se suma

el cambio en la propia orientación de los experimentos eléctricos: aparecen las primeras leyes analíticas y también los primeros aparatos destinados a medir cuantitativamente los fenómenos eléctricos (Roche, 1998, pp. 163-87; Heilbron, 1999, pp. 449-489). Así, durante el siglo XIX, tan solo unas pocas publicaciones de la época, de manera anecdótica o introductoria, describirán experimentos sobre la electricidad atmosférica en donde se emplean cometas. Por ejemplo, el mostrado en la Fig. 24, que aparece en el libro *Practical Electricity and Galvanism* (1821), catálogo del constructor de instrumentos inglés John Cuthbertson (1743-1821). Destaca la seguridad con que está dotado este sistema experimental, algo fundamental para su venta entre aficionados a la física recreativa.

En 1827, por medio de un tren de cometas en Ginebra, el ingeniero y físico Jean-Daniel Colladon (1802-1893), realiza experiencias con cometas eléctricas, según describe en un artículo publicado en la revista *La Nature*, en los que la dimensión recreativa ya está decididamente presente. No hay novedad científica, pero sí un gran espectáculo:

Dans l'automne de 1827 je vins en Suisse, j'apportai avec moi mon galvanomètre et je renouvelai mes essais en temps parfaitement serein et en temps de pluie; après avoir constaté qu'en temps serein il suffit de s'élever d'environ 100 mètres pour avoir des signes visibles et tangibles d'électricité positive, et après avoir montré que sur une montagne les symptômes d'électricité sont sensiblement les mêmes et ont la même intensité que 700 mètres plus bas dans la plaine, j'essayai, par des temps pluvieux, de mesurer l'électricité des nuages, et pour cela j'entrepris de m'élever à environ 500 mètres au-dessus du sol. Je faisais ces expériences avec des cerfs-volants de grandeur moyenne, en toile, munis de ficelles conductrices par un fil d'argent qui doublait la ficelle, mais pour éviter de construire un cerf-volant de grandeur extraordinaire, j'employai trois cerfs-volants attachés successivement l'un au dos de l'autre.

En effet, si on donne à un cerf-volant plus de ficelle qu'il n'en peut soulever, il s'éloigne bien, mais il ne monte plus et la ficelle de trop traîne sur le sol. Mais attachez ce cerf-volant à un autre, le second s'élèvera à son tour autant que le premier et vous doublerez la hauteur, de même pour un troisième cerf-volant attaché au dos du second, qui triple alors la hauteur, et j'atteignis ainsi près des 500 mètres avec une ficelle conductrice.

Ces expériences doivent être faites avec précaution, si on veut éviter de se faire foudroyer, comme Reichmann. Je faisais ces expériences dans la campagne de mon parent, près de Genève, mais je connaissais le sujet, j'avais eu soin de placer hors de la chambre et d'enfoncer en terre, dans un terrain humide, une barre de fer qui s'élevait jusqu'à la fenêtre ou elle se terminait par une boule. J'opérais dans une vaste chambre ayant de hautes fenêtres; je développais la ficelle avec un treuil spécial en verre, et j'attachais finalement mon cerf-volant avec un long cordon de soie dans la chambre, en laissant les étincelles foudroyer, de la boule terminant la ficelle, à la boule qui communiquait avec le sol, et cela avec un coup à sec comme aurait fait un petit pistolet.

*J'eus alors un spectacle magnifique qui m'enthousiasma. Il ne tonnait nulle part au dehors, mais l'électricité conduite par la ficelle qui pouvait avoir en tout 400 mètres de longueur s'échappait incessamment et produisait des étincelles, longues de près d'un*

*mètre qui formaient de zigzags, avaient toutes les couleurs du blanc, du rouge et même du violet.* (Colladon, 1887, pp. 97-8; cursivas nuestras)

Encontramos también réplicas del experimento original con medios modernos, como la que realiza en 1885, el meteorólogo americano Alexander McAdie (1863-1943) en el Observatorio de Blue Hill, utilizando instrumentos de medición del potencial eléctrico (McAdie, 1891, pp. 97-108; McAdie, 1897, pp. 739-47) y cometas celulares. Experimento del que, por supuesto, no se siguió ninguna conclusión original.

El carácter recreativo de los experimentos con cometas queda ya definitivamente a la vista en los trabajos del denominado *Franklin Kite Club*, en la década de los 30 del siglo XIX, en Estados Unidos, tal como es comentado por el meteorólogo Cleveland Abbe (1838-1916) en una nota publicada en la edición de noviembre de 1896 del *Monthly Weather Review*<sup>11</sup>:

In 1835-36 several gentlemen formed a society with the name of 'The Franklin Kite Club' for the purpose of marking electrical experiment. For a considerable time they met once a week at the City Hospital grounds and flew their kites. These were generally square in shape, made of muslin or silk stretched over a framework of cane reeds, varying in size from 6 feet upward some being 20 feet square. For flying the kites annealed copper wire was used, wound upon a heavy reel 2 or 3 feet in diameter insulated by being placed on glass support. When one kite was up sometimes a number of others would be sent upon the same string. The reel being inside the fence the wire from the kite crossed over the road. Upon one occasion as a cartman passed, gazing at the kites he stopped directly under the wire and was told to catch hold of it and see how hard it pulled. In order to reach in he stood up on his cart, putting one foot on the horse's back. When he touched the wire the shock went through him as also the horse, causing the latter to jump and the man to turn a somersault, much to the amusement of the lookers on, among who was Taylor.

It was the incident and other of a similar character connected with the Kite Club, that turned his youthful mind to science and especially to electrical phenomena. (Abbe, 1896, p. 416)

## 6 CONCLUSIONES

En resumidas cuentas, el primer vuelo de la cometa como proto-instrumento científico en el campo de la experimentación eléctrica apenas dura un siglo. Las sucesivas réplicas del experimento original decantaron como principal componente del mismo su carácter recreativo, una vez garantizada la seguridad del aparato. La cometa dejaba de ser un simple juguete para convertirse así en un juguete científico. Como dice Gerard L'E Turner:

---

<sup>11</sup> Véase también Espy (1841, pp. 167,175).

The way in which yesterday's science so often becomes today's recreation does not make it any the less scientific. Indeed, much scientific, and other, knowledge is absorbed consciously or unconsciously through play. (Turner, 1987, p. 384)

Al contrario que la cometa eléctrica, existen en la historia de la ciencia y la tecnología, otros juegos que se han transformado en instrumentos científicos y han perdurado hasta nuestros días. Así por ejemplo, el funcionamiento del trompo o peonza, transformado en giróscopo, era una buena forma de explicar la rotación de la Tierra durante el siglo XIX (Turner, 1987, p. 384). El estudio de la dinámica de este juguete transformado en científico tuvo mayor suerte que la cometa, ya que algunas de las aplicaciones tecnológicas que basan su fundamento en el giróscopo se siguen utilizando hoy en día<sup>12</sup>.

Sin embargo, a pesar de su corta carrera científica, no debemos menospreciar el poder del experimento de Franklin para cautivar la imaginación popular e influir así sobre el curso de la ciencia. Como vamos a ver en el capítulo siguiente, la cometa llega a volar entre disciplinas para incorporarse como objeto teórico a la mecánica práctica.

---

<sup>12</sup> Las actuales brújulas giroscópicas, la estabilización de los barcos o los satélites en órbita, son aplicaciones actuales que basan su funcionamiento gracias al estudio de la dinámica de este juguete transformado en científico (Williams, 1982, pp. 374, 407-9).

### 3 LA COMETA Y LA MECÁNICA

---

#### 1 INTRODUCCIÓN

En el año 1758, la *Academia Real de Ciencias y Bellas Artes* de Berlín publica el volumen que recoge las memorias escritas en el año 1756. En la sección de matemáticas, el matemático suizo Leonard Euler (1707-1783) publica tres memorias, una de ellas dedicada al estudio de los molinos de viento (Euler, 1758). En ese mismo volumen, su hijo mayor, Johann Albert Euler (1734-1800), que firma bajo el nombre *Mr. Euler Le fils*, hace lo propio con una memoria dedicada al estudio de la mecánica del vuelo de una cometa (Euler, J. A., 1758). El joven Euler intenta explicar la mecánica el vuelo de las cometas desde los planteamientos de la mecánica racional, para así poder construir un objeto volador que se eleve lo más alto posible en los experimentos eléctricos.

Analizaremos cómo la cometa, en manos de Johann Albert Euler, se transforma en un objeto matemático cuyo funcionamiento se analiza desde los presupuestos de la mecánica racional, tal y como había hecho su padre y otros autores de su época al tratar el funcionamiento de otras máquinas hidráulicas, como las bombas o los molinos de viento. Se abre con ello un nuevo camino para la cometa en la ciencia, ya no como proto-instrumento científico, sino como objeto de modelización teórica. Pero como ya sucediera con el experimento de Franklin, los análisis de Euler no arrojaron resultados de interés que permitieran nuevos desarrollos teóricos.

Sin embargo, la cometa emprende también aquí una segunda navegación recreativa, al incorporarse como ilustración de algunos principios teóricos en obras de popularización y enseñanza de la física a lo largo de los siglos XVIII y XIX. Cuando, con el cambio de siglo, la cometa pierde su popularidad como juguete, su carrera en la física, teórica y experimental, llega a su fin.

## 2 LOS EULER Y EL ESTUDIO DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS DESDE LA MECÁNICA RACIONAL

A finales del siglo XVII y a lo largo del siglo XVIII existieron diferentes formas de abordar el estudio de lo que se conoce en la actualidad como *máquinas hidráulicas*<sup>1</sup>. Algunos autores emplearon métodos basados en conocimientos adquiridos por la práctica artesanal o el empleo de modelos experimentales a escala (Derry & Willians, 1977, pp. 351-73; Reynolds, 1983; González, 1992). Otros, como Johann Bernoulli (1667-1748), Daniel Bernoulli (1700-1782), Jean le Rond d'Alembert (1717-1783), Leonhard Euler o Joseph Louis de Lagrange (1736-1813) abordaron el estudio de este tipo de máquinas empleando los métodos de la mecánica racional. Estos autores propusieron a lo largo del siglo XVIII diversos modelos matemáticos para fenómenos como el movimiento de un cuerpo en el interior de un fluido, ya sea flotando o sumergido en él (*problema de la resistencia*), el movimiento de los fluidos por tubos y canales o el vaciado de depósitos a través de orificios (*problema de la descarga*).

Estos estudios permitieron abordar la solución de problemas prácticos que no habían podido ser resueltos con anterioridad. Entre ellos, el movimiento de proyectiles en medios resistentes (Hidalgo, 1993), las máquinas hidráulicas de impulsión (ruedas y molinos), las bombas para la elevación de agua o las máquinas de movimiento por reacción o turbinas hidráulicas (Rouse & Ince, 1957; Sellés, 1999; Reynolds, 1983, pp. 237-42). Los trabajos de Leonard y Johann Albert Euler se sitúan en este contexto de aplicación de la mecánica racional al funcionamiento de las máquinas hidráulicas.

En 1913, el matemático suizo Gustav Eneström (1852–1923) publicó una clasificación cronológica (Eneström, 1913) de la obra de Leonard Euler. Elaboró una lista de 866 trabajos, incluidos sus libros, memorias, cartas y otros escritos, que desde entonces se identifican con la letra “E”, seguida de un número según un orden cronológico. Eneström también clasificó las obras de Johann Albert Euler, nombrándoles con la letra “A”, seguida del número de orden cronológico. Siguiendo esta clasificación, podemos distinguir tres grandes grupos dentro de los trabajos de

---

<sup>1</sup> En la actualidad una máquina hidráulica es aquella que intercambia energía mecánica con el fluido incomprensible (líquido o un gas a bajas velocidades) que la atraviesa, englobando, por lo tanto, a las bombas, molinos de viento, aerogeneradores, turbinas, ventiladores, hélices, etc. En el siglo XVIII su significado era algo más restringido e impreciso. En el *Dictionnaire D'Architecture Civile et Hydraulique* (1754) de Augustin–Charles D'Aviler (1653-1701) se entiende por *machina hydraulique*, “une Machine qui sert à élever & à conduire les eaux comme une écluse, une pompe, etc”. Por su parte, en el tomo V de los *Elementos de Matemática* (Bails, 1780), Benito Bails indica que “Llamamos indistintamente Máquina Hidráulica toda máquina que sirve para levantar agua á una altura determinada, ó que se mueve mediante el impulso de una corriente”.

Leonard Euler sobre las máquinas hidráulicas (Ackeret, 1957; Blanc & Haller, 1979): las que tratan sobre los sistemas de bombas impulsoras de agua (E203, E206 y E248)<sup>2</sup>, las que lo hacen sobre las fuentes de energía para impulsar las bombas (E207, E208, E229 y E233)<sup>3</sup>, y las que abordan el estudio de la turbina según el trabajo del matemático húngaro Johann Andreas Segner (1704-1777) (Kirby, 1990, pp. 185-7) (E179, E202, E222, E259 y E833)<sup>4</sup>. La mayoría de estas memorias fueron publicadas en la Academia de Berlín entre los años 1752 a 1756, paralelamente a los trabajos teóricos de Euler sobre la mecánica de fluidos<sup>5</sup>.

Johann Albert Euler publicó tres trabajos sobre las máquinas hidráulicas. El primero fue la memoria (A2) *Enodatio quaestionis quomodo vis aquae aliisque fluidi...* escrita en 1754, con la que ganó el premio concedido por la *Real Sociedad de Göttingen* (Euler, J. A., 1754). En ella Euler hijo daba una serie de reglas sobre el principio de funcionamiento y la eficiencia de un grupo específico de máquinas hidráulicas, partiendo de la propuesta de un modelo físico para las mismas: las dos clases de ruedas hidráulicas verticales (la de alimentación inferior y superior), la horizontal y una turbina de impulsión (Fig. 25).

El segundo, el A4 según la notación de Eneström, versó sobre *Des Cerfs-Volants* y, como hemos señalado, fue publicado en 1758 en el mismo volumen de las memorias de la *Academia de Ciencias de Berlín* en el que Euler padre publicó su estudio sobre los

---

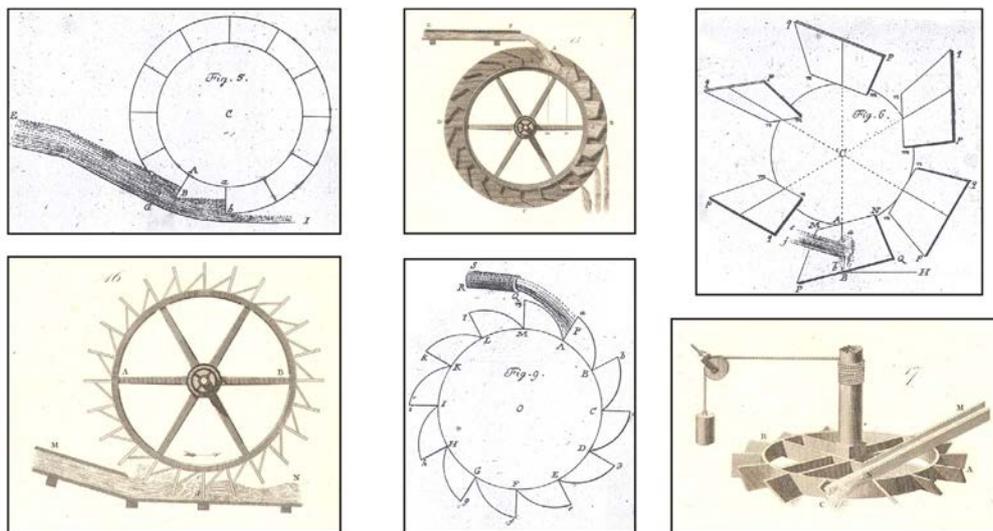
<sup>2</sup> (E203) *Recherche sur une nouvelle manière d'élever de l'eau proposée par M. de Mours, par M. Euler.* Mém. Acad. Berlín (1753), (E206) *Sur le mouvement de l'eau par des tuyaux de conduite, par M. Euler.* Mém. Acad. Berlín (1754) y (E248) *De cochlea Archimedis* publicada por la Academia de San Petersburgo en 1760. [Véase: [www.eulerarchive.com](http://www.eulerarchive.com) (visitada en octubre de 2012)].

<sup>3</sup> (E207) *Discussion plus particulière de diverses manières d'élever de l'eau par le moyen des pompes avec le plus grand avantage, par M. Euler.* Mém. Acad. Berlín (1754), (E208) *Maximes pour arranger le plus avantageusement les machines destinées à élever de l'eau par le moyen des pompes. Par M. Euler.* Mém. Acad. Berlín (1754). (E229) *De constructione aptissima molarum alatarum Auctore L. Eulero.* Novi Comm. Acad. Petrop. (1758) y (E233) *Recherches plus exactes sur l'effet des moulins à vent. Par M. Euler.* Mém. Acad. Berlín (1756). [Véase: [www.eulerarchive.com](http://www.eulerarchive.com) (visitada en octubre de 2012)].

<sup>4</sup> (E179) *Recherches sur l'effet d'une machine hydraulique proposée par M. Segner professeur à Göttingue; par M. Euler.* Mém. Acad. Berlín (1752), (E202) *Application de la machine hydraulique de M. Segner à toutes sortes d'ouvrages et de ses avantages sur les autres machines hydrauliques dont on se sert ordinairement, par M. Euler.* Mém. Acad. Berlín (1753) y (E222) *Théorie plus complète des machines qui sont mises en mouvement par la réaction de l'eau. Par M. Euler.* Mém. Acad. Berlín (1756). La (E259) *De motu et reactione aquae per tubos mobiles transfluentis* es un resumen de lo tratado en las memorias E179 y E222 sobre la turbina de Segner, fue publicada por la Academia de San Petersburgo en 1761 y La memoria (E833) *Détermination de l'effet d'une machine hydraulique inventée par Mr. Segner, Prof. à Göttingue* fue publicada póstumamente en 1862, se encontró en los archivos de la Academia de Berlín. [Véase: [www.eulerarchive.com](http://www.eulerarchive.com) (visitada en octubre de 2012)].

<sup>5</sup> En el año 1757 también se publican en Berlín tres memorias, que junto con otra publicada un año anterior pero escrito en 1751, Leonhard Euler desarrolla la construcción teórica que es lo que hoy se conoce como ecuaciones de Euler del movimiento de los fluidos. Estas memorias junto con los trabajos de Johann Bernoulli (1667-1748), Daniel Bernoulli (1700-1782) y Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) representan para algunos autores (Truesdell, 1954; Simón Calero, 1996, pp. 492-610), el inicio de la mecánica de los fluidos tal como se entiende hoy en día.

molinos de viento (E233). El tercer trabajo (Euler, J. A., 1765) es la memoria (A12) *Von der Bewegung ebener Flächen, wenn sie vom Winde getrieben werden*, en la que estudia el movimiento de una superficie plana sometido a la acción de un viento horizontal, en la que introducía una simplificación consistente en considerar que el punto de aplicación de la fuerza del viento coincidía con el centro del plano.



**Fig. 25** Máquinas hidráulicas estudiadas por Johann Albert Euler en su memoria (A2) *Enodatio quaestionis quomodo vis aquae aliisque fluidi...* escrita en 1754. Frente al modelo geométrico de las mismas se muestra un grabado según la *Encyclopaedia*

La estructura formal de los trabajos de los Euler sobre máquinas hidráulicas es muy similar. Todas ellas empiezan por una *introducción* donde se plantea el problema, para, a continuación, definir el *modelo geométrico* de la máquina estudiada. Después se aplica al objeto las leyes de la mecánica, basadas en un *modelo físico* del fluido, para pasar a un amplio *desarrollo matemático*, de tipo algebraico<sup>6</sup> y estructurado en forma de problemas que, tras resolverlos, permite llegar a unas conclusiones, expresadas en forma de corolarios y escolios o mediante ejemplos numéricos que generan tablas de resultados o reglas relacionadas con el diseño de la máquina. Las únicas memorias que no siguen este esquema son las E207, E208 y A2, ya que son conclusiones de resultados de otros trabajos, expresados en forma de máximas.

<sup>6</sup> Durante el siglo XVII se empieza interpretar los fenómenos físicos por medio del álgebra, sustituyendo la interpretación geométrica usada hasta el momento. Durante el XVIII, su uso se generalizó en la mecánica, la física y en la ingeniería (Roche, 1998, pp. 86-144).

### 3 EL VUELO DE LA COMETA SEGÚN JOHANN ALBERT EULER

La memoria sobre *Des Cerfs-Volants* arranca con una introducción en la que Johann Albert Euler justifica el hecho de dedicar un estudio a la mecánica del vuelo de un objeto considerado lúdico. Es una novedad importante, pues este tipo de justificaciones no aparecen en las memorias sobre máquinas hidráulicas vistas más arriba. Euler inauguraba el estudio teórico de la cometa como objeto físico, consciente de que su interés no era inmediatamente obvio para el lector.

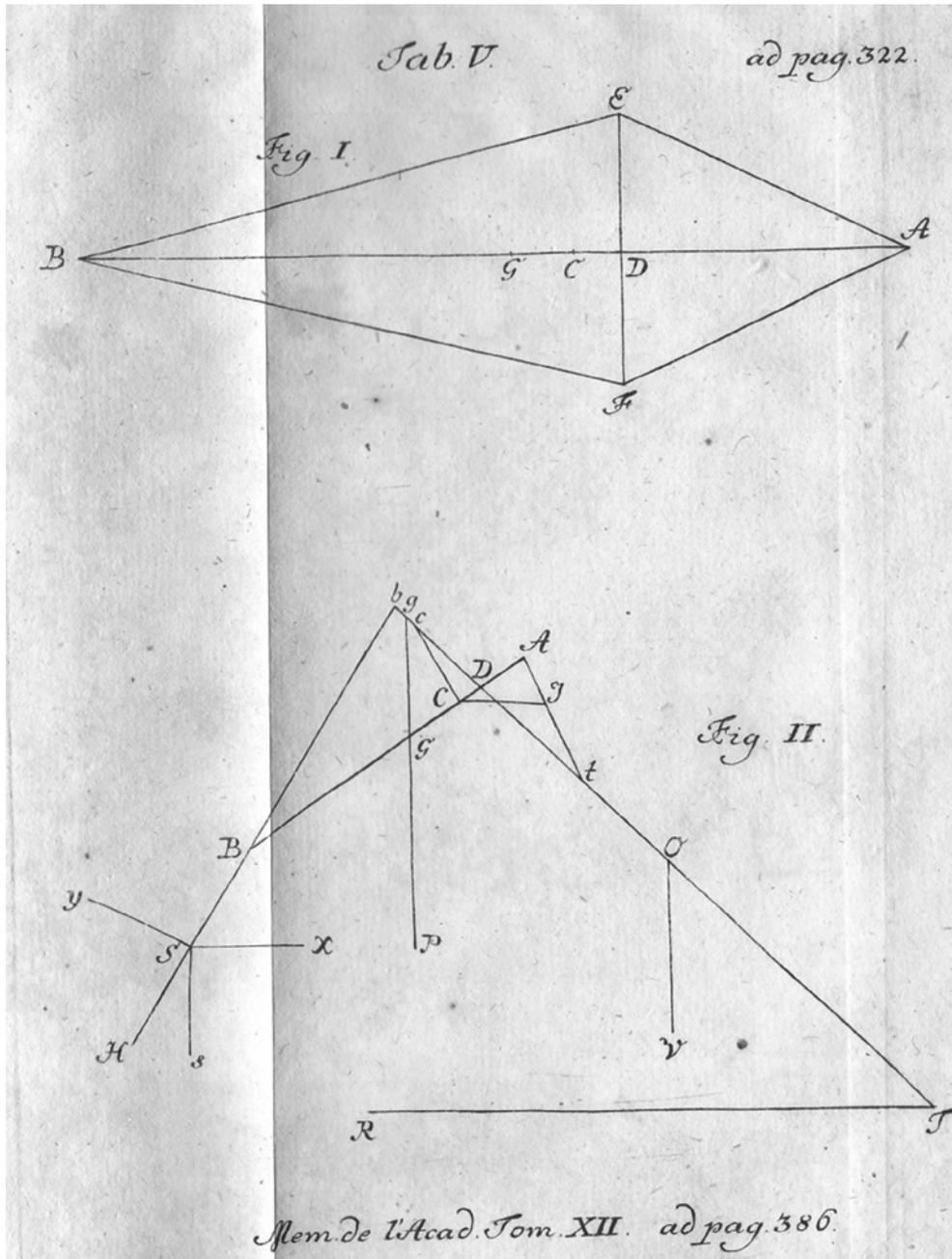
Para justificar su estudio, Euler apelaba directamente a la tradición de experimentos con cometas iniciada por Franklin, que él mismo pudo conocer gracias a “le célèbre Mr. de Romas” y sus *Expériences électriques*. La popularidad científica del juguete, argumentaba Euler, justificaba su análisis teórico:

Comme les Cerf-volans n’ont servi jusqu’ici que de jouët aux enfans, les recherches que j’entreprends, paraîtront peu dignes de la Géométrie [...] Mais, quand on accorderoit que des jeux d’enfant ne doivent pas arrêter les regards d’un Géomètre, personne cependant à ce que j’espère, ne me reprochera de m’être occupé de celui – ci, depuis que le célèbre Mr. de Romas s’est servi avec tant de succès d’un semblable Cerf – Volant dans ses Expériences électriques, & qu’annoblissant ainsi ce jouët il l’a introduit dans la Physique.

Euler se preguntaba, en cambio, si el desprecio por el análisis mecánico de la cometa no se debería más bien a su dificultad teórica (Euler, J. A., 1758, p. 322). El interés de su estudio no es sólo teórico, sino que tiene para Euler un inmediato sentido práctico. La cometa había sido empleada en estas experiencias para demostrar la naturaleza eléctrica del rayo, elevando con ella una barra de hierro a una altura de 600 pies para poder capturar las descargas atmosféricas de manera más eficaz que si estuvieran situadas en un edificio alto<sup>7</sup>. Euler pretendía con esta memoria encontrar las condiciones geométricas que debe tener una cometa, para que con un viento dado alcance la máxima altura posible, factor principal para ser utilizada como instrumento de estudio de la electricidad atmosférica.

---

<sup>7</sup> Equivalente a unos 195 metros (un pie de París es igual a 324,83 mm y el pie inglés es igual a 304,80 mm. Sobre el sistema de unidades empleado en el siglo XVIII véase (Simón Calero, 1996, pp. 669-71). En una memoria publicada en 1755 por la Academia de París, Romas fija esta altura como la necesaria para elevar un pararrayos por medio de una cometa y además fija un coste máximo de seis francos para la construcción de la misma (Romas, 1755, p. 394).



**Fig. 26** Modelo geométrico de la cometa según J. A. Euler

### 3.1 LA DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LA COMETA

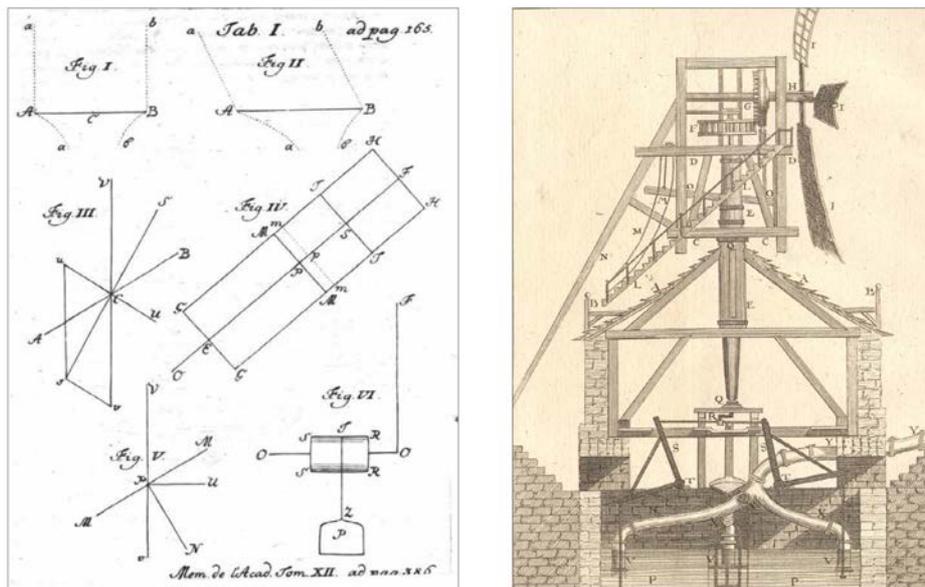
Desde el primer párrafo de la memoria, la cometa abandona su forma común para convertirse en un modelo geométrico cuyo comportamiento físico es reducible a la acción de un conjunto de fuerzas.

[§1] J'entens ici par un Cerf-volant [Fig. 26], un plan d'une figure quelconque AEBF, composé de deux parties égales & semblables AEB & AFB, de sorte que la droite ADB soit le diamètre de cette figure. Pour plus de distinction j'appellerai l'extrémité A la tête, & l'autre B la queue du Cerf-volant.

Sobre este plano, cuya superficie será de (a-a), Euler definía C como el punto donde está aplicada la fuerza del viento, G el centro de gravedad y D es el punto de amarre del hilo a la cometa. Si bien en la representación de Euler la cometa tenía forma de rombo, el texto no atribuía ninguna forma precisa a la cometa geométrica, pudiendo ser cualquiera que cumpliera la condición de ser simétrica respecto a un diámetro.

En los párrafos [§2]-[§5] se definían las fuerzas a las que estaba sometido el plano: la fuerza del viento, el peso (P) y tensión del hilo (T), así como los puntos de aplicación de las mismas sobre el plano. También establecía la posibilidad de restringir el giro sobre los ejes AB y EF por medio de unos hilos. No se trata de una brida<sup>8</sup>, como podría parecer, sino simplemente de una ligadura con la que se pretendía que la cometa no girase sobre el eje AB.

La estructura de la cometa quedaba así reducida a un simple plano expuesto al viento, tal y como ocurría con las aspas de un molino en la memoria (E233) de Leonhard Euler. (Fig. 27).



**Fig. 27** Modelo geométrico de un molino según Leonard Euler (izquierda), comparado con la representación de la misma máquina en la plancha *HYDRAULIQUE Moulins a vent de Meudon* en la *Enciclopedia* de Diderot y D'Alembert (1751-72)

<sup>8</sup> La brida consiste en varios pequeños cordeles que atados a varios puntos de la estructura de la cometa se unen en un punto donde se amarra la cuerda. Además, para un vuelo estable este tipo de cometas necesita disponer de una *cola*, que se construye con trozos de papel o tela enlazados entre sí y unidos a la parte inferior de la estructura.

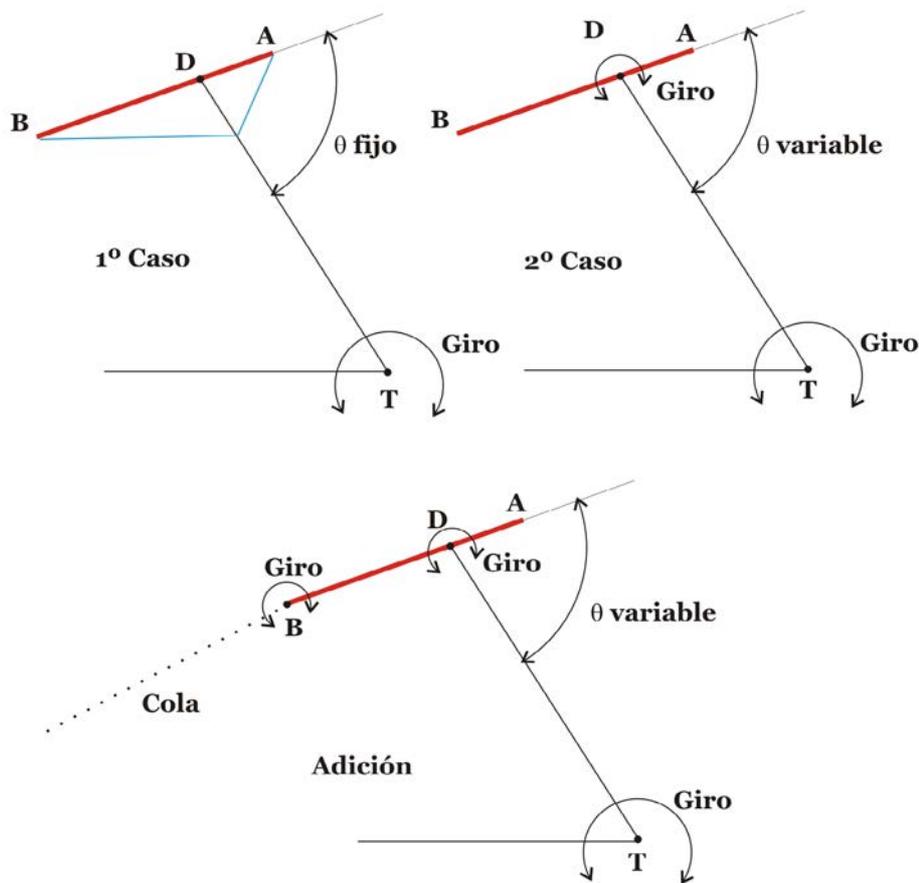


Fig. 28 Los tres modelos para la cometa empleados por J. A. Euler

Una vez definido el modelo geométrico del plano expuesto al viento, Euler pasa a definir el modelo geométrico del hilo, la brida y la cola. Para ello, Euler imagina tres modelos posibles (Fig. 28). En el primero considera que la cometa y el hilo, que carece de peso, es un sólido rígido con peso total  $P$ . En el segundo, independiza el hilo de la estructura de la cometa, pero sigue considerando éste como un sólido rígido dotándole de un peso  $Q$ . En estos dos modelos se aprecian una serie de simplificaciones respecto a una cometa real, siendo lo más destacado el caso del hilo. Éste se ata directamente en un punto del plano, obviando la existencia de la brida. Además considera que es rígido y se comporta como tal en vuelo, cuando realmente adopta la forma de una curva. Todas estas simplificaciones le permiten aplicar un modelo matemático sencillo y de fácil solución.

El tercer modelo añade a la cometa una cola, que según Euler se comporta como otra superficie y que la ayuda a elevarse más alto. Este apartado es el más complejo y se

estudia en un apéndice de la memoria<sup>9</sup>. Aquí el modelo de cometa es el analizado en el segundo caso pero se le ha añadido una cola idealizada como un plano que puede girar libremente en el extremo inferior. Reconoce que esta no es la forma habitual de una cola “car il serait difficile de faire entrer dans le calcul une queuë pareille a celle dont les enfans se servent” (Euler, J. A., 1758, p. 349). Johann Albert Euler considera que la cola es una superficie que generará una fuerza adicional que hará que se eleve más alta<sup>10</sup>. Así, el caso estudiado en la *Addition* es más bien otra cometa formada por dos superficies unidas mediante una articulación.

Contrasta la dificultad que Euler hijo encuentra para definir el modelo geométrico de una cometa -ensaya hasta tres diferentes- con la relativa simplicidad con que esto mismo se hace para otras máquinas hidráulicas aparentemente más complejas como, por ejemplo, el molino de viento estudiado en la memoria (E233) de Euler padre. En esta, Leonard Euler analiza un molino con el fin de encontrar la relación existente entre la velocidad del viento y el volumen de agua que es capaz de elevar a una altura determinada durante una hora, lo que actualmente se conoce como potencia. Tal y como señala en la introducción “Mr Lulofs<sup>[11]</sup>, très célèbre professeur de l’Université de Leyden, & Membre de notre Académie”, (Euler, 1758, p. 169) le había comunicado una serie de experiencias realizadas con los molinos de viento de su país, en las que se ponía de manifiesto que la potencia medida en los mismos era el doble de la estimada por Euler en una memoria anterior<sup>12</sup>. En lugar de replantear el modelo geométrico, Euler padre supone que estas deficiencias son consecuencia del modelo físico empleado, que como veremos en el apartado siguiente es la denominada *teoría de impacto*:

si j’ai employé cette hypothèse défectueuse dans mes recherches sus les moulins á vent, c’est uniquement à elle qu’il faudra attribuer les erreurs que la comparaison du calcul avec les expériences nous donnera à connaitre. (Euler, 1758, p. 165)

Por lo que propone una formulación alternativa que ya había desarrollado en una edición comentada de una obra sobre artillería *New Principles of Gunnery* escrita por

---

<sup>9</sup> Al final de la memoria incluye un apéndice como si fuera otra memoria que denomina *Addition* y consta de los párrafos [§1]-[§65]. En este caso empieza de nuevo la numeración de los mismos.

<sup>10</sup> La función de la cola, como se sabe hoy en día, no es la de permitir que la cometa se eleve a mayor altura, sino que permite que su vuelo sea estable.

<sup>11</sup> Se refiere al astrónomo, físico experimental y matemático holandés Johannes Lulofs (1711-1768).

<sup>12</sup> En la memoria E208 se daban una serie de reglas o máximas de diseño de las ruedas hidráulicas, molinos, así como el cálculo de la potencia que desarrollan un hombre y un caballo.

Benjamin Robins (1707-1751) en 1742<sup>13</sup>. Su objetivo con esta acción no era otro que explicar la diferencia que existe entre un molino real y el teórico. El modelo geométrico se mantiene inalterado y, cuando el tratamiento analítico se complica, lo que se modifica una y otra vez es la formulación del modelo físico empleado, sustituyéndolo por otro más simple, o simplificando mediante aproximaciones las expresiones algebraicas utilizadas (Simón Calero, 1996, pp. 257-9).

En este caso Leonard Euler ha modificado la ley física para acercar su modelo a la realidad, mientras que en otras ocasiones ha optado modificar el modelo geométrico de la máquina. Es el caso de sus estudios sobre las velas de los barcos en su obra *Scientia Navalis*, publicada en 1746 (Euler, 1746). Aquí asemeja la vela a un hilo flexible, pero, tras múltiples cálculos y dada la complejidad del tema, cuestiona la hipótesis de partida. En lugar de asimilar la vela a un hilo flexible, la asemeja a una placa plana rígida, luego a una superficie flexible que toma la forma del hilo y llega a nuevas ecuaciones sin dar ninguna solución (Simón Calero, 1996, pp. 363-8).

En la memoria de Euler hijo la estrategia es completamente diferente. Aquí cada uno de los tres casos se basa en una aproximación geométrica diferente, con el objetivo de abordar el tratamiento analítico del problema, desde lo más simple hasta lo más complicado.

La cometa ha sido así completamente transformada en una figura geométrica formada por un simple plano de superficie (a-a) y un hilo, definido como una línea recta<sup>14</sup>, que une dos puntos, uno en el plano y el otro en el suelo. En cuanto al uso de la cola, no se considera en los dos primeros casos, y en el tercero se simplifica con un plano unido a la parte inferior de la cometa. En resumen, se crea un objeto geométrico donde ya es posible hallar relaciones trigonométricas o aplicar las leyes de la mecánica. Pero, sobre todo, un modelo que permite aproximarse a la solución del problema mediante un desarrollo analítico sencillo.

### 3.2 LA FÍSICA DE LA COMETA

Para el cálculo de la fuerza del viento Euler dio dos posibles valores. En el párrafo [§11] indica que la fuerza del viento es igual al peso de un volumen de aire:

---

<sup>13</sup> Euler en 1745 tradujo en 1745 la obra Benjamín Robins, añadiendo notas entre las que propone una teoría alternativa a la de impacto. Esta consiste en mantener el efecto del impacto de las partículas en una cara del plano, pero considerando la formación de una depresión o estela tras el mismo (Simón Calero, 1996, pp. 220-33).

<sup>14</sup> Un modelo que dista mucho de la situación real en la que el hilo es deformado por el viento adoptando una forma curva.

$a \cdot a \cdot v \cdot \sin^2 \varphi$ . Mientras que en el párrafo [§38] señala que “plusieurs Expériences enseignent qu’on doit la statuer le double plus grande, savoir:  $2 \cdot a \cdot a \cdot v \cdot \sin^2 \varphi$ ”

Estas expresiones representan lo que se conoce como teoría de impacto, que es la reformulación de una ley enunciada por Newton en el libro II de los *Principia*<sup>15</sup>. Para ello parte de un modelo físico que considera a los fluidos formados por pequeñas partículas. Si estas chocan contra una superficie -de manera elástica o inelástica<sup>16</sup>- aparece una fuerza (D) perpendicular a la misma.

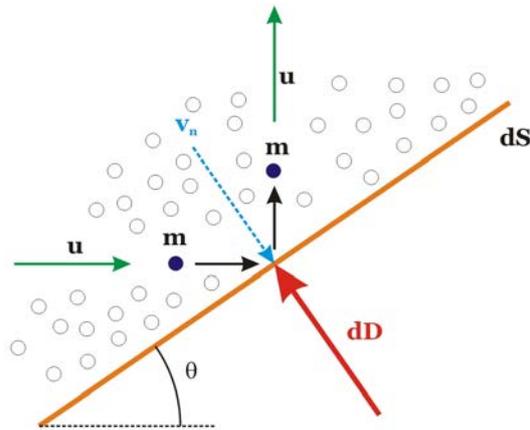


Fig. 29 Teoría de impacto

Sea  $dS$  una parte diferencial de la superficie de un cuerpo (Fig. 29) que podemos considerar plana y que forma un ángulo  $\varphi$  con una corriente fluida. Supongamos que en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , chocan  $n$  partículas del fluido con una masa ( $m$ ) y velocidad  $u$ . Esto es equivalente a que la partícula chocara perpendicularmente a la placa con una velocidad normal  $u_n = u \cdot \sin \theta$ . Luego las  $n$  partículas de masa  $m$  transmiten un impulso

<sup>15</sup> Los *Principia* tuvieron tres ediciones en vida de Newton. La primera en 1687, la segunda en 1713 y la tercera en 1726. El libro II sufrió importantes revisiones en algunas proposiciones, sobre todo en el apartado de la resistencia de los cuerpos en líquidos, debido a las críticas recibidas y a los nuevos experimentos realizados. Newton, trata la teoría de impacto en la Sección VII del Libro II: *De motu fluidorum et resistentia projectilium* véase: (Newton, 1987, pp.77, 525-72).

<sup>16</sup> El Escolio a las leyes del movimiento en los Principia trata la mecánica de los choques entre partículas, distinguiendo si estas al chocar lo hacen de manera elástica o inelástica. Se entiende por elástico cuando la velocidad relativa de las partículas tras un choque es igual y de sentido contrario a la que tenían antes del mismo, transfiriendo en este caso la máxima fuerza de reflexión (mayor cesión de cantidad de movimiento). Pero, si al chocar se genera una fuerza de forma que “los cuerpos se separen con velocidad relativa que estarán en una razón dada con la velocidad relativa de choque”, entonces, el choque será inelástico existiendo el extremo que las partículas no son reflejadas, por tanto imprimen la mínima fuerza de reflexión (menor cesión de cantidad de movimiento) (Newton, 1987, p. 149).

$I = dD \cdot \Delta t = n \cdot m \cdot u_n = n \cdot m \cdot u \cdot \text{sen } \theta$ , donde  $dD$  es la fuerza de resistencia que aparece sobre un  $dS$ . Luego:

$$\begin{aligned} dD &= \frac{n \cdot m \cdot u \cdot \text{sen} \theta}{\Delta t} = \frac{n \cdot m \cdot u \cdot \text{sen} \theta}{\Delta t} \cdot \frac{dS}{dS} \cdot \frac{u \cdot \text{sen} \theta}{u \cdot \text{sen} \theta} = \frac{n \cdot m}{\underbrace{dS \cdot u \cdot \text{sen} \theta \cdot \Delta t}_p} \cdot u^2 \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot dS = \\ &= \rho \cdot u^2 \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot dS = k \cdot u^2 \cdot \text{sen}^2 \theta \end{aligned}$$

Para llegar a este valor de la fuerza de resistencia  $D$ , partiendo de la que expresión del párrafo [§11] de la memoria, es necesario hacer una consideración sobre el modo de expresar las velocidades y las fuerzas de los fluidos en los tratados del siglo XVIII (Simón Calero, 1996, pp. 93-5; Truesdell, 1954, pp. xliii – xliv). La velocidad se expresaba como la altura  $v$  desde la que había que dejar caer un cuerpo para que llegase al suelo con dicha velocidad. En el párrafo [§38] se dice que si el viento recorre en un segundo un espacio  $s$  y un cuerpo en caída libre recorre una distancia  $g^{17}$  en un segundo, entonces esta altura es<sup>18</sup>:

$$v = \frac{s^2}{2 \cdot g}$$

Es decir, si la velocidad del fluido es  $s$ , mientras que a  $v$  podemos llamarla altura de velocidad. La fuerza  $D$  se expresa como el peso de un cilindro de aire de base  $a \cdot a$  y altura  $v$ , para la expresión del párrafo [§11]:

$$\begin{aligned} D &= (\text{peso específico}) \cdot (\text{volumen}) = \gamma \cdot (a \cdot a \cdot v \cdot \text{sen}^2 \varphi) = \\ &= \gamma \cdot (a \cdot a \cdot \frac{s^2}{2 \cdot g} \cdot \text{sen}^2 \varphi) = \frac{\rho \cdot g}{2 \cdot g} (A \cdot s^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi) = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot s^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi = \frac{k}{2} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot s^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi \end{aligned}$$

Que corresponde al caso de un choque inelástico. Si se emplea la fórmula del párrafo [§38] da el doble que la expresión anterior, por lo tanto, estamos en el caso de la teoría de impacto en el que se considera que las partículas chocan de manera elástica (Simón Calero, 1996, pp.139-47).

<sup>17</sup> No hay que confundir esta  $g$  con el actual valor de la aceleración de la gravedad.

<sup>18</sup> Ya que la  $g$  definida es el espacio recorrido por un cuerpo en caída libre en un segundo, cuando la  $g$  de la expresión debería ser la aceleración de la gravedad ( $a_g$ ), ya que la velocidad  $s$  con que llega un cuerpo cayendo desde una altura  $v$  es  $s^2 = 2 \cdot a_g \cdot v$ . Si  $g$  es la distancia recorrida por el cuerpo en caída libre en un segundo  $g = \frac{1}{2} \cdot a_g \cdot t^2$ , que para  $t = 1$  es igual a  $g = \frac{1}{2} \cdot a_g$ . Al dar a  $g$  un valor de 15 pies, implica que la aceleración de la gravedad es de 30 pies por segundo cuadrado, que es valor que debería aparecer en la expresión.



Entre los párrafos [§9]-[§39] analizaba el primer modelo para la cometa (Fig. 30), el que considera el plano y el hilo como un cuerpo rígido. Por lo tanto, el ángulo  $\theta$  es fijo. Luego había que calcular, en la posición de equilibrio, el valor de  $\varphi$  ó  $\theta - \varphi$  y la tensión del hilo (T). Para conseguir esto, igualaba los momentos de las fuerzas respecto al punto T, de modo que la cometa no giraba alrededor del mismo. Tras una serie de operaciones llegaba en [§22] a la expresión:

$$\mathbf{P} \cdot [\mathbf{f} \cdot \cos (\theta - \varphi) + (\mathbf{b} + \mathbf{c}) \cdot \cos \varphi] = \mathbf{a} \cdot \mathbf{a} \cdot \mathbf{v} \cdot \text{sen}^2 \varphi \cdot (\mathbf{f} \cdot \cos \theta + \mathbf{c})$$

Que permitía obtener  $\varphi$ , que junto con  $\theta$ , se calculaba de manera inmediata la tensión del hilo T [§24]:

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{P} \cdot (\mathbf{f} \cdot \text{sen} \varphi + \mathbf{b} \cdot \text{sen} \theta \cos \varphi + \mathbf{c} \cdot \cos \theta \cdot \text{sen} \varphi)}{\mathbf{f} \cdot \cos \theta + \mathbf{c}}$$

A continuación analizaba una serie de casos particulares. Destacamos el que permitía el cálculo de la velocidad del viento necesaria para que la cometa empezara a despegar, es decir, cuando  $\theta = \varphi$ . Haciendo la simplificación que la longitud del hilo (f) es mucho mayor que las dimensiones de la cometa, llegó a la siguiente expresión que da la altura de velocidad mínima necesaria para el despegue [§30]:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{a} \cdot \mathbf{a} \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot \cos \theta}$$

Esta será mínima cuando el denominador sea máximo, por lo tanto, se deriva el denominador y se iguala a cero, lo que le permitía hallar el ángulo óptimo  $\theta$  que es igual a  $54^\circ 44'$ . Por lo que la altura de velocidad queda:

$$\mathbf{v} = \frac{3 \cdot \mathbf{P} \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \mathbf{a} \cdot \mathbf{a}}$$

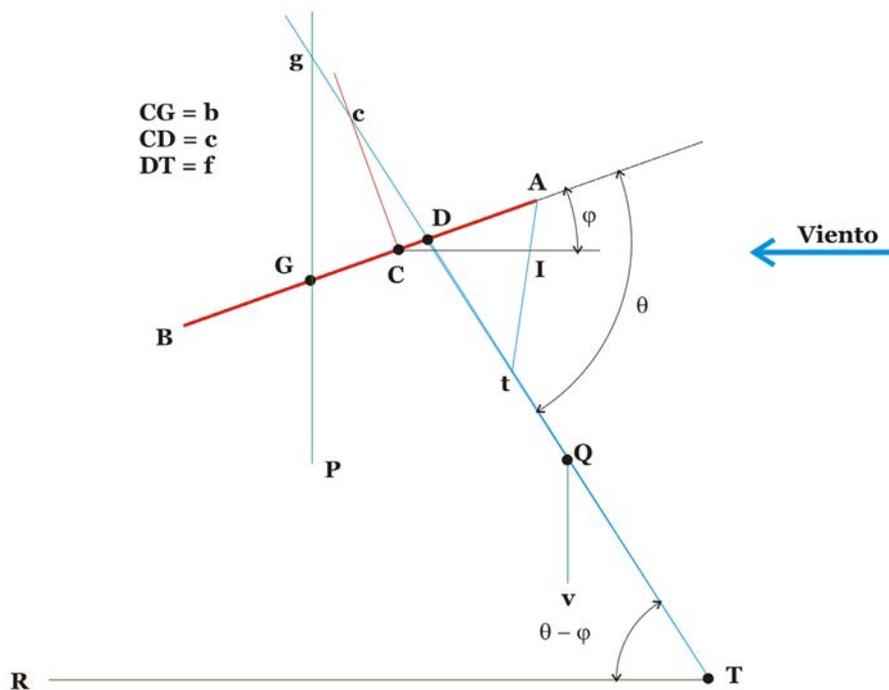
Para calcular la posición de equilibrio cuando la velocidad del viento es mayor, Euler hijo se sirve de un polinomio que lo resolvía por aproximaciones sucesivas. Partía de las ecuaciones anteriores introduciendo simplificaciones y sustituía el valor numérico óptimo de  $\theta$ , quedando la ecuación mostrada en [§32]:

$$z^4 - 4 \cdot n \cdot z^3 + 6 \cdot n \cdot n \cdot z \cdot z - 4 \cdot n \cdot n = 0$$

$$T = P \cdot \sqrt{3} \cdot \text{sen} \varphi$$

$$n = \frac{P}{a \cdot a \cdot v} ; z = \sqrt{2} \cdot \text{sen} \varphi ; \theta = 54^\circ 44'$$

Haciendo un cambio de variable se ha definido la constante n y la nueva incógnita z. Así, dado n, que depende del peso, de la superficie y de la altura de velocidad del viento se obtiene un polinomio de cuarto grado relativamente fácil de calcular por métodos de aproximación numérica. Con este valor de z obtenido, se divide por la raíz de dos y hallamos el valor de  $\varphi$ . Con este dato se calculará T.



**Fig. 31** Segundo modelo de la cometa de Euler

Entre los párrafos [§48]-[§88] analizaba el segundo caso (Fig. 31). Aquí el hilo podía girar libremente alrededor del punto D, es decir, que el ángulo  $\theta$  no es fijo. Además, el hilo se consideraba que tenía un peso (Q). En este caso la posición de equilibrio se hallaba igualando los momentos de las fuerzas respecto a los puntos T y D. Tras una serie de operaciones calculaba para un viento dado los ángulos  $\theta$  y  $\varphi$  que alcanzaría la cometa en equilibrio, así como la tensión T. [§48]-[§63]

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= -n + \sqrt{n \cdot n + 1} & \tan \theta &= \frac{(P \cdot b - \frac{1}{2} \cdot Q \cdot c) \cdot \cos \varphi}{(P + \frac{1}{2} \cdot Q) \cdot c \cdot \sin \varphi} \\ \sin \varphi &= \sqrt{2 \cdot n \cdot \sqrt{n \cdot n + 1} - 2 \cdot n \cdot n} \\ \tan(\theta - \varphi) &= \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} - \frac{(P + \frac{1}{2} \cdot Q) \cdot c}{P \cdot (b + c) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi} & n &= \frac{P \cdot (b + c)}{2 \cdot a \cdot a \cdot c \cdot v} \\ T &= \frac{P \cdot (b + c) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta}{c} - (P + Q) \cdot \sin(\theta - \varphi) \end{aligned}$$

Para que la cometa alcance la máxima altura, Euler hallaba que valores de las distancias  $b$  y  $c$  que hacen máximo el ángulo  $\theta - \varphi$ . Tras una serie de desarrollos llegaba a la expresión [§67]:

$$CD = \frac{2 \cdot P}{4 \cdot P + 3 \cdot Q} \cdot CG$$

Que fijaba la posición del punto de amarre de la cometa  $D$ , que hace que la cometa alcance la máxima altura. Para esta disposición  $\theta - \varphi$  y la tensión del hilo valían:

$$\begin{aligned} \tan(\theta - \varphi) &= \frac{6 \cdot n \cdot n + 2 - 6 \cdot n \cdot \sqrt{n \cdot n + 1}}{3 \cdot (-n + \sqrt{n \cdot n + 1})^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot n}} \\ T &= (2 \cdot P + \frac{1}{2} \cdot Q) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \theta + (P + Q) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta \end{aligned}$$

Donde:

$$n = \frac{3 \cdot (P + \frac{1}{2} \cdot Q)}{2 \cdot a \cdot a \cdot v}$$

Cuando  $\theta - \varphi$  era igual a cero, se empezaba a elevar la cometa que alcanzará la máxima altura, por lo que tras los cálculos pertinentes obtenía el siguiente valor de la altura de velocidad, para que esto se produjera:

$$v = \frac{3 \cdot (P + \frac{1}{2} \cdot Q) \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot a \cdot a} = \frac{3 \cdot (2 \cdot P + Q) \cdot \sqrt{3}}{4 \cdot a \cdot a}$$

Para alturas de velocidad superiores, la cometa se elevaría alcanzando la máxima altura posible para esas condiciones de viento y de construcción de la cometa.

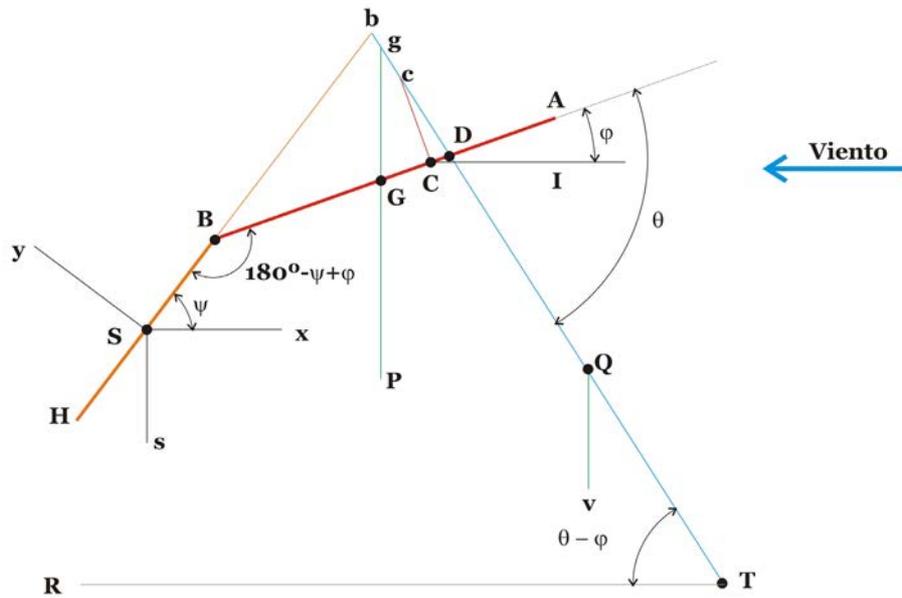


Fig. 32 Adición a la memoria de J. A. Euler

Entre los párrafos [§7]-[§32] de la *Addition* (Fig. 32) se iniciaba el desarrollo analítico, que esta vez es más complejo, ya que tenía que hallar tres ángulos de equilibrio ( $\theta - \varphi$ ),  $\theta$  y  $(180^\circ - \psi + \varphi)$  y la tensión del hilo T. Hallando los momentos de las fuerzas respecto a los puntos de giro y tras laboriosas operaciones, Euler llegaba a las siguientes expresiones:

$$\cos \psi = -m + \sqrt{1 + m \cdot m}$$

$$\text{sen} \psi = \sqrt{-2 \cdot m \cdot m + 2 \cdot m \cdot \sqrt{1 + m \cdot m}}$$

Donde:

$$\frac{R}{e \cdot e \cdot v} = 2 \cdot m$$

$$\begin{aligned} a \cdot a \cdot v \cdot b \cdot \text{sen}^2 \varphi &= P \cdot c \cdot \cos \varphi + R \cdot d \cdot \text{sen} \psi \cdot \text{sen}(\psi - \varphi) \\ \tan(\theta - \varphi) &= \frac{a \cdot a \cdot v \cdot \text{sen}^2 \varphi \cdot \cos \varphi - R \cdot \text{sen}^2 \psi - (P + \frac{1}{2} \cdot Q)}{a \cdot a \cdot v \cdot \text{sen}^3 \varphi + R \cdot \text{sen} \psi \cdot \cos \psi} \end{aligned}$$

$$T = a \cdot a \cdot v \cdot \text{sen}^2 \varphi \cdot \text{sen} \theta - (P + Q) \cdot \text{sen}(\theta - \varphi) + R \cdot \text{sen} \psi \cdot \cos(\theta + \psi - \varphi)$$

Ahora se buscaban las condiciones para obtener el máximo de altura [§32]-[§45], que es la que hace máximo el ángulo ( $\theta - \phi$ ) para lo cual era necesario hallar una relación entre las distancias DB, DG y CD [§43] en la que fijadas dos distancias sale la tercera. Así construida la cometa, alcanzaba la máxima altura para unas condiciones de viento fijas, pero dice que no es suficiente, ya que la cometa debería estar estable en su vuelo, por lo que tenía que hallar unas condiciones adicionales. Estas las fijaba estudiando si la cometa se recuperaría ante una alteración diferencial de los tres ángulos de equilibrio. Demostró que la existencia de un momento recuperador está condicionado a que [§56] la cola sea larga y las distancias de los puntos B y G al punto D sean lo más grandes posible y la cuerda muy larga. Pero, tras operar, llegaba a unas expresiones que, dada la complejidad de realizar un cálculo general, analizaba este caso por medio de ejemplos.

Las expresiones deducidas, incluso para el modelo geométrico más sencillo, implican la necesidad de resolver ecuaciones algebraicas no lineales. La razón se encuentra en que en la expresión de la fuerza del viento aparece el seno cuadrado de un ángulo. Esta complejidad es común en las memorias sobre máquinas que funcionan mediante el choque de un fluido, como el caso de los molinos o las ruedas hidráulicas de impulso. Es inherente a la aplicación de la teoría de impacto. A pesar de todo, se aborda el problema aunque haya que hacer una serie de aproximaciones, despreciando algún parámetro en comparación con otro o cambiando el modelo geométrico de la máquina.

### 3.4 APLICACIONES PRÁCTICAS

Para cada uno de los tres modelos de cometa, se hacía una aplicación práctica. El primer caso se aplicaba entre los párrafos [§39]-[§47]. Consideraba una cometa de peso (P) igual al que tendría un cilindro de aire con base  $a \cdot a$  y altura un pie<sup>19</sup>. Si el ángulo  $\theta$  es igual a  $54^{\circ} 44'$ , n valía:

$$n = \frac{P}{a \cdot a \cdot v} = \frac{1}{v}$$

---

<sup>19</sup> El peso de la cometa, que supone conocido, se expresa como el peso de un prisma de aire de base  $a \cdot a$  y altura  $h$ . Considera que un pie cúbico de aire pesa 8/100 libras, en [§ 97] se deduce que toma como unidad el pie de Paris, este patrón fija el pie = 324,8 mm. y la libra = 0,4895 Kg. Así el valor de la densidad del aire  $\rho_e = 1,14 \text{ Kg./m}^3$  (Valor actual a  $15^{\circ} \text{ C}$ :  $1,225 \text{ Kg./m}^3$ ).

La altura de velocidad  $v$ , correspondiente a una velocidad  $s$ , para que empiece a elevarse sobre el horizonte será:

$$v = \frac{3 \cdot P \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot a \cdot a} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \approx \frac{21}{8} \text{ pies} \Rightarrow s = \sqrt{2 \cdot g \cdot v} = \sqrt{2 \cdot 15 \cdot \frac{21}{8}} \approx 9 \text{ pies / s}$$

Luego, la cometa así construida empezará a volar con un viento superior a 9 pies por segundo (equivalente a 2,920 m/s). A continuación calculaba los valores para 10, 15 y 20 pies por segundo, siguiendo el algoritmo mostrado en la Fig. 33.

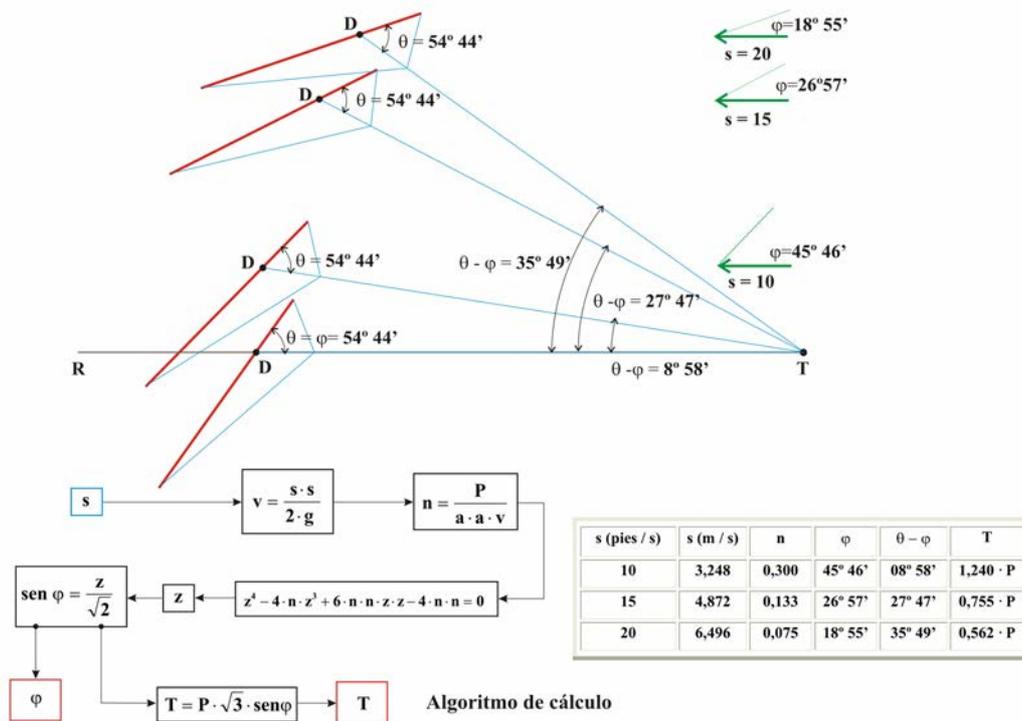


Fig. 33 Aplicación práctica del primer modelo para la cometa de J. A. Euler

Entre los párrafos [§89]-[§102] se abordaba un ejemplo del segundo caso. Se consideraba una cometa construida para alcanzar la máxima altura, condición que se cumplía si se fijaba el punto de amarre D según la expresión [§67]:

$$CD = \frac{2 \cdot P}{4 \cdot P + 3 \cdot Q} \cdot CG$$

Para simplificar los cálculos suponía que  $2 \cdot P + Q$ , tiene el peso de un cilindro de aire de base  $a \cdot a$  y altura  $H$ , con los siguientes valores:

$$H = 9 \text{ pies} \quad P = 4 \cdot a \cdot a \quad Q = 1 \cdot a \cdot a$$

Para esta geometría la velocidad del viento para que la cometa empezara a volar sería:

$$v = \frac{3 \cdot (2 \cdot P + Q) \cdot \sqrt{3}}{4 \cdot a \cdot a} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot H}{4} \Rightarrow s = \sqrt{2 \cdot g \cdot v} = \sqrt{15 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot H}{2}} = 6,24 \cdot \sqrt{H}$$

Que para H igual a 9 pies, la velocidad del viento debía ser de 18,72 pies/s (6,080 m/s) y el ángulo al iniciar el despegue es  $\varphi = \theta = 54^\circ 44'$ , significa que la cometa se elevaría para velocidades del viento superiores variando los ángulos  $\varphi$  y  $\theta$  hasta encontrar la posición de equilibrio. A continuación calculaba los valores para 20, 25 y 30 pies por segundo, siguiendo el algoritmo mostrado en la Fig. 34.

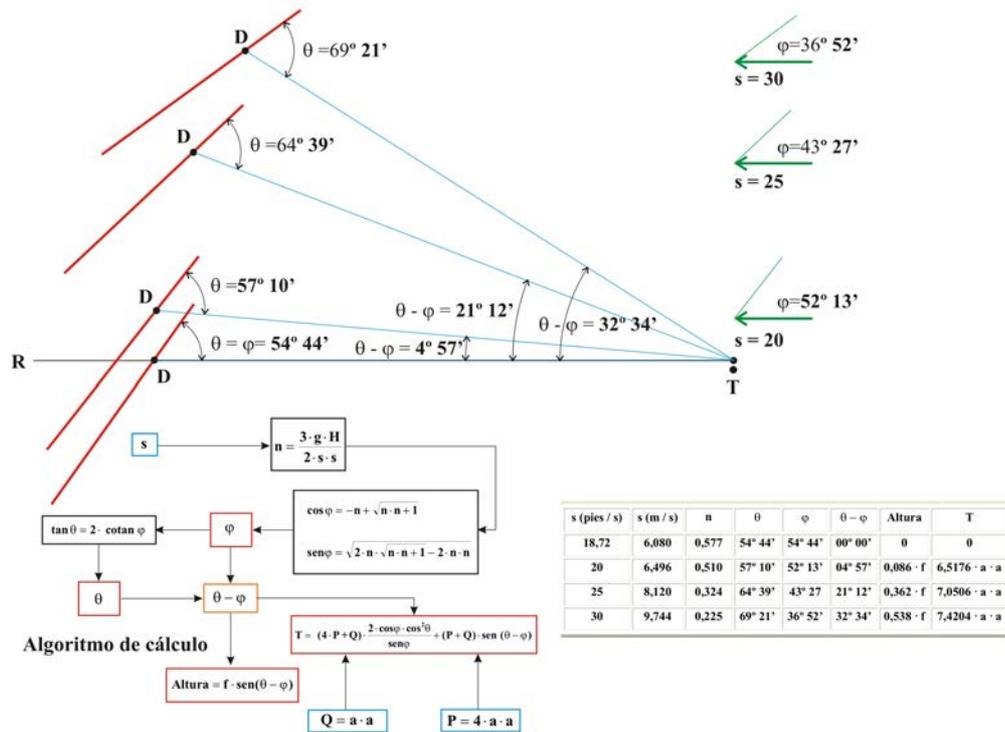


Fig. 34 Aplicación práctica del segundo modelo para la cometa de J. A. Euler

Entre el párrafo [§57] y [§61] de la *Addition* estudiaba una aplicación de la cometa con cola, con los valores numéricos dados a la cometa definida la cometa iniciaría su vuelo con una velocidad del viento de 18,90 pies/s (6,13 m/s). A continuación, calculaba los valores para 20 y 30 pies por segundo, siguiendo el algoritmo mostrado en la Fig. 35.

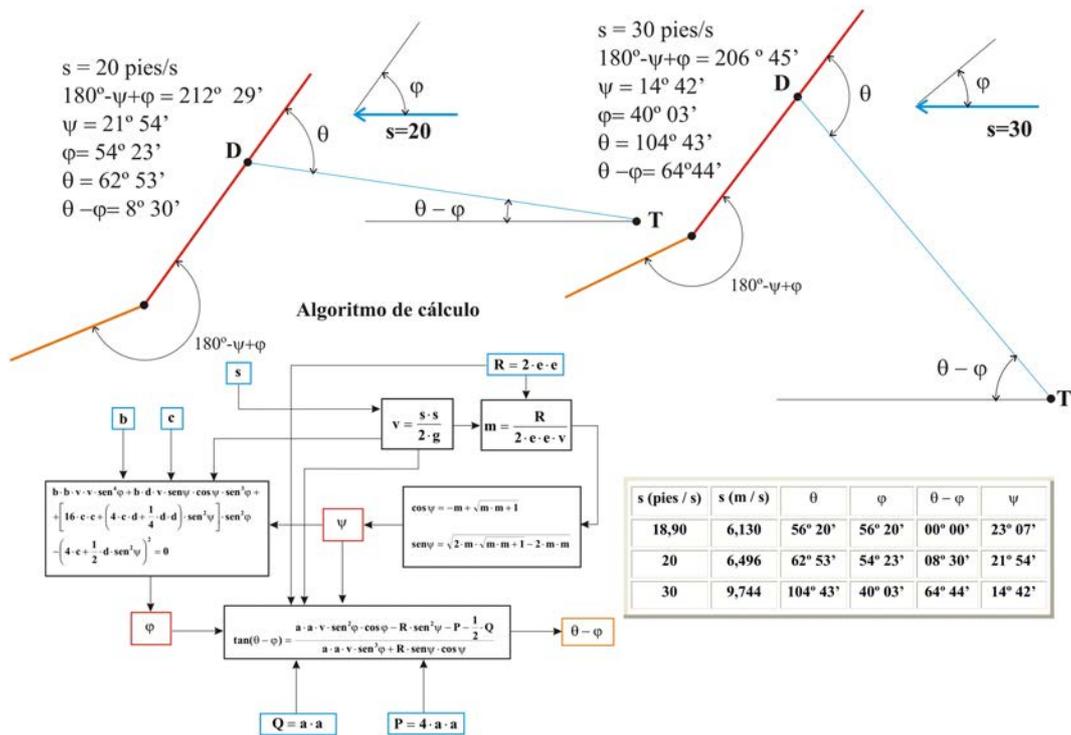


Fig. 35 Aplicación práctica del tercer modelo para la cometa de J. A. Euler

En [§64] y [§65] concluía que la cometa estudiada en la *Addition* es la misma construida en el análisis del segundo caso a la que se ha añadido una “queue” de la mitad de peso de la misma, destacando que para un viento de 20 pies/s la cometa sin cola se eleva  $4^\circ 57'$ , mientras con la misma sube  $8^\circ 30'$ , y con 30 pies/s  $64^\circ 44'$  y sin cola no más allá de  $32^\circ$ . Con lo que quedaba demostrado que, con la cola, una cometa se puede elevar más alto que sin ella<sup>20</sup>. En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados de las tres aplicaciones.

Tabla 1

	s (pies / s)	s (m / s)	$\theta$	$\varphi$	$\theta - \varphi$	$\psi$
1º caso	9	2,920	54° 44'	54° 44'	00° 00'	-
	10	3,248	54° 44'	45° 46'	08° 58'	-
	15	4,872	54° 44'	26° 57'	27° 47'	-
	20	6,496	54° 44'	18° 55'	35° 49'	-
2º caso	18,72	6,080	54° 44'	54° 44'	00° 00'	-
	20	6,496	57° 10'	52° 13'	04° 57'	-
	25	8,120	64° 39'	43° 27'	21° 12'	-
	30	9,744	69° 21'	36° 52'	32° 34'	-
Adición	18,90	6,130	56° 20'	56° 20'	00° 00'	23° 07'
	20	6,496	62° 53'	54° 23'	08° 30'	21° 54'
	30	9,744	104° 43'	40° 03'	64° 44'	41° 42'

<sup>20</sup> Hoy se sabe que el fin de la cola en una cometa es impedir su giro respecto a un eje perpendicular al plano, no aumentar la sustentación. El resultado obtenido por Euler es consecuencia del modelo geométrico adoptado.

Los valores hallados de 18,72 pies/s (6,080 m/s) y 18,90 pies/s (6,130 m/s) corresponden a un viento de *Fuerza 4* en la *Escala de Beaufort*<sup>21</sup> cuando la experiencia dice que una cometa como la descrita es suficiente un viento de *Fuerza 1* (entre 0,3 y 1,5 m/s). Estos resultados numéricos calculados en las aplicaciones prácticas carecen de un análisis de orden de magnitud o de viabilidad. Johann Albert Euler no se plantea si las velocidades del viento halladas son coherentes con el acto de elevar una cometa. Es como si una vez que se ha fijado el modelo geométrico y físico, las expresiones deducidas por razonamientos matemáticos ya tienen para el *geómetra* una validez suficiente, y si algo falla es consecuencia del modelo geométrico o el físico, es decir, el grado de aproximación a la realidad no del análisis empleado<sup>22</sup>.

### 3.5 LA COMETA NO REMONTA EL VUELO

Pese al esfuerzo de Johann Albert Euler, su memoria no tuvo el menor eco en la posteridad. Apenas volvemos a encontrar alusiones a ella, con la excepción señalada de los trabajos de Jorge Juan a los que nos referimos en el anexo 1. Como acabamos de ver, el interés de los resultados obtenidos no justifica en sí mismo desarrollos ulteriores. Pero posiblemente su difusión se vio obstaculizada por la propia mezcla de géneros que se opera en la memoria euleriana. Durante el siglo XVIII se produjo una diferenciación neta entre la *mecánica práctica* y la *física experimental*. El propósito de la primera era comprobar, partiendo de principios matemáticos, la aplicación de estos a situaciones reales. La física experimental estudiaba, en cambio, principios físicos generales (electricidad, teoría corpuscular, calor, etc.) a partir de experimentos (Guijarro, 2001b, pp. 192-3).

La cometa eléctrica era un objeto de interés para la física experimental, como parte del dispositivo ideado por Franklin. Al integrarla en la *mecánica práctica*, Euler tendía un puente entre ambas disciplinas, pues sus resultados debían en principio facilitar nuevas réplicas del experimento de la cometa. Sin embargo, cada una de estas

---

<sup>21</sup> Escala de 0 a 12 grados, para medir la fuerza del viento, propuesta el año 1806 por el marino irlandés al servicio de Francia Francis Beaufort (Gil y Olcina, 1999, p. 117).

<sup>22</sup> Esta es también la explicación que daba Benito Bails (1730-1797) en la Introducción al tomo V de sus *Elementos de Matemática*: “No siendo la Matemática Mixta otra cosa que la aplicación de la Geometría y el Álgebra á la Física, pueden y deben salir erradas sus consecuencias siempre que supongamos en los cuerpos que consideramos una naturaleza, ó propiedades que no sean las verdaderas, ó no tengamos bastante exploradas. Las reglas de calcular son muy seguras, ciertísimas las proposiciones de la Geometría, pero los resultados de su aplicación han de ser forzosamente distintos según los diferentes supuestos sobre que va fundada” (Bails, 1780, pp. xxxviii-xxxix).

disciplinas desarrolló su propia tradición de textos<sup>23</sup>, sin apenas concesiones mutuas. El modelo de Euler se quedó así en tierra de nadie y apenas reaparece en ninguna de las dos disciplinas. Al extinguirse, además, el interés por la replicación del experimento de Franklin, desaparecieron también los incentivos para usar los resultados eulerianos.

#### **4 LA COMETA EN LAS OBRAS DE FÍSICA Y DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA DE LOS SIGLOS XVIII Y XIX**

Al igual que sucedió con la física experimental, la cometa tuvo una segunda oportunidad de incorporarse al acervo de la física teórica por la vía didáctica y recreativa. Durante los siglos XVIII y XIX, aprovechando el tirón de los experimentos de Franklin y de Romas, así como el análisis de su vuelo de Euler, la cometa aparece en una serie de tratados y enciclopedias de física como ilustración de algunos principios físicos. A consecuencia del impulso enciclopedista ilustrado, la divulgación científica comienza sus primeros pasos por la vía didáctica (Moscoso, 2005). Tal como se justifica en la introducción en la versión castellana del *Diccionario de Física (1796-1802)* escrito por Brisson:

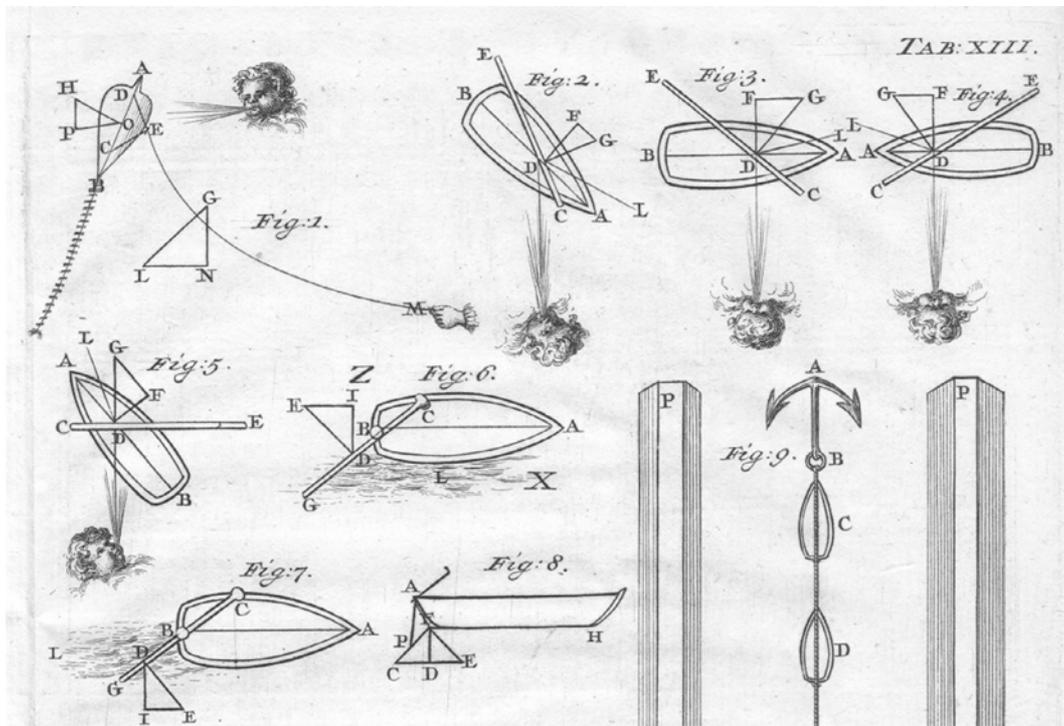
No hay Obras mas á propósito para instruir al Público, [...] deleytarle, y suministrarle los medios de satisfacer su innato deseo de saber, que los Diccionarios, pues proporcionan aun á los ménos iniciados en las Ciencias, el poderse enterar muy en breve de las questões que mas les interesa saber. Así es que en este siglo se han multiplicado casi sin término en todos los ramos de las Ciencias, [...] (Brisson, 1796, Vol I, p. IV)

Sin embargo, a medida la electricidad atmosférica deja de ser un fenómeno extraordinario, el interés por la modelización del vuelo de la cometa va desapareciendo y gradualmente se traslada a un segundo género literario. La cometa adquiere entonces una presencia destacada en la denominada *ciencia recreativa o recreaciones científicas* (Pablo, 1981, pp. VII-XIII). En estas obras se describen una serie de experimentos, que se pueden realizar con materiales sencillos presentes en el hogar o la escuela, o a través de juegos y juguetes populares, todo ello con un fin didáctico o de divulgación de conceptos científicos. Esta segunda navegación literaria de la cometa se extiende a lo largo del XIX hasta que la propia popularidad de la cometa como juguete comienza a descender. Veremos ejemplos de ambos tipos en los epígrafes siguientes.

---

<sup>23</sup> Por ejemplo, la obra de Leonard Euler *Mechanica sive motus scientia analytice exposita* (1746) o el *Examen Marítimo* (1771) de Jorge Juan y Santacilia, son ejemplos de textos de mecánica. Por otro lado, las *Leçons de physique expérimentale* (1743) de Jean-Antoine Nollet o la obra de Peter van Musschenbroek *Introductio ad Philosophiam Naturalem* (1762), son ejemplos de tratados de física experimental.

#### 4.1 LA COMETA EN LOS TRATADOS Y ENCICLOPEDIAS DE FÍSICA DEL SIGLO XVIII Y XIX



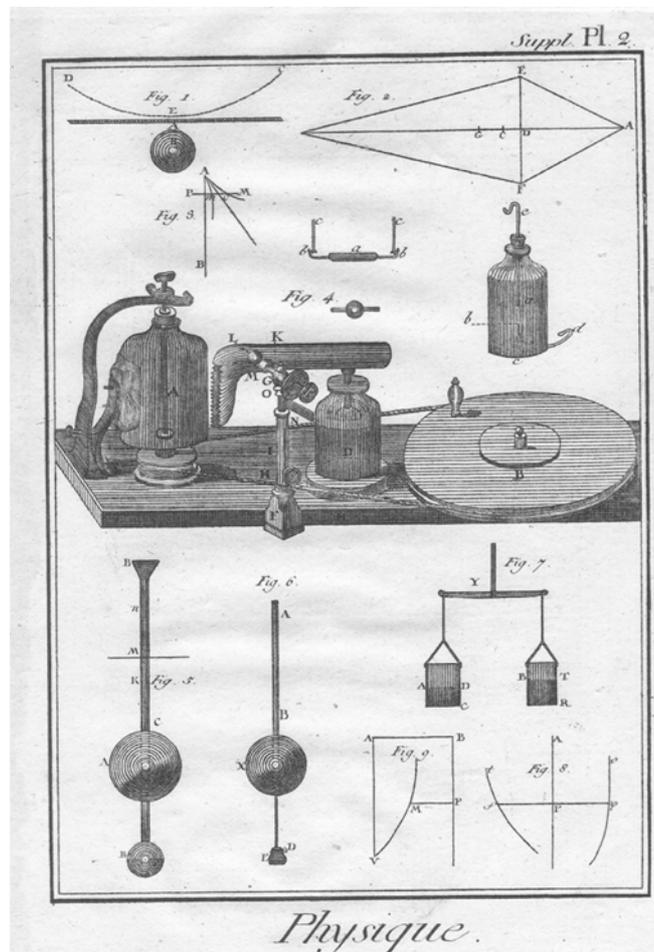
**Fig. 36** Plancha XIII del volumen primero del *Introductio ad Philosophiam Naturalem* (1762) de Musschenbroek

En la obra póstuma del filósofo natural holandés Peter van Musschenbroek, *Introductio ad Philosophiam Naturalem* (1762), se describen, como vimos en el capítulo anterior, algunos experimentos realizados con cometas eléctricas (Musschenbroek, 1762, vol. 1 pp. 295-6). Podemos suponer que en ellos se encuentra la motivación del análisis del vuelo de la cometa que encontramos más adelante en la misma obra como ejemplo de cómo una fuerza puede descomponerse en dos, según lo que se conoce actualmente como *regla del paralelogramo*. Tras explicar cómo se analiza *De Motu Composito* en el artículo DLXXIII (Musschenbroek, 1762, vol. 1 p. 177), van Musschenbroek lo ilustra con la cometa (Fig. 36). Tras una descripción sucinta de la máquina voladora, establece que la fuerza de resistencia del viento sobre el plano de la cometa es igual a  $OH$ , la cual se descompone en  $OP$  paralela al suelo y  $PH$  perpendicular al mismo, así,  $OP$  hace que la cometa se mueva en dirección del viento y  $OH$  es la fuerza causante de la elevación de la cometa. Así pues, existen tres fuerzas que deben estar en equilibrio: la presión del viento, el peso de la cometa con su cola y la tensión con la que sujetamos la fuerza en  $M$ .

Dado que el fin de este ejemplo es meramente ilustrativo, no realiza ningún cálculo ni un análisis profundo, tan sólo una ligera descripción. A continuación representa las fuerzas involucradas en la vela de un navío, considerando que esta es plana.

Entre los años 1776 y 1777 se publican cinco tomos de texto (más uno destinado a los grabados) como suplemento<sup>24</sup> a la edición de *L'Encyclopédie de Diderot et D'Alembert*. Aquí aparece la voz *cerf-volant* donde se describe como instrumento de experimental en física (Fig. 37):

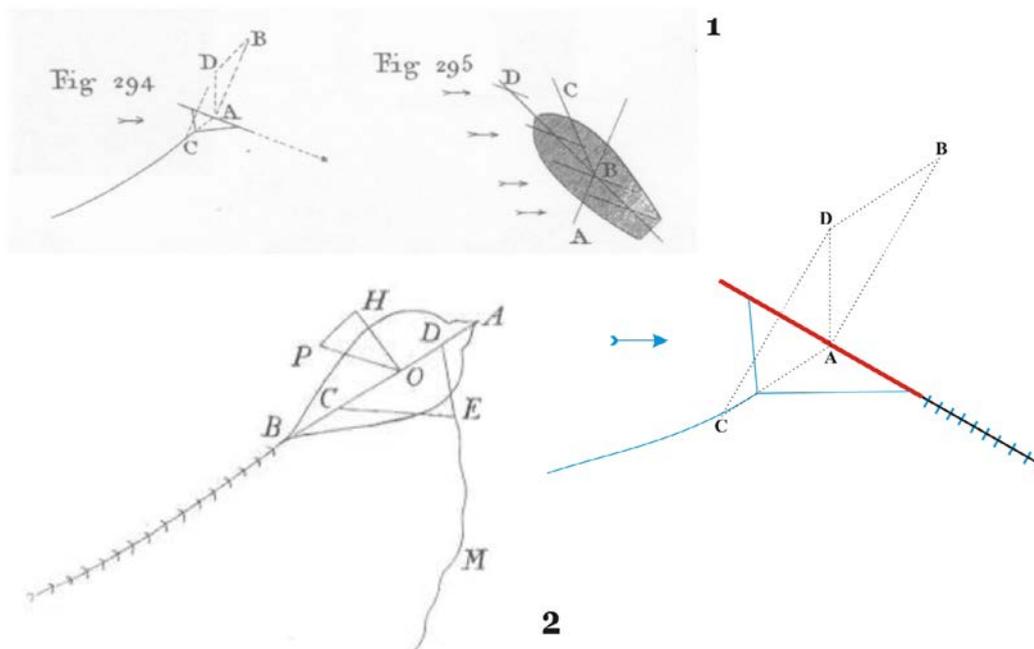
CERF-VOLANT, (Méch. & Physiq.) on nomme ainsi une figure faite avec du papier & des osiers, qui ne servoit autrefois que de jouet aux enfans ; ils y attachoient une ficelle, au moyen de laquelle ils l'élevoient en l'air, lorsque le vent étoit assez fort pour cela. Mais les physiciens modernes s'en sont servi pour tirer le feu électrique des nuées, ensorte que ce jouet est devenu entre leurs mains un instrument de physique ; & c'est par cette raison que nous en parlons ici. (AAVV, 2000)



**Fig. 37** Plancha 2 del suplemento a *L'Encyclopédie*, la cometa aparece en la parte superior derecha

<sup>24</sup> Son los conocidos como suplementos de Charles-Joseph Panckoucke (1736-1798), que fue un librero de la Imprenta Real que reeditó *L'Encyclopédie* a partir de 1768 con los suplementos.

La voz se divide en dos partes escritas por autores distintos. La primera, firmada con la inicial (*J.*), desarrolla la mecánica del vuelo de la cometa. La otra, bajo las iniciales (*P.B.*)<sup>25</sup>, analiza *usage du cerf-volant dans la Physique*, es decir, en el estudio de la electricidad atmosférica. Esta parte es la más extensa del artículo, ya que la primera parte está concebida como una introducción a la segunda, con el fin de saber construir una cometa que alcance una altura elevada imprescindible para su uso como instrumento eléctrico. Empleando el modelo de la memoria *De Cerfs-volans* de J. A. Euler, sin más demostración, cita las condiciones geométricas que se imponen a la construcción de la cometa con el fin de que se alcance la máxima altura.



**Fig. 38** Grabado del esquema del vuelo de una cometa del *Lectures on Natural Philosophy and Mechanical Arts* (1807) de Young (1). Grabado del término *Drache, elekrischer* escrito por Brandes en el diccionario alemán *Physikalisches Wörterbuch* (1825-1845) (2)

Esta aparición inicia una serie de incursiones de la cometa en las obras enciclopédicas de física experimental editadas en las primeras décadas del siglo XIX, si bien la mayoría de las veces tratan exclusivamente su contribución al experimento eléctrico obviando la explicación mecánica de su vuelo<sup>26</sup>. En cambio, otras sí que analizan las fuerzas implicadas en su vuelo. Veamos algunos ejemplos. En 1807, el médico y físico inglés Thomas Young (1773-1829) publica en dos volúmenes sus

<sup>25</sup> (*J.*) corresponde al mecánico y traductor suizo Samuel-Rudolph Jeanneret, y (*P.B.*) corresponde al físico experimental italiano *Père* Carlo Barletti (1735-1800) (Laguzzi, 1992, p. 18).

<sup>26</sup> Un ejemplo lo tenemos, en el *Diccionario de Física* de Brisson (1796), en donde se describen los experimentos eléctricos de Romás, sin detallar el vuelo de la cometa.

*Lectures on Natural Philosophy and Mechanical Arts*. En la “Lecture XXVIII: On the regulation of hydraulic forces”, podemos leer:

[A] kite affords a very familiar example of the effect of the oblique impulse of the air, of which the action first causes a pressure perpendicular to the surface of the kite, and this force combined with the resistance of the string, produces a vertical result capable of counteracting the weight of the kite. (Fig. 38.1) (Young, 1807, p. 324)

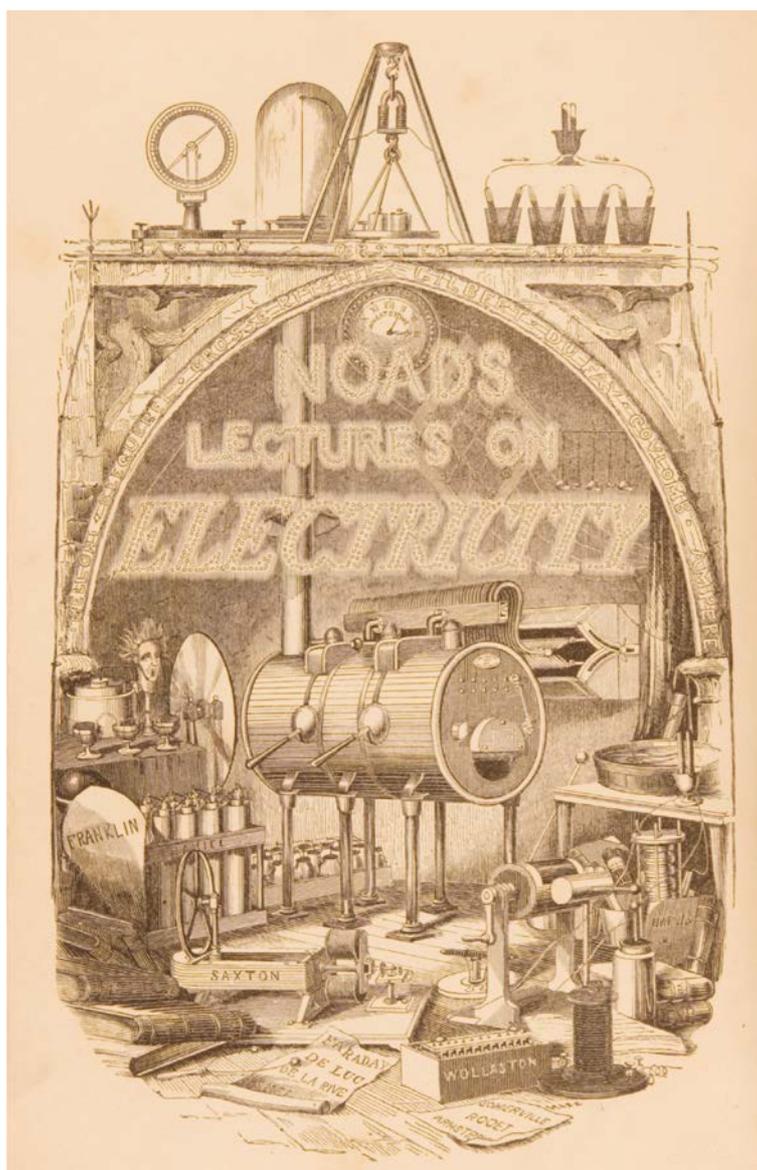
Allí AB representa la fuerza del viento perpendicular a la superficie de la cometa, que se compone con la AC que es la tensión de la cuerda y AD que es su peso. En este caso la simplificación es muchísimo mayor que lo mostrado en la obra de Musschenbroek, sin más la cometa se ha transformado en un simple esquema de descomposición de fuerzas sin ningún tipo de explicación sobre cómo debe construirse la cometa para un vuelo óptimo.

En el diccionario alemán *Physikalisches Wörterbuch* publicado entre los años 1825-1845, encontramos la voz *Drache, elektrischer* (Gehler, 1825-1845, pp. 583-91), el término está firmado por el físico y meteorólogo alemán Heinrich Wilhelm Brandes (1777-1834). Siguiendo la estructura empleada en la *L'Encyclopédie de Diderot et D'Alembert*, tras una pequeña introducción histórica, empieza describiendo la mecánica del vuelo de la cometa pero de una manera simplificada siguiendo lo expuesto por Musschenbroek, al que nombra, pero cometiendo un error. En la descomposición de fuerzas mostrada (Fig. 38.2) por Brandes la presión del viento está representado por PO, que no es perpendicular a la superficie de la cometa, descomponiéndola en OH y HP, perpendicular y paralela respectivamente a la superficie de la cometa. A continuación razona que HO se compensa con la tensión del hilo y HP es la causante de que se eleve la cometa. Existe un error<sup>27</sup> al considerar que PO es la presión del viento no HO.

El frontispicio (Fig. 39) de la obra *Lectures on Electricity* (1844), escrita por el químico y físico inglés Henry Minchin Noad (1815-1877), muestra un repertorio de instrumentos y herramientas empleadas en los laboratorios del siglo XIX en los estudios de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Entre máquinas electrostáticas, baterías, electros copios, etc., la cometa de Franklin aparece arrinconada. En este grabado es una muestra de cómo paulatinamente la aparición de la cometa en los tratados de física es puramente anecdótica. Este juguete ha dejado de ser interesante, otros instrumentos reclaman su protagonismo (Brenni, 2009).

---

<sup>27</sup> En un artículo publicado por el meteorólogo norteamericano Cleveland Abbe (1897), considera que es una errata que pudo deberse al copiar la figura de Musschenbroek, ya que ambas figuras tan sólo se diferencian en la perpendicularidad de PH, respecto al plano de la cometa.



**Fig. 39** Frontispicio de *Lectures on Electricity* (1844) de Noad

Esta desaparición es patente en los manuales de física dedicados a la enseñanza. Uno de los más populares es el *Traité Élémentaire de Physique Expérimentale et Appliquée* del profesor francés Adolphe Ganot (1804-1887), cuya primera edición apareció en 1851, con múltiples ediciones a lo largo del XIX y con traducciones a más de una docena de idiomas (Simon, 2007). En la decimotercera edición en castellano de 1898, nombra a la cometa como el método primitivo que empleó Franklin para el descubrimiento de la electricidad atmosférica, olvidándose de la mecánica de su vuelo (Ganot, 1898, p. 857)

## 4.2 LA COMETA COMO RECREACIÓN CIENTÍFICA

Los libros de recreaciones aparecieron a finales del siglo XVII, desarrollándose en el XVIII y alcanzando su máximo apogeo en el XIX. En estos libros se abordan una serie de experimentos empleando materiales sencillos presentes en el hogar o la escuela con el fin de ilustrar un concepto científico (Pablo, 1981, p. VII). Dada la condición de juguete, tras su asociación a la ciencia por el experimento de Franklin, la cometa se convierte en un elemento habitual en estos trabajos.

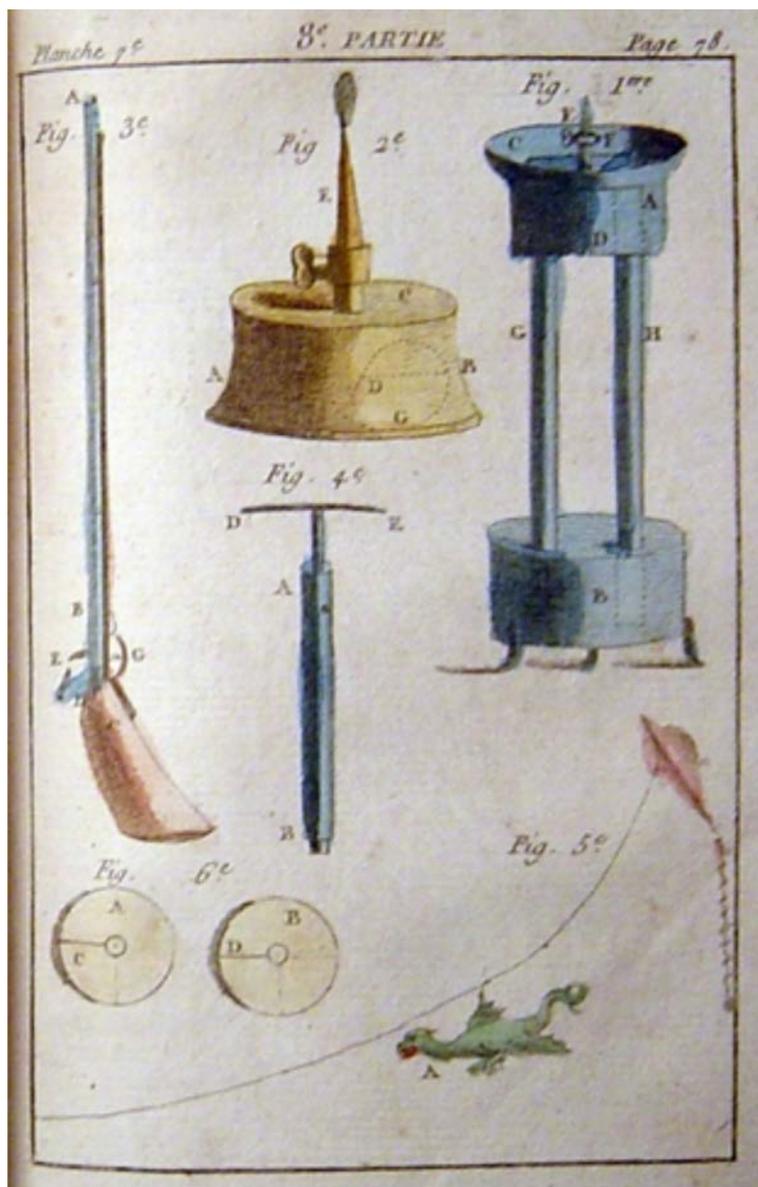
En 1778 se reedita la obra del matemático francés Jacques Ozanam (1640-1717) *Récréations mathématiques et physiques*. Esta edición es llevada a cabo por el también matemático francés Jean-Étienne Montucla (1725-1799) partiendo de la obra original de 1640. Esta casi puede considerarse una obra nueva por la cantidad de correcciones y materiales originales que incorpora<sup>28</sup>, entre ellos el Problema LXIX del cuarto tomo que aparece con el título *Le mécanisme du Cerf-volant: Diverses questions et recherches sur ce jeu*, allí podemos leer:

Tout le monde connoît l'amusement du cerf-volant, petite machine fort ingénieuse, et dans laquelle éclate un mécanisme très-adroit. Cependant on s'étonnera peut-être de ce qu'urt objet de cette nature a pu faire le sujet d'un mémoire académique ; car on en lit un sur le cerf-volant parmi ceux de l'Académie de Berlin, année 1756. Mais cette surprise cessera, quand on sçaura que M. Euler le fils étoit déjà profond géomètre à un âge où la plupart des jeunes gens ne voient dans un cerf-volant qu'un objet d'amusement ainsi il étoit difficile qu'il ne fût pour lui un sujet de méditation. Il présente en effet plusieurs questions curieuses, et même, pour la plupart, impossibles à traiter sans une analyse profonde. On peut donc regarder, si l'on veut, ce Mémoire, comme les juvenilia d'un grand géometre. Nous ne le suivrons pas dans ses calculs profonds ; nous nous bornerons à traiter la matiere d'une maniere moins exacte, et plus facile à entendre. (Ozanam, 1778, pp. 240 – 45 y Pl. 6).

En apenas veinte años el trabajo del joven Euler es objeto de divulgación, explicando cómo se vuela la cometa, la importancia de colocarle una cola, el ángulo óptimo de ataque, etc. Después describe como se construyen cometas con formas muy variadas, no siempre geométricas, pero observando las reglas explicadas. Todo ello para la diversión de los niños. La edición inglesa (Ozanam, 1844, pp. 708-10) de esta obra de 1778 es una traducción exacta de la obra francesa, sin ningún tipo de adición o enmienda.

---

<sup>28</sup> La obra original de Ozanam de 1694 tuvo varias ediciones en francés y fue traducida al inglés en 1708. Charles Hutton amplió y la tradujo al inglés basándose en la edición francesa de Montucla (1778), publicándose en 1803 y en 1814, también con nuevos materiales. En 1844, Edward Riddle vuelve a editar la traducción de Hutton, eliminando algunos materiales y añadiendo otros. La relación de estas versiones se detalla en Ozanam (1844).



**Fig. 40** El *dragón volador* en el tomo 4 de la edición de 1775 de *Nouvelles récréations physiques et mathématiques* de Guyot

Otra obra de este género, que también tiene varias ediciones, es la obra *Nouvelles récréations physiques et mathématiques* del físico francés Edme-Gilles Guyot (1706-1786) (Guyot, 1799), en su edición de 1799 nombra a la cometa en dos recreaciones: XIII *récréation cerf – volant électrique* (Guyot, 1799, vol. 1 pp. 252-4) y XXIII *récréation Dragon volante* (Guyot, 1799, vol. 2 pp. 301-2). La cometa es tratada en dos aspectos, uno de índole científico y el otro lúdico o de entretenimiento. La primera recreación, incluida en el capítulo de electricidad, corresponde a la construcción de una cometa eléctrica, sin explicar el fundamento mecánico de su vuelo y dando unas

nociones de cómo realizar experiencias con ella, al igual que hiciera Romas, describe también la construcción de una devanadera con aislamiento para evitar sufrir descargas<sup>29</sup>. La segunda recreación, incluido en el capítulo sobre el aire, consiste en colgar una figura con forma de un dragón en la cuerda de una cometa, recomendando que elevemos alta la cometa para que no se vea y para dar un mayor realismo al vuelo del dragón, poner las alas móviles, pudiendo ser agitadas por el viento (Fig. 40).

Las recreaciones científicas nombradas hasta ahora, tenían una estructura similar, el planteamiento de una serie de experimentos relacionados por unos temas: el aire, el agua, las fuerzas, etc. Dentro de este género, a principios del XIX, aparecen una serie de libros destinados a acercar la filosofía natural a los niños. Estos libros cuentan una historia de ficción en que los protagonistas son niños que aprenden todo lo relacionado con el mundo natural, a base de observación, en paseos por el campo, recolectado cosas, practicando juegos o construyendo juguetes. En estas historias los niños son instruidos por sus padres, maestros o niñeras que les explican los fundamentos físicos de las cosas observadas por ellos mismos.

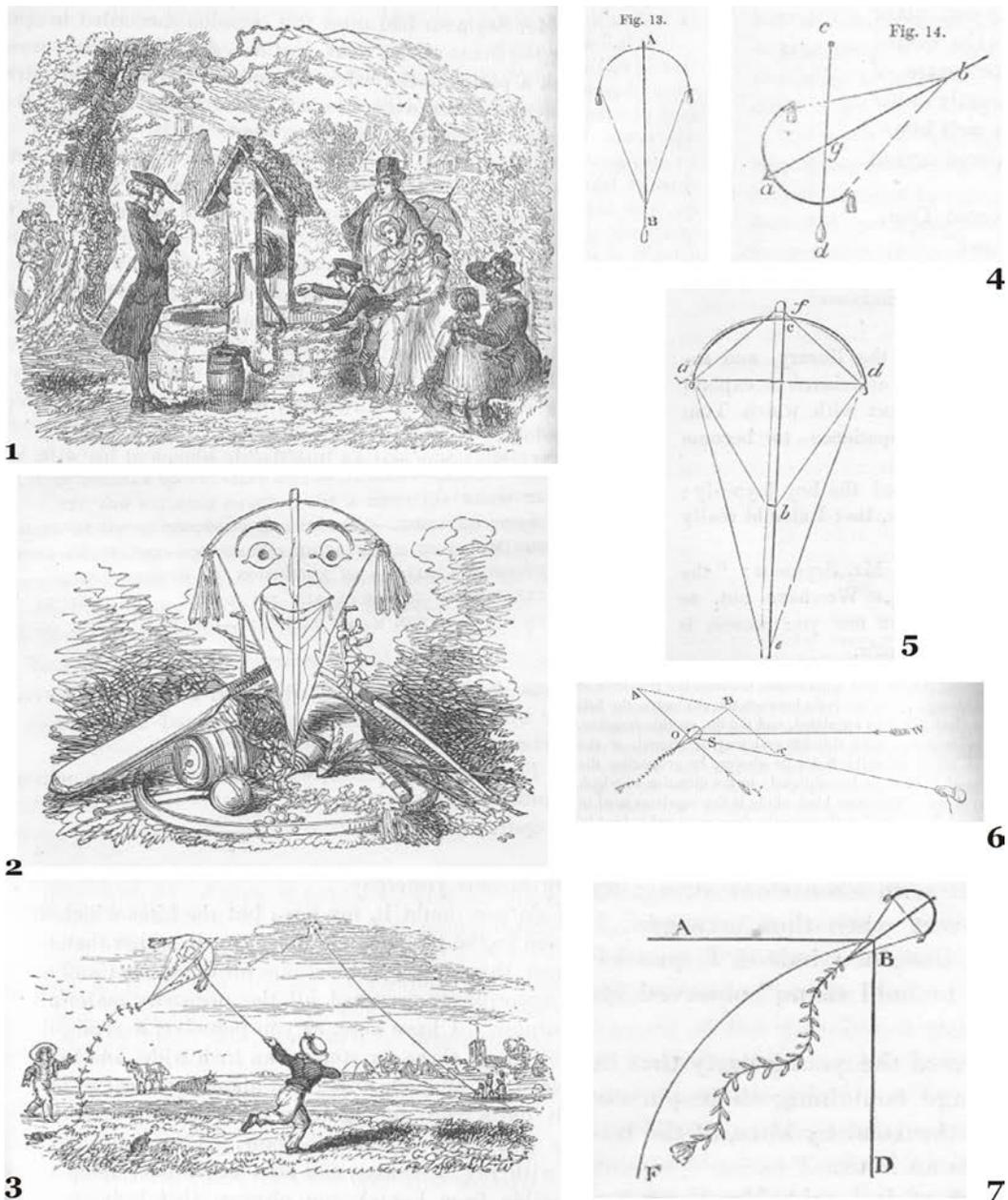
La obra más famosa en cuanto al uso de juegos y juguetes para explicar la filosofía natural es la obra del físico inglés John Ayrton Paris (1785-1856) *Philosophy in Sport* (1853), cuya primera edición data de 1827. De esta obra se editan en inglés varias ediciones a lo largo del XIX, a cada una de las cuales se le añaden unos apéndices de notas con el fin de mostrar los avances científicos, y también como una especie de guía didáctica destinada a los maestros o preceptores que utilizan el libro como texto de enseñanza. El éxito de esta obra hizo que se tradujera al francés con varias ediciones por T Richard con el título *Nouveau manuel complet des jeux enseignant la science* en 1834 y de esta al castellano por el marino y escritor Jorge Lasso de la Vega en 1835 con el título *Las ciencias enseñadas por medio de juegos o teorías científicas...* (Lasso de la Vega, 1835), en que el añadido de notas y nuevos juegos es importante.

La obra de Paris narra las aventuras científicas durante un verano en el que el joven Tom regresa del colegio a casa de sus padres Mr. y Mrs. Seymour. El padre, ayudado por un viejo amigo M. Twaddleton, es el encargado de instruir a Tom y a sus hermanas mayores Luisa, Fanny y Rosa por medio de paseos, experimentos y juegos distintos

---

<sup>29</sup> Este artefacto es el descrito con gran detalle en la voz CARRO ELECTRICO en la traducción del *Diccionario de Física* de Brisson (1796, Tomo II, pp. 290-301).

temas de física experimental o filosofía natural: fuerza de gravedad, el equilibrio, óptica<sup>30</sup>, etc.



**Fig. 41** Dibujos del *Philosophy in Sport* (1853): Mr. Twaddleton y la familia Seymour estudiando la caída de los graves en un pozo (1). Juegos al *aire libre* (2). Volando cometas (3). Centro de gravedad en una cometa (4). Construcción de la cometa (5). Composición de fuerzas en el vuelo de una cometa (6). Composición de movimientos (7).

<sup>30</sup> Esta obra es conocida por una descripción de una serie de juguetes ópticos que se basan en la *persistencia de la retina*, que es el fenómeno fisiológico por el que vemos las imágenes en movimiento en un cinematógrafo. El juguete denominado por el autor *Thaumatrope* (Maravilla rotatoria), consta de un disco de cartón en que tiene dibujado en cada lado un dibujo distinto, el cual al hacerlo girar, por medio de unos hilos colocados en sus extremos, se produce la ilusión de que ambos dibujos son uno solo. Así si dibujamos una jaula en un lado y una rata en el otro al girar el disco veremos que la rata estará dentro de la jaula (Paris, 1853, pp. 391-2).

La cometa tiene un papel destacado en la obra de Paris, en dos facetas, en el capítulo dedicado al equilibrio de los cuerpos, donde habla del centro de gravedad y utiliza la cometa como ejemplo de cómo se calcula en una figura plana. Posteriormente dedica dos capítulos completos a la cometa, detallando en uno su construcción y en el otro aprovecha su vuelo para explicar los fenómenos físicos asociados al mismo, hablar de historias sobre el uso de las cometas y de las propiedades del viento (Fig. 41).

Sin embargo, el interés por la cometa se diluye ya a finales del XIX. Aparecen entonces una serie de libros que son recopilaciones de experimentos de física y química publicados en las revistas científicas de divulgación de gran tirada a lo largo del siglo. Por ejemplo, la francesa *La Nature*<sup>31</sup> publica una sección fija bajo el título *Physique sans appareils*, donde describe una serie de experimentos, no sólo de física, sino también de química, realizados con utensilios y sustancias disponibles en el hogar. Estos experimentos se editan en forma de libro con el título *Les Récollections Scientifiques ou L'Enseignement par les Jeux* (1880) firmado por el aeronauta y director de *La Nature*, el francés Gastón Tissandier (1843-1899), del que hubo varias ediciones y se traduce a varios idiomas (Tissandier, 1981). Otra obra de gran difusión fue *La Science Amusante* del periodista francés Arthur Good (1853-1928) que firmaba con el seudónimo de Tom Tit (1981). Este tipo de divulgación es similar a las obra de Ozaman y Guyot, pero los experimentos comienzan a aproximarse al sentido actual de *ciencia*, pues se excluyen los asociados a la magia blanca y a los juegos de prestidigitación.

La cometa no aparece ya en ninguna de estas dos obras. Incluso en el capítulo titulado, en la edición española, “Los aparatos de vuelo mecánico” de la obra de Tissandier, el autor proclama:

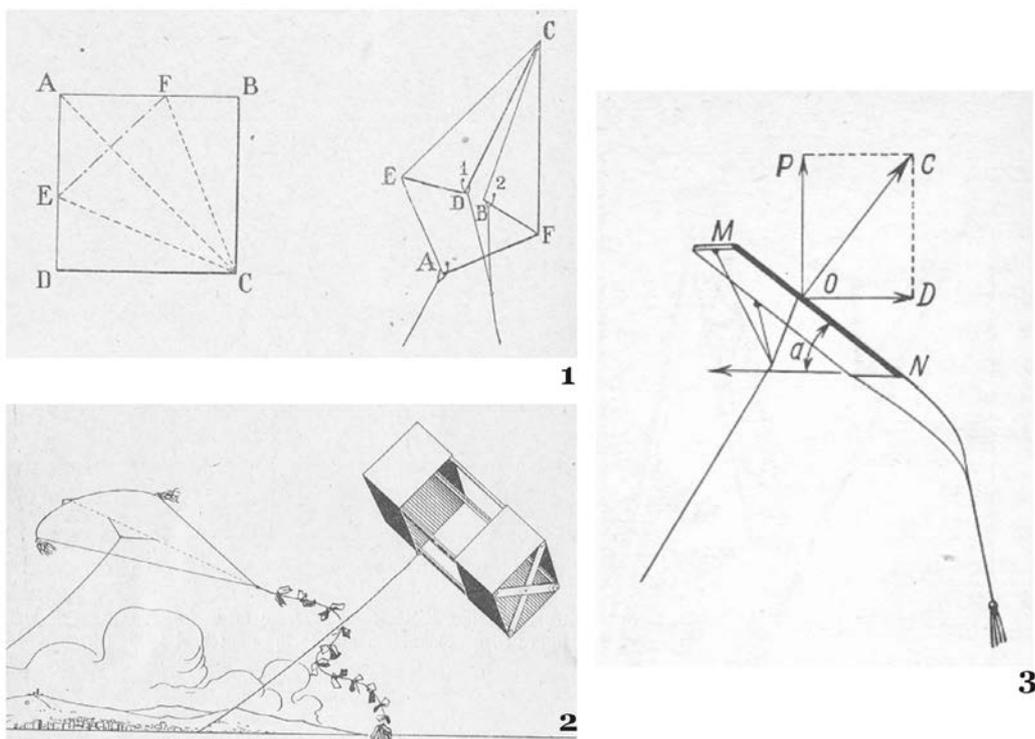
La cometa, conocida desde la más remota antigüedad en muchísimos pueblos, es un objeto demasiado común para que juzguemos necesario detenernos en describirlo; por consiguiente, aquí nos ocuparemos únicamente de algunos aparatos de vuelo mecánico, más interesantes y no tan vulgares como las cometas. (Tissandier, 1981, p. 259)

Desvanecida la pasión popular por los experimentos eléctricos, la cometa ya no es ni siquiera el único juguete que vuela. Su interés científico ha desaparecido ya en el siglo XX, cuando el propio género de las recreaciones se orienta ya hacia fines puramente pedagógicos (Pablo, 1981, pp. IX – X). En España destaca la obra de José

---

<sup>31</sup> *La Nature* es una revista de divulgación científica fundada por el aeronauta y divulgador científico Gastón Tissandier (1843-1899) en 1873, y se publica hasta 1905. Durante tres años entre 1877 y 1879 hubo una edición castellana editada por la imprenta Perojo de Madrid (Pablo, 1981, p. XII.).

Estalella (1918) donde emplea la cometa como un juego más que con un fin didáctico, describiendo su construcción en dos facetas. La obra se divide en tres libros. El tercero tiene por título *Trabajos de habilidad y paciencia*, y en el capítulo *construcciones de papel* refiere como se construye una cometa a base de doblar papel con un objetivo puramente geométrico (Fig. 42.1) (Estalella, 1918, pp. 467-8). En otro capítulo, que tituló *En el campo*, describe la construcción de diversos juegos y experimentos para hacer en un paseo por el campo, entre ellos la construcción de dos tipos de cometa una plana y otra celular (Fig. 42.2) (Estalella, 1918, pp. 495-9).



**Fig. 42** Cometa de papiroflexia (1) y cometa plana y celular (2) en el *Ciencia Recreativa* de Estalella. Composición de fuerzas en una cometa en *Física Recreativa* de Perelman (3)

Todavía encontramos de vez en cuando vestigios de la cometa como modelo mecánico<sup>32</sup>, pero con el siglo XX el vuelo de la cometa toca a su fin.

<sup>32</sup> Por ejemplo, en el libro *Física recreativa* escrita por el ingeniero y divulgador ruso Yakov Perelman, cuya primera edición data de 1911 y que tuvo numerosas reediciones, siendo traducida a diversos idiomas. La cometa está presente en un artículo bajo el título “¿Por qué se remontan las cometas?” Allí responde a la pregunta: “Las cometas se remontan cuando tiramos de la cuerda hacia adelante ¿Por qué?” Para ello de una manera sencilla da una explicación de las fuerzas implicadas en el vuelo de la cometa, tal como ha sido habitual en otras obras ya citadas (Perelman, 1975, pp. 57-8).

## 5 CONCLUSIONES

La cometa presentó su candidatura científica con el experimento de Franklin en 1752. Como instrumento auxiliar en la experimentación eléctrica su uso apenas alcanzó medio siglo más, en buena parte por la ausencia de resultados interesantes más allá de la replicación de los datos de Franklin. Como modelo mecánico su vida no fue mucho más larga, por esas mismas razones, pero su popularidad como juguete le concedió una segunda vida a través de la física recreativa, durante al menos cien años más.

Retrospectivamente, podríamos concluir que la vida científica de la cometa a lo largo de los siglos XVIII y XIX pone de manifiesto, más que su interés o utilidad para la ciencia, el grado en que esta depende de la atención del público para facilitar su avance: los científicos encuentran en la fascinación popular el gancho perfecto para la difusión de sus teorías. La combinación de la cometa y el pararrayos permitió mostrar de qué modo la Ilustración científica podía someter un fenómeno natural como el rayo, fuente hasta entonces de pura superstición. La explicación mecánica del vuelo de la cometa sólo era interesante en la medida en que el público la demandaba por la popularidad del propio juguete. Una vez que otros fenómenos y juguetes captaron la atención popular, la ciencia se sirvió de ellos del mismo modo que la cometa y así también los abandonó (Turner, 1987).



## 4 COMETAS METEOROLÓGICAS

---

### 1 INTRODUCCIÓN

La formulación de las leyes que rigen los fenómenos atmosféricos, desarrollada a lo largo del siglo XIX (Petterssen, 1951, pp. 325-7), y a principios del XX (Nabeker, 1995, pp. 49-50), exigía nuevos datos para comprobar la veracidad de las mismas. No debían tan solo ser tomados en la superficie, sino que debían prolongarse hacia las altas capas de la atmosfera. Así lo justificaba el meteorólogo norteamericano Charles Frederick Marvin (1858-1943):

With the advance of the science of meteorology, and especially with the progress in the development of the fundamental laws governing atmospheric phenomena, a growing need arises for accurate knowledge of the conditions of the atmosphere with respect to its motion, temperature, pressure, moisture, etc., not only near the surface of the earth but particularly in the higher strata, where the forces in action have full scope and their effects are unmodified by such disturbing influences as exist near the surface. (Marvin, 1896, p. 1)

Estas observaciones tridimensionales de la atmósfera dieron origen a una nueva especialidad dentro de la meteorología: la *aerología*<sup>1</sup>. Para el meteorólogo norteamericano Alexander George McAdie (1863-1943), hasta la aparición de esta nueva ciencia:

[...] a man looking up at the clouds and with a map giving only surface conditions, can know no more about the sea of air above him than primitive man knew of the sea of water when he first ventured upon it. (McAdie, 1916, p. 266)

A finales del siglo XIX, la manera habitual de realizar medidas en altura era por medio de los instrumentos transportados durante las ascensiones con globos libres, pero este método presentaba el inconveniente de no poder repetirse con la frecuencia deseada por su excesivo coste<sup>2</sup>. A principios del siglo XX, aparecieron dos nuevos métodos

---

<sup>1</sup> En el congreso anual de la Comisión Internacional de la Aerostación Científica celebrado en 1906, el meteorólogo ruso de origen alemán Wladimir Peter Köppen (1846-1940) propone el nombre de *aerología* a la parte de la meteorología que se encarga de medir, recopilar e interpretar datos de las altas capas de la atmósfera, así como describir las leyes físicas de la atmósfera libre (Nabeker, 1995, p. 48).

<sup>2</sup> Según Mark W. Harrington (1848-1926), jefe del U.S. Weather Bureau, en 1893, lanzar un globo libre tripulado a 20.000 pies (~6.000 m.) dos veces al día representaría un coste anual de 20.000 dólares, frente

experimentales que fueron el aliado perfecto para obtener datos verticales en la atmosfera. El más simple era el sondeo con globos piloto, que consistía en lanzar un pequeño globo de gas y seguirlo desde tierra con un instrumento adecuado. Este sondeo sólo permitía deducir la distribución de la velocidad del viento con la altura. Las observaciones con cometas, aunque tecnológicamente más complicado, era un método capaz de tomar más datos y más precisos.

Hacia 1900 la aerología encontró en la cometa el artefacto volador más eficaz para conseguir sus fines, pero la cometa no era ya el clásico juguete infantil. Ahora, gracias a las investigaciones relacionadas con la aerodinámica del vuelo de aparatos más pesados que el aire, la cometa se convierte en un dispositivo muy desarrollado tecnológicamente, cuya construcción y manejo estaba en manos de personal especializado, contratada al efecto en los observatorios (Lorente, 1928, p. 16). Pero su vida como instrumento meteorológico no pasó, salvo excepciones, de la tercera década del siglo XX. El desarrollo de nuevos métodos más eficaces y con menos dificultades prácticas, como los sondeos con avión y la aparición de las primeras radiosondas, hicieron que la cometa fuera olvidada por la ciencia aerológica.

Estudiaremos este despegue y posterior caída, analizando por qué surge la necesidad de medir los parámetros de la atmosfera y cuáles eran. A continuación, describiremos las cometas empleadas en los sondeos y analizaremos las distintas técnicas aerológicas empleadas, según se describen en los manuales de la época. Para concluir examinaremos las causas de su aterrizaje.

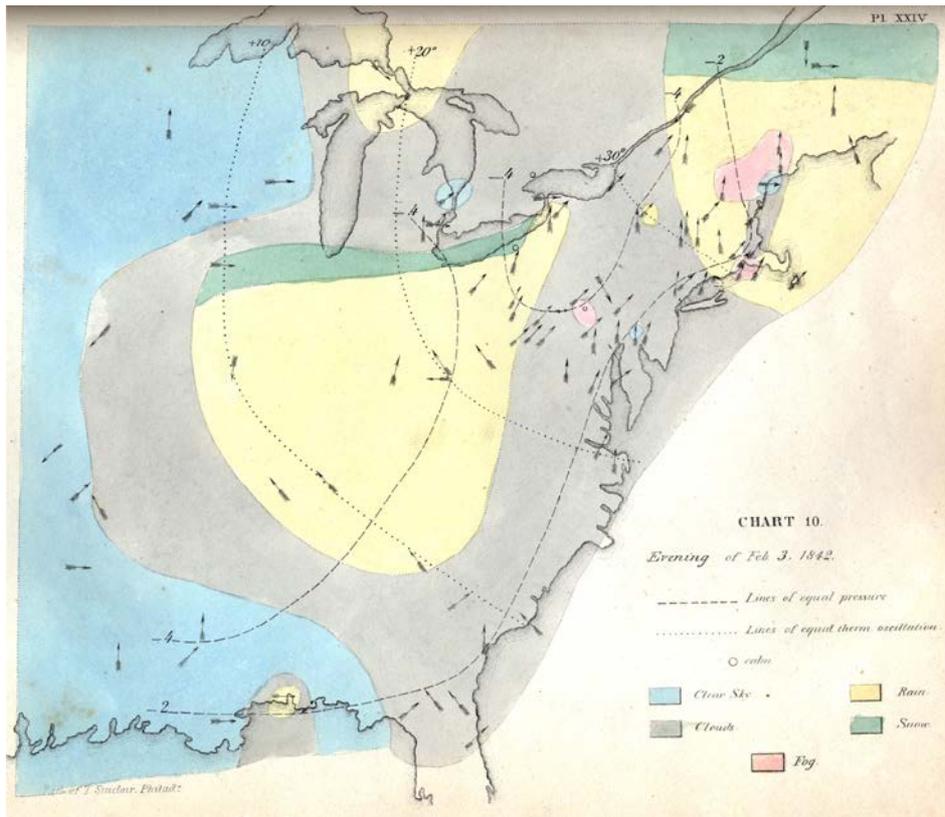
## **2 EL NACIMIENTO DE LA AEROLOGÍA Y LA PREDICCIÓN DEL TIEMPO**

Hasta la aparición de instrumentos capaces de cuantificar parámetros definidos de la atmósfera, la cultura popular disponía de un bagaje de conocimientos prácticos sobre los fenómenos de la atmósfera, en los que la religión, la mitología y la costumbre se unían en la predicción de los comportamientos climáticos con el fin de proteger las cosechas (Palomares, 1988, 1991). La popularización del uso del barómetro (Guijarro, 2005) y del termómetro a partir del siglo XVIII, permitió un registro cuantitativo de las variables de presión y temperatura en la atmosfera. La medicina (Urteaga, 1997), la agricultura (Feldman, 1990, p. 156) y la navegación marítima fueron las actividades que empezaron a aprovecharse de estos nuevos datos (García de Pedraza y Giménez de la

---

a los 10.000 que costaría hacerlo con cometas, eso si llegando a una altura de tan sólo 14.000 pies (~4.000 m) (Whitnah, 1961, p. 70).

Cuadra, 1985, p. 17). Esto trajo consigo la creación de redes de observación, siendo una de las primeras la promovida en Alemania por la *Sociedad Meteorológica Palatina* de Mannheim, entre los años 1780 y 1792, que constó de 33 estaciones, en distintas ciudades europeas. También es de destacar la *Sociedad Real de Medicina* en París (1778). Los datos recogidos por estas redes fueron tan sistemáticos y precisos que en la actualidad se recurre a los mismos para conocer el tiempo atmosférico de la época (Feldman, 1990, p. 155).



**Fig. 43** Primeros mapas meteorológicos. Este mapa muestra una depresión sobre el este de Estados Unidos en 1842. Pueden verse las isolinneas de presión y de temperatura. Las flechas representaban la dirección del viento y los distintos colores las áreas con cielo despejado, nublado, con lluvia o con nieve

Así pues, a lo largo del siglo XIX existían una serie de observatorios meteorológicos dispersos en todo el mundo sin ningún tipo de organización, herederos de las necesidades ambientalistas, de la navegación marítima y otros fines. Por otro lado se pensaba que los fenómenos atmosféricos tenían desarrollo y causas en un ámbito local. Sin embargo, pronto se sospecharía que existía una fuerte dependencia entre el tiempo atmosférico en diferentes puntos de la tierra (Shaw, 1926). En varios países europeos, así como en Estados Unidos, se empezaron a realizar el estudio de la

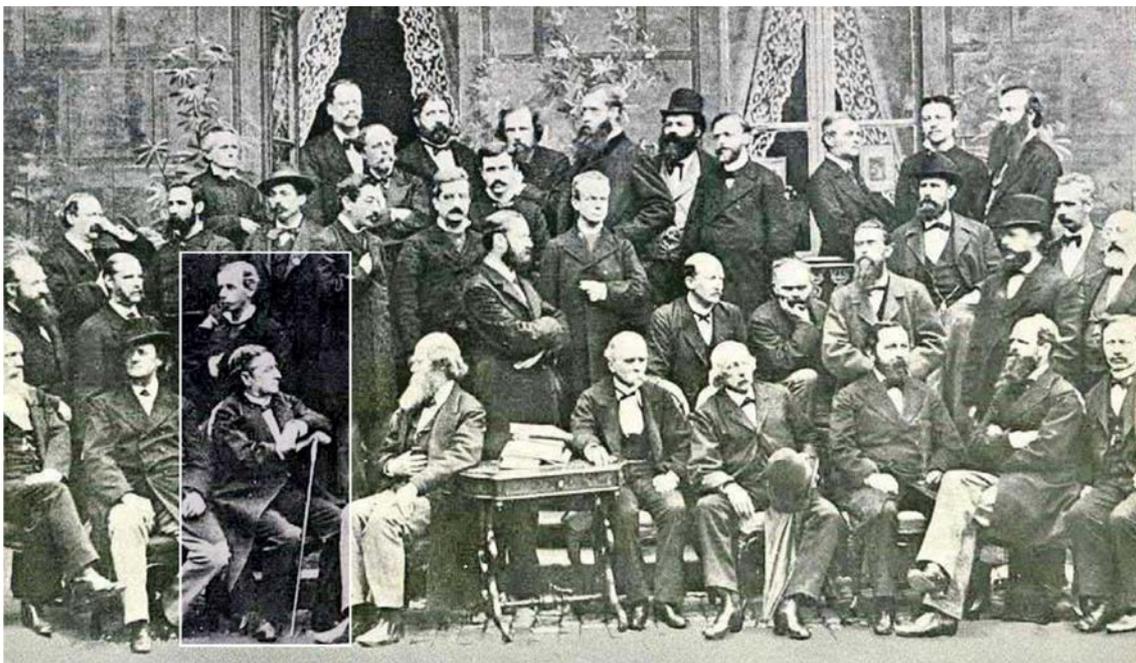
distribución de la presión, la temperatura y los movimientos del aire en superficie, apareciendo los primeros mapas del tiempo (Fig. 43) realizados en Alemania por Heinrich Wilhelm Brandes (1777-1834) a principios de la segunda década del siglo XIX (Milham, 1912, pp. 361-2). Sin embargo, tales mapas se referían a datos pasados pues la lentitud de las comunicaciones impedía reunir las observaciones de diferentes lugares hasta varios días después de producirse, por lo tanto, sin utilidad práctica para predecir la evolución del clima en una región.

El invento del telégrafo en 1843 permitió que dichos centros se organizaran e intercambiaran información a tiempo real (Whitnah, 1961, pp. 10-3), y por tanto la creación de mapas con una mayor posibilidad de predicción:

Una vez realizado el 'retrato' del tiempo actual, la principal tarea de los pronosticadores consistía en hacer un mapa pronóstico que, la mayor parte de las veces, no era más que una estimación personal de lo que podía ser el mapa del tiempo del día siguiente. Para ello los hombres del tiempo seguían unas reglas obtenidas de su propia experiencia y de la de sus predecesores, las cuales les permitían estimar y pronosticar cómo se iba a desarrollar y mover cada estructura atmosférica. Luego, de ese mapa inferían las condiciones previstas del tiempo en los lugares considerados. Todo ese trabajo desembocaba en una predicción que era una simple descripción verbal del tiempo venidero, la mayor parte de las veces no más precisa que 'lluvioso y ventoso' o 'despejado y frío'. (Lezaun, 2003, p. 149)

Esto trajo como consecuencia que fueran apareciendo en muchos países servicios meteorológicos organizados, que difundían información y predicción sobre el tiempo (Bayard, 1899). En España por decreto de Isabel II se creó en 1860 una red de observación coordinada bajo la Junta General de Estadística y más tarde del *Observatorio Astronómico y Meteorológico de Madrid* (García de Pedraza y Giménez de la Cuadra, 1985, pp. 26-7), aunque varios observatorios realizaban medidas regulares desde bastante antes. El *Instituto Nacional de Meteorología* empezó a funcionar de forma efectiva en 1887, con el nombre de *Instituto Central Meteorológico* (García de Pedraza y Giménez de la Cuadra, 1985, p. 35).

En 1853 se inicia la necesaria cooperación internacional entre los servicios nacionales de los distintos países con la convocatoria en Bruselas de la primera *Conferencia Meteorológica Internacional*. En septiembre de 1873 se reunió en Viena el primer *Congreso Meteorológico Internacional* que dio origen al primer organismo de coordinación a escala mundial. El segundo Congreso se celebró en Roma en 1879, estando España entre los dieciséis países representados (Fig. 44) (García de Pedraza y Giménez de la Cuadra, 1985, p. 33).



**Fig. 44** Participantes en el II Congreso Meteorológico Internacional, Roma 1879. El tercero por la izquierda, entre los sentados, es D. Antonio Aguilar y Vela, director del Observatorio Astronómico y Meteorológico de Madrid. De pie justo detrás de Aguilar aparece D. Cecilio Pujazón, director del Real Observatorio de San Fernando

A raíz de estos Congresos Internacionales se vio la necesidad de que las mediciones de los parámetros atmosféricos no se circunscribiesen a la superficie<sup>3</sup>:

Habiéndose impuesto la necesidad de realizar observaciones en la alta atmósfera para complementar las hechas en las estaciones terrestres (insuficientes, por útiles que sean, para descubrir las leyes que presiden la evolución de las perturbaciones atmosféricas, cuyo conocimiento es necesario para que la previsión del tiempo adquiriera una precisión realmente científica), y en vista de los interesantes resultados ya obtenidos en aquella fecha por Hermite y Besancon, mediante los globos sondas por ellos ideados, en el Congreso de París, y por iniciativa común del eminente Mascart (Presidente de la Comisión) y de Yon Berzold (Director del Instituto Meteorológico de Berlín), se tomó, por unanimidad, el acuerdo de constituir una Comisión Internacional de Aerostación Científica, para la exploración y estudio de las altas regiones de la atmósfera, para cuya presidencia fue nombrado el reputado físico y meteorólogo Dr. Hergessell (Director del Observatorio Meteorológico de Estrasburgo). (Rojas, 1919b, p. 64)

Así pues, para el desarrollo de la *aerostación científica*, denominada posteriormente *aerología*, era necesario disponer de unos observatorios destinados a la

<sup>3</sup> Si se quería conocer como variaba con la altura la composición de la atmósfera o la temperatura, así como la termodinámica de la atmósfera o la cantidad de calor que llega del sol hasta la superficie, era necesario tomar datos por encima de la superficie de los observatorios (Nabeker, 1995, p. 47).

observación de las altas capas de la atmósfera<sup>4</sup>, desde donde se elevarían instrumentos por medio de una *plataforma o sonda aérea*. Los globos, las cometas, y posteriormente los aviones, se emplearon con este fin, que no era otro que elevar unos dispositivos, denominados meteorógrafos, diseñados para registrar simultáneamente, en función del tiempo y la altura, los parámetros de presión, temperatura, humedad relativa y la dirección del viento.

Para que la observación fuera la adecuada, la *sonda aérea* empleada debía elevarse de forma continua, es decir, sin sufrir bajadas o subidas bruscas de altitud, ya que si sufrían estas oscilaciones, de los datos registrados era difícil extraer conclusiones fiables sobre la veracidad de los modelos teóricos existentes sobre el comportamiento de la atmósfera (Nabeker, 1995, pp. 49-57). Con dichos datos se trazaban a diversas alturas las denominadas *cartas sinópticas*, necesarias para la predicción del tiempo (McAdie, 1917). Como diría el meteorólogo noruego Vilhelm Bjerknes (1862-1951):

In the hands of these researchers weather maps have developed into a basic immaterial instrument of the physics of the atmosphere, analogous to the material instruments of experimental physics. (Citado en Gramelsberger, 2011, p. 21)

En 1898, Bjerknes presentó su *teorema de la circulación*, que superaba uno de los postulados de la hidrodinámica de fluidos clásica, según el cual la distribución de densidad de un fluido dependía sólo de la presión. Bjerknes consideró que la densidad dependía también de otras variables como la temperatura y la composición del fluido. (Thorpe et al., 2003). El meteorólogo del servicio sueco Nils Ekholm (1848-1923) vio una importante utilidad del teorema de la circulación para estudiar los movimientos tridimensionales de la atmósfera y entender la naturaleza y evolución de las depresiones. Ekholm sugirió la posibilidad de realizar observaciones de la atmósfera superior mediante globos y cometas con el fin de comprobar el modelo de Bjerknes. La *Sociedad de Física* sueca aprobó un proyecto para diseñar y fabricar instrumentos de observación a bordo de globos y cometas ofreciendo a Bjerknes la disponibilidad futura de los datos (Friedman, 1989, pp. 36-8). En 1904, publica en la revista *Meteorologische*

---

<sup>4</sup> Las estaciones aerológicas más importantes fueron y algunas aún son: Lindenberg y Estrasburgo (Alemania), Trappes (Francia), Blue Hill y el Mount Weather (Estados Unidos), Pavia (Italia) y Manchester y Brighton (Inglaterra). Otros centros aerológicos consistían en colocar estaciones en altitud como por ejemplo el observatorio de alemán de Zugspitze (Albiñana, 1914) El Servicio Aerológico Español se crea en 1912 (Anduaga, 2000), por medio de un Real Decreto del Ministerio de Instrucción Pública y Bellas Artes, en el mismo se establece la sección aerológica con carácter permanente en el Observatorio Central Meteorológico y el proyecto de la construcción de un Observatorio en Tenerife (García de Lomas, 1915).

*Zeitschrift* un artículo titulado “Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet von Standpunkt der Mechanik und Physik” (“El problema de la predicción del tiempo desde el punto de vista de la física y la mecánica”). El artículo empieza con las siguientes palabras:

If it is true, as any scientist believes, that subsequent states of the atmosphere develop from preceding ones according to physical laws, one will agree that the necessary and sufficient conditions for a rational solution of the problem of meteorological prediction are the following:

1. One has to know with sufficient accuracy the state of the atmosphere at a given time.
2. One has to know with sufficient accuracy the laws according to which one state of the atmosphere develops from another. (Bjerknes, 1904/2009, p. 663)

Bjerknes define siete variables independientes en un punto y en un instante, que son las tres componentes de la velocidad del viento, la densidad, la presión, la temperatura y la humedad del aire. Estas se relacionan mediante una serie de ecuaciones provenientes de la hidrodinámica y de la termodinámica (Lezaun, 2003, pp.156-60). Por lo tanto, si conocemos los valores actuales de esos parámetros, mediante la observación, y aplicamos las leyes correctas podemos predecir el tiempo atmosférico:

Based upon the observations that have been made, the initial state of the atmosphere is represented by a number of maps that show the distribution of the seven variables from layer to layer in the atmosphere. With these maps as a starting point, new maps of a similar kind should be drawn that represent the new state of the atmosphere from hour to hour. (Bjerknes, 1904, pp. 664-5)

El problema era la integración de dichas ecuaciones que presentaban graves problemas (Lezaun, 2003, p. 151). Bjerknes era optimista al respecto y opinaba que no habría en el futuro dificultades matemáticas irresolubles en el pronóstico del tiempo (Bjerknes, 1904, p. 665). El método que propuso se conoció como pronóstico numérico del clima, y representa uno de los primeros enfoques hacia el modelaje numérico de un sistema dinámico y complejo (Dalmedico, 2001). Gracias al desarrollo de nuevos modelos basados en los mismos principios que Bjerknes, así como de potentes ordenadores, se ha conseguido hoy en día la confección de mapas fiables de los parámetros atmosféricos hora a hora (Nebeker, 1985, pp. 193-4). Así pues, la predicción del tiempo necesitaba saber las condiciones iniciales de la atmosfera en una extensión grande de terreno, que podía abarcar un país entero, por lo que era necesario disponer de una red comunicada de observatorios agrológicos que proporcionaran datos fiables.

El desarrollo de la aviación, a lo largo de las primeras décadas del siglo XX, hizo que la aerología y la predicción del tiempo tuvieran un motivo más para su desarrollo. Así lo pronosticaba el meteorólogo Alexander McAdie:

Thus the making of aerographic surveys is already under way. Perhaps the day is not so far distant when charts of air structure will be available for consecutive tri-hourly periods for the use of aviators and aerial engineers, for the time are rapidly approaching when problems of transportation via air routes must be considered. (McAdie, 1916, p. 273)

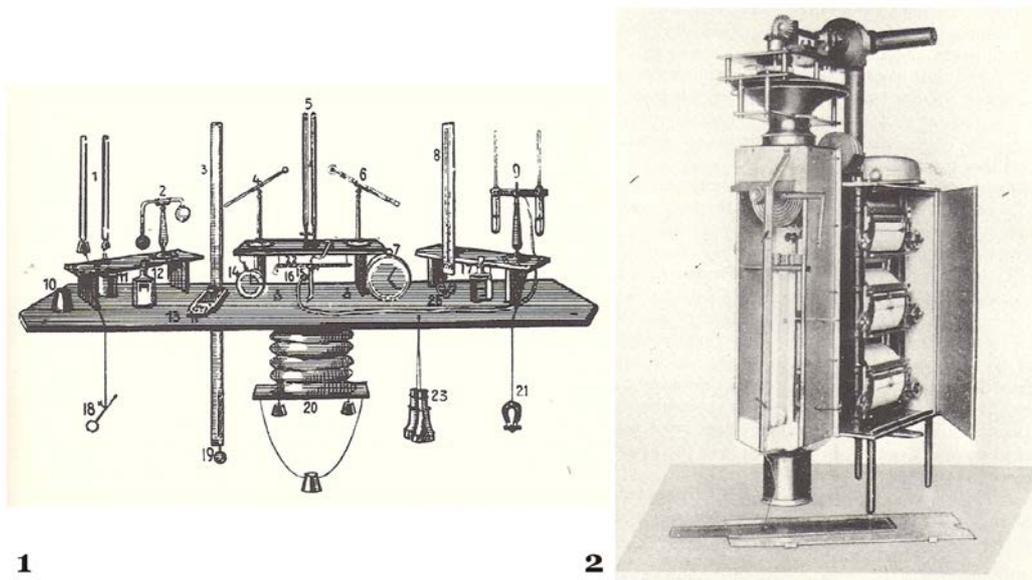
Dado que la aerología permitía conocer la física de la atmosfera, ayudando así a la incipiente navegación aérea, es natural que la aerología se aprovechara de las más avanzadas técnicas aeronáuticas de la época, como veremos en los apartados siguientes.

### **3 PRIMERAS OBSERVACIONES CON GLOBOS Y COMETAS**

Si bien es cierto que la exploración y la toma sistemática de datos de las variables atmosféricas con la altura, no se produjo hasta principios del siglo XX (McAdie, 1917, p. 3), anteriormente se conocía que ciertas propiedades atmosféricas, como la presión y la temperatura, variaban con la altura. El 19 de septiembre de 1648, el filósofo y matemático francés Blaise Pascal, demuestra la dependencia de la presión atmosférica con la altura con ayuda de su cuñado Florin Périer y un barómetro, cuando éste asciende al Puy-de-Dôme (1.463 m), observando una diferencia de altura en la columna de mercurio de 7,5 cm menor en la cima de la montaña con respecto a la medida en la base de esta (Shea, 2003, pp. 109-112). Posteriormente durante el siglo XVIII, los naturalistas suizos Horace Benedicte de Saussure (1740-1799) y Jean-Andrè De Luc (1727-1817), entre otros, realizaron también mediciones con termómetros y barómetros desde lo alto de las montañas (Olivotto, 2007, p. 2).

Con el desarrollo de la aerostación desde finales del siglo XVIII, los globos no sólo se vieron como artefactos para el entretenimiento, sino que se comprobó que podían ser útiles como plataforma para transportar algunos instrumentos y realizar experimentos científicos (Lynn, 2010, pp. 40-43). En el año 1785, el aeronauta francés Jean Pierre Blanchard (1753-1809) realiza un viaje en un globo de gas atravesando el Canal de la Mancha. Le acompaña el físico y cirujano militar norteamericano John Jeffries (1744-1819), que toma distintas medidas con ayuda de termómetros, barómetros e higrómetros (Crewe,1994).

A lo largo del siglo XIX, se producen múltiples ascensiones con globos libres tripulados, pero es característica de las mismas su carácter esporádico<sup>5</sup> y asistemático (Middleton, 1969, p. 288). A pesar de ello, se desarrolló instrumentación específica para ser transportada en los globos, como la del meteorólogo y aeronauta inglés James Glaisher (1809-1903) en 1862 (Fig. 45.1) o el meteorógrafo para globo libre descrito por el meteorólogo alemán Richard Assmann (1845-1918) en 1899 (Fig. 45.2) (Middleton, 1969, pp. 289-91)



**Fig. 45** Instrumentos de Glaisher para ser transportados en un globo tripulado (1). Meteorógrafo de Richard Assmann (2)

No sólo se realizaron mediciones con ayuda de globos. A mediados del siglo XVIII, antes de los experimentos de Franklin, se tiene una referencia del uso de cometas para la observación meteorológica (Hart, 1982, pp. 94-6). En 1749, el astrónomo escocés Alexander Wilson (1714-1786) emplea trenes de cometas<sup>6</sup>, en las que han colocado termómetros a lo largo del hilo con fin de explorar la temperatura de la atmósfera a diferentes alturas (Wilson, 1826). En 1847, el astrónomo inglés William Radcliffe Birt (1804-1881), asistido por Sir Francis Reynolds, emplea pequeñas

<sup>5</sup> En la ponencia presentada en la *International Conference on Aerial Navigation* celebrada en Chicago en 1893, el jefe del *U.S. Weather Bureau*, Mark W. Harrington, opinaba que el sondeo con globos libres era el más fiable, ya que se podía alcanzar una mayor altura, además de ser la única manera de no necesitar registros automáticos, ya que los datos pueden ser tomados directamente por el meteorólogo desde la canasta del globo. Por lo tanto, a pesar de ser el método de sondeo más caro, estaría justificada una inversión anual de 20.000 dólares para realizar sondeos con globos libres tripulados dos veces al día (Anónimo, 1897, p. 314).

<sup>6</sup> Volar una serie de cometas en tren significa que se enganchan a lo largo de un solo hilo (Fig. 46.1).

cometas hexagonales en sus observaciones (Anónimo, 1847). Pero la gran inestabilidad de dichas cometas hace que las mediciones no sean tan precisas como se esperaba. Para solucionar el problema, construyen una gran cometa hexagonal, que vuela por medio de tres hilos, uno atado a una brida de tres ramas y los otros dos en los extremos de las alas. Las tres cuerdas atadas al suelo por medio de tres estacas dan una gran estabilidad a esta *plataforma aérea*, en donde Birt puede elevar y bajar a voluntad los instrumentos meteorológicos:

[...] On the 14<sup>th</sup> of September, 1847, flew a specially constructed kite at the Kew Observatory, in order to test and demonstrate its usefulness in obtaining measures of temperature, humidity, wind velocity, etc. The kite was caused to assume a more fixed position in the air by restraining it by means of three strings secured to the ground at the three corners of a comparatively large equilateral triangle. (Marvin, 1896, p. 3)

En 1883, el meteorólogo británico Edmund Douglas Archibald (1851-1913) emplea un tren de cometas tipo diamante<sup>7</sup> hechas con bambú y seda, usando por primera vez como hilo alambre del tipo “cuerda de piano”. En varios puntos del hilo, cuelga una serie de anemómetros, termómetros, etc. Con este sistema, realiza medidas entre los 60 y 450 m de altura (Archibald, 1884, p. 66).

Pero no será hasta finales del siglo XIX y principios del XX cuando se sistematizan las observaciones, coincidiendo con la fundación de los primeros observatorios aerológicos. A partir prácticamente del año 1903 (Middleton, 1969, p. 288) las técnicas y la instrumentación empleadas en estas observaciones, según la necesidad o fin perseguido, podemos clasificarlas en dos grupos. Si lo que se investigaba era la distribución en altura de la presión, temperatura y humedad relativa de la atmósfera, el método más idóneo era la observación con cometas y globos sonda. Pero si sólo se necesitaba conocer la distribución de la velocidad y dirección del viento en altura, se utilizan los sondeos con globos piloto. Los procedimientos de sondeo de las altas capas de la atmósfera que empleaban estos observatorios dependían de varios factores, como puede ser la topografía, presupuesto<sup>8</sup>, dotación de personal, organización del servicio, tradición científica, etc. (Anduaga, 2000, p. 3). Analizaremos a

---

<sup>7</sup> Véase el apartado 1 “Las formas de las cometas” en la Introducción.

<sup>8</sup> “[L]a aerología era una ciencia cara, debido al material que, además de ser costoso, es en gran parte fungible; a la carestía del transporte; a la sangría económica permanente que significa la pérdida de los aparatos por causa de caídas estrepitosas; y en el caso de los globos sondas, a los descensos en el mar o en parajes inhabitados” (Anduaga, 2000, pp. 3-4).

continuación, por medio de los manuales de la época<sup>9</sup>, el tipo de material y las técnicas que se utilizaban en los sondeos aerológicos con globos y cometas.

#### 4 SONDEOS CON COMETAS

Dejando aparte las primeras cometas empleadas en elevar instrumentos meteorológicos, que hemos visto en el apartado anterior, las modelos que con más frecuencia se emplearon en las estaciones aerológicas fueron las cometas diseñadas por americano William A. Eddy (1850-1909), y sobre todo variaciones de la cometa celular desarrollada en 1893, por el ingeniero inglés afincado en Australia, Lawrence Hargrave (1850-1915) (Hargrave, 1896).

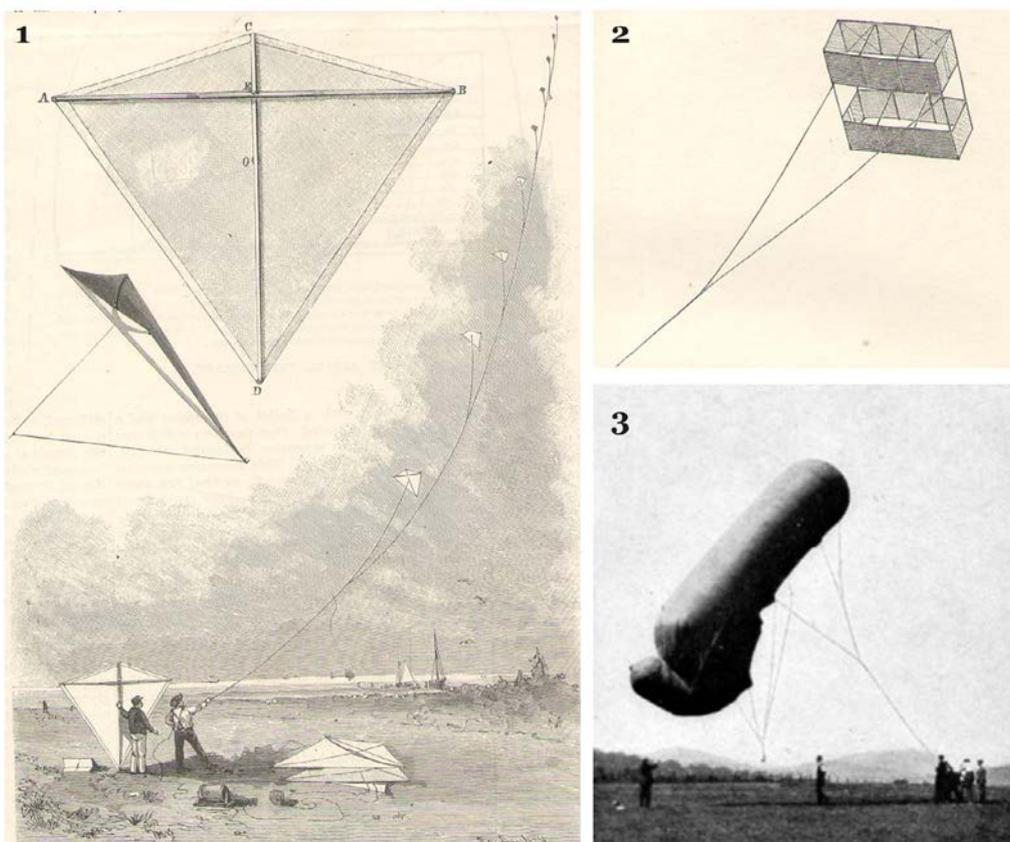
William A. Eddy era un periodista de Bayonne (Nueva Jersey), que desde muy joven se interesó por las cometas, empleándolas en fotografía aérea (Eddy, 1897). Para ello, emplea trenes de cometas, porque necesita una rápida elevación a grandes alturas. Sus primeros experimentos llevados a cabo con cometas planas hexagonales le llevan a conseguir remontar un tren de dieciséis cometas de este tipo, pero ve que las colas necesarias para estabilizar las cometas planas son el principal estorbo para izar trenes de cometas a alturas considerables, por sus continuos enredos. A pesar de todo, el 9 de Mayo de 1891 llega a elevar un tren de cinco de estas cometas, entre los 1.200 y 1.800 m. de altura (Hart, 1982, p. 133). Eddy se dedica a investigar un método que le permita la estabilización de una cometa sin cola. Esto se le ocurre a raíz de una visita a la Exposición Universal de Chicago de 1893, en la que se expone un tipo de cometa que no posee cola, procedente de la Isla de Java (Eddy, 1894). Su estabilización se consigue mediante la formación de un ángulo diedro, arqueando el travesaño horizontal de la estructura de la cometa (Fig. 4.2). Investigando esta vía, construye la conocida hoy por *cometa Eddy*<sup>10</sup>, que no fue patentada hasta el año 1900 (Fig. 4.1). En Agosto del año 1894 ofrece estas cometas para su uso en meteorología al Observatorio de Blue Hill<sup>11</sup>, elevando un tren de sus cometas (Fig. 46.1), con una carga útil de un kilo, a una altura de 426 m. (Rotch, 1900, p. 129). En los años siguientes, en varias ocasiones, se emplean trenes de *Eddys* para elevar instrumentos. Un tren de diez de ellas alcanzó los 7.127 m de altura, el 5 de Mayo de 1910 (Hart, 1982, p. 111).

---

<sup>9</sup> Entre otros: Marvin, 1898; Rotch, 1900; Rojas, 1919a; Lorente, 1927a; Lorente, 1927b; Lorente, 1928; Kleinschmidt, 1935; Pita y Lorente, 1942.

<sup>10</sup> Véase el apartado 2 “Cometas de un solo hilo” en la Introducción.

<sup>11</sup> El Observatorio de Blue Hill, fue fundado por Abbott Lawrence Rotch (1861-1912) en 1885, pasando a su muerte a la Universidad de Harvard (Rotch, 1900).



**Fig. 46** Tren de cometas de Eddy en el observatorio de *Blue Hill* (Estados Unidos), grabado del *Scientific American* de 15 de septiembre de 1894 (1). Grabado de una cometa celular de Hargrave (2). Globo cometa (3)

En 1896 se empiezan a realizar sondeos regulares con cometas celulares de tipo Hargrave (Fig. 46.2), que describiremos en el apartado siguiente, alcanzando un fuerte desarrollo como método de observación (Blair, 1909). En 1898, el *U.S. Weather Bureau*, el servicio meteorológico nacional norteamericano dispone de diecisiete estaciones aerológicas donde se realizan sondeos con cometas y globos (Whitnah, 1961, p. 101). Estas estaciones continuaron incrementándose hasta que, en la década de los años treinta del siglo XX, se dio por finalizado la observación por este sistema en Estados Unidos (Whitnah, 1961, p. 189). En Francia, Inglaterra (Dines & Shaw, 1909), Alemania y en otros países, a finales del siglo XIX y principios del XX, empiezan a usarse también las cometas en sondeos aerológicos. Hay que destacar sobre todo el

trabajo realizado en el Observatorio de Trappes<sup>12</sup> en Francia y en los observatorios alemanes de Lindenberg, Friedrichshafen y Gross Börstel (Assmann, 1915).

La observación con cometas presentaba importantes ventajas. En primer lugar, suponía una economía de gastos de instalación y experimentación, seguridad en la altura a que se verifican las observaciones y perfecta ventilación de los instrumentos empleados. En cuanto a los inconvenientes del sistema, el primero es obvio, el día de la observación debía haber un viento mínimo para que la cometa pueda volar, por lo que el observatorio debía de disponer de globos-cometas cautivos (Fig. 46.3) para los días de calma (Rojas, 1919a, pp. 7-8) –estos últimos, también se empleaban en Alemania en sondeos realizados desde barcos (Junco, 1915). Más graves son los inconvenientes que señala el meteorólogo español José Galbis Rodríguez (1868-1952), a pesar de reconocer el buen resultado obtenido con sondeos con cometas<sup>13</sup>:

[...] A veces se rompe el hilo, quedando libre la cometa, que puede alejarse del Observatorio, recorriendo grandes extensiones con el hilo colgando y arrastrando con peligro de enredarse en árboles ó sembrados, ocasionar desperfectos y, lo que es peor, pudiendo montar sobre alguna línea eléctrica de alta tensión y producir la muerte á hombres y animales. Esta última dificultad, que obliga siempre situar los Observatorios en parajes aislados de poblado, fue la causa del traslado del Observatorio aerológico de Tegel (cerca de Berlín) a Lindenberg [...] La Estación de cometas de Gross Borstel también ha tenido que disminuir notablemente el número de observaciones, porque pocos años después de instalada, se ha construido cerca un tranvía eléctrico. (Galbis, 1915. pp. 28-9)

La cometa tenía otra limitación de orden práctico: los sondeos tenían un techo. Lo normal es que se alcanzaran con trenes de dos cometas alturas comprendidas entre los 3.000 y 4.000 m. Por lo que si se quería llegar a alturas superiores, tenía que complementarse la observación con el lanzamiento de globos sonda (Blair, 1909, p. 12).

El uso de cometas en aerología declinó rápidamente en los años treinta del siglo XX, gracias al desarrollo de los sondeos mediante aviones y las primeras radiosondas lanzadas mediante globos libres<sup>14</sup>. A pesar de que las cometas tenían un menor coste por kilómetro de elevación que los aviones y los globos sondas (Tabla 2), hubo otros factores determinantes en el abandono de la cometa como método de sondeo: la mayor

---

<sup>12</sup> Este observatorio fue fundado en el año 1896 por el meteorólogo francés Teisserenc de Bort (1855-1913) descubridor de la estratosfera en 1902, gracias a los sondeos realizados con globos (Da Cunha, 1901; Teisserenc, 1898).

<sup>13</sup> Ingeniero geógrafo y militar de carrera español, desde el 27 de abril de 1910, fue nombrado director del Instituto Central Meteorológico, que menos de un año después cambió su nombre a Observatorio Central Meteorológico, dirigió la institución hasta abril de 1921 (García de Pedraza y Giménez de la Cuadra, 1985, pp. 51 y 58 ).

<sup>14</sup> Los sondeos con aviones se iniciaron en 1912 en Frankfort sobre el Maine y la primera radiosonda fue lanzada en 1928 por el meteorólogo ruso Moltchanoff (Griffiths, 1977).

altitud que podían alcanzar aquellos, así como la posibilidad de realizar los sondeos en ausencia de viento, además de “los peligros que para la aviación representan los cables de sostén y para los centros poblados, la posible rotura de los mismos” (Corleto, 1942, p. 6)<sup>15</sup>.

**Tabla 2**

Sistema de sondeo	Costes Adquisición (RM*)	Costes de mantenimiento (RM)	Costes diarios (RM)		Costes diarios totales (RM)		Altura media (m)	Tiempo medio de ascenso en horas	Coste por kilómetro de ascenso (RM)
			Un ascenso	Tres ascensos	Un ascenso	Tres ascensos			
Cometas	10.000	1.000	1	3	4	2	3.000	3	1,3
Aviones	20.000	2.000	10	30	16	12	5.000	1	3,1
Globo cautivo	8.000	1.000	5	15	8	7	2.500	2	3,2
Globo sonda	-	-	50	150	50	50	15.000	2	3,3

(\*)RM es la abreviatura del *Reichsmark* que fue la moneda oficial utilizada en Alemania desde 1924 hasta 1948

Calculo de costes por kilómetro de ascenso de cada sistema de sondeo en 1935 (Kleinschmidt, 1935, p. 474)

Pasaremos a continuación a describir los distintos elementos que componían el sondeo: la cometa de Hargrave y el procedimiento de sondeo.

#### 4.1 COMETAS METEOROLÓGICAS TIPO HARGRAVE

A finales del siglo XIX las cometas había experimentado un importante desarrollo tecnológico debido a los estudios de la aerodinámica de las maquinas voladoras más pesadas que el aire<sup>16</sup>. En 1893, Lawrence Hargrave, un ingeniero inglés afincado en Australia, había diseñado una nueva forma de cometa, construida sobre dos celdas rectangulares. Por ello la denomina *cometa celular (Cellular Kite)*, también conocida como cometa de caja (*box kite*)<sup>17</sup>. Hargrave nunca patentó sus descubrimientos (Hart, 1982, p. 137), y esto supuso que otros pudieran hacer modificaciones sobre sus diseños, como ocurrió con las cometas empleadas en los sondeos.

En el número de abril de 1895 de la revista *American Engineer*, aparece una descripción de la cometa de Hargrave. Basándose en este artículo, Samuel A. Potter, del *US Weather Bureau*, construye en octubre de ese mismo año una cometa de este tipo (Fig. 47.1) (Marvin, 1895). En 1896, el meteorólogo americano Charles Frederick Marvin realiza un extenso estudio de la mecánica del vuelo de las cometas (Marvin,

<sup>15</sup> Hoy en día las cometas se han empleado en ciertos estudios de la atmosfera a baja altura, es decir por debajo de los 3.000 m. Las cometas empleadas son del tipo *parafoil* (véase el apartado 5 “Cometas de un solo hilo” en la Introducción), que se desarrollaron en los años sesenta del siglo XX (Balsley et al., 1998).

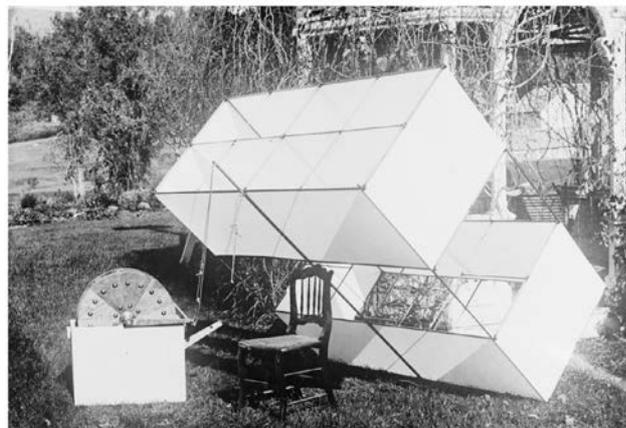
<sup>16</sup> Como veremos en el capítulo 5, la cometa se utilizó como instrumento de ensayo en el desarrollo del aeroplano.

<sup>17</sup> Véase el apartado 3 “Cometas de un solo hilo” en la Introducción.

1897), con el fin de analizar la eficacia de las cometas empleadas, para que alcancen la mayor altura posible, reconociendo: “the gathering of numerical data derived from actual observation made by sound and accurate scientific methods is a matter of considerable labor and difficulty” (Marvin, 1897, p. 63). Estos estudios teóricos, sumados a la experiencia durante los lanzamientos, llevaron al desarrollo de la cometa meteorológica empleada en las estaciones aerológicas de Estados Unidos a principios del siglo XX, la denominada *cometa de Marvin-Hargrave* (Fig. 47.2). Era una modificación de la cometa de Hargrave, a la que se había reforzado la estructura para soportar fuertes vientos (Henry, 1910).



1



2



3

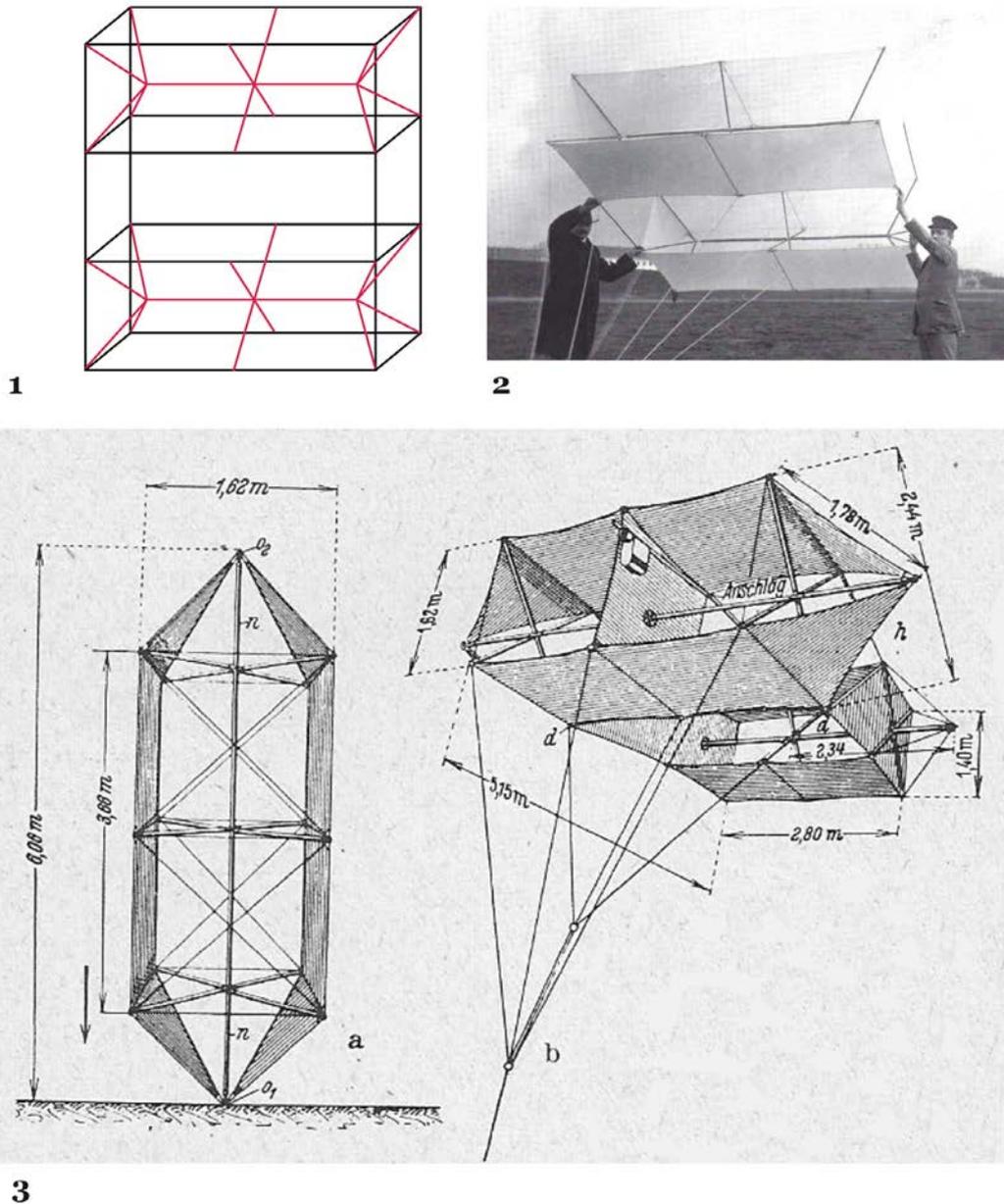


4

**Fig. 47** Cometa de Potter (1). Cometa meteorológica de *Marvin-Hargrave* empleada en el *U.S. Weather Bureau* (2). El meteorólogo inglés W. H. Dines y su modelo de cometa de Hargrave (3) Lanzamiento de una cometa de Dines desde un barco (1910) (4)

En otros países también se construyeron cometas meteorológicas con las mismas características. Así, en 1910, el meteorólogo inglés William Henry Dines (1855-1927) propone emplear cometas de tipo Hargrave en sondeos (Fig. 47.3-4). Pero sería en el

observatorio alemán de Lindenberg (Kleinschmidt, 1935, pp. 480-5) donde se desarrollarían diversas variantes de la cometa de Hargrave, como la conocida como *cometa de paraguas inglés* (en alemán *Schirmkastendrachen*) por el tipo de tensor empleado en las celdas (Fig. 48.1-2); o la denominada *GRUNDScher Drachen* (Fig. 48.3)



**Fig. 48** Estructura (1) de la *Schirmkastendrachen* (cometa paraguas inglés) (2). Detalles constructivos de la denominada *GRUNDScher Drachen* usada en Alemania, durante la segunda década del siglo XX (3)

Así, las cometas meteorológicas habían alcanzado un importante desarrollo tecnológico en los talleres de los observatorios aerológicos a principios del siglo XX<sup>18</sup>. Estas máquinas voladoras, modificaciones de la desarrollada por Hargrave, ya no tenían nada que ver con las cometas con las que jugaban los niños en esta época, sino que, como veremos en el capítulo siguiente, el germen de la aparición del aeroplano en la primeras décadas del siglo XX.

#### 4.2 PROCEDIMIENTO DEL SONDEO CON COMETAS

El fin del sondeo de la atmósfera con ayuda de cometas era elevar, de manera segura, un aparato registrador o meteorógrafo lo más alto posible. Para conseguir esto se empleaba un tren de varias cometas, donde la primera de ellas, denominada *piloto* o *principal*, llevaba el aparato de medida y el resto, denominadas auxiliares o secundarias, eran las encargadas de aliviar el peso del cable de sujeción, que se enrolla y desenrolla con ayuda de un torno<sup>19</sup> (Fig. 49.1) protegido dentro de una caseta (Fig. 49.3). Junto a la cometa principal, se coloca otra denominada cometa de seguridad (Fig. 49.2):

Cuando por medio de cometas se trata de elevar un aparato registrador a grandes alturas (se han rebasado los 7000 metros en algunas ocasiones, empleando más de 15 kilómetros de cable) el procedimiento general seguido en todos los observatorios es, con ligeras variantes el mismo, pudiendo presentar como modelo el de la exploración aérea realizada el 26 de julio de 1900 en el observatorio meteorológico de Tegel (Berlín), representado en el esquema en la figura [Fig. 49.4]. La altura alcanzada por el meteorógrafo fue de 4.300 metros, la distancia horizontal entre el torno y la vertical del aparato registrador de 6.000 metros y la longitud de cable desarrollado 7.325 metros.

Se emplearon en la ascensión la cometa piloto y la de seguridad, ambas de 4 metros cuadrados de superficie sustentadora, y tres cometas auxiliares (para aliviar a las primeras el peso de la línea), cuyas superficies sustentadoras fueron de 2, 2,7 y 2,8 metros cuadrados. La línea general se componía de los trozos de cable de alambre de acero de la longitud y diámetro que la figura indica, provistos en sus extremos de anillos de acero estampado y mosquetones para su enlace mutuo, anillos a los que a su vez se sujetan por mosquetones, llaveros o ganchos especiales los extremos inferiores de los cortos cables de retención de las cometas auxiliares, destinadas a ir soportando el peso de la línea para que el aparato registrador alcance la altura de exploración deseada. (Rojas, 1919a, p. 86)

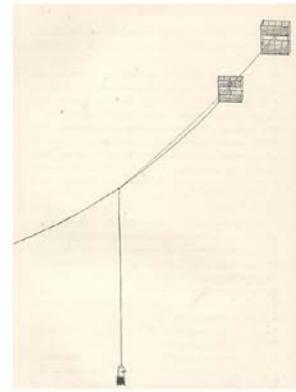
---

<sup>18</sup> En la edición de 1921 de las *Instructions for aerological observers* (Marvin, 1898) del *U.S. Weather Bureau*, manual de formación para el personal de los observatorios aerológicos, detalla, con planos y lista de materiales, como proceder a la construcción de una *cometa de Marvin-Hargrave*.

<sup>19</sup> Existían una gran variedad de modelos de tornos. En un principio se movían a brazo por uno o dos hombres, éstos evolucionaron posteriormente a modelos movidos mediante un motor eléctrico, de explosión o de vapor. El torno se protegía de las inclemencias del tiempo, instalándolo dentro de una caseta o garita giratoria (Marvin, 1898, pp. 7-8), como la salida del cable dependía de la dirección del viento, esta se orientaba en la dirección precisa (Fig. 49.3).



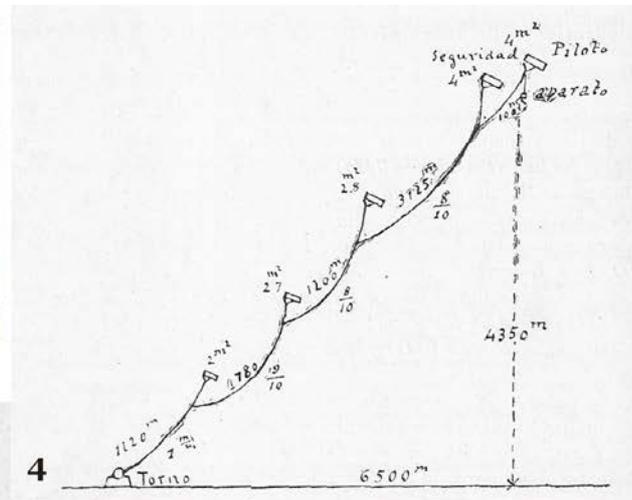
1



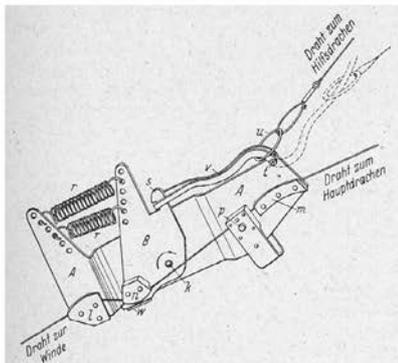
2



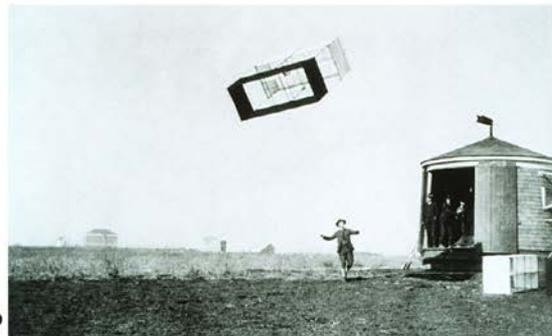
3



4



5



6

**Fig. 49** Evolución de los tornos usados en Blue Hill (Estados Unidos) a finales del XIX (1). Cometa principal y de seguridad transportando el meteorógrafo en un sondeo s finales del siglo XIX (2). Caseta del torno en el Observatorio de Lindenberg (Alemania) (3). Organización de la línea aérea, según la obra de Francisco de Paula y Rojas *Aplicación de las cometas a la Meteorología* (1919) (4). Sistema de sujeción de la cometa auxiliar (Kleinschmidt, 1935, p. 490) (5). Lanzamiento de una cometa meteorológica en 1899 (6)

Las cometas secundarias disponían de un sistema de sujeción a la línea (Fig. 49.5), con el fin de evitar que rompiera el hilo por una imprevista racha de viento:

El alambre de la cometa principal se le hace pasar por la polea P y se le sujeta a presión entre las caras internas de la polea. Si una racha de viento diese un tirón de la cometa secundaria, esta vencería la acción del muelle del aparatito y el gancho G se soltaría y se desprendería la cometa secundaria, sin romper el alambre de la cometa principal, que es lo peligroso. (Lorente, 1927b, p. 173)

La cometa de seguridad se unía como las otras cometas secundarias a la línea principal. Pero en este caso la carga de factura del cable de la cometa de seguridad es muy inferior. La misión encomendada a esta cometa era doble:

[...] primero, proporcionar refuerzo a la acción de la cometa piloto para que el cable se eleve formando gran ángulo con la horizontal; y segundo, en caso de peligro por aumentar mucho la intensidad del viento repentinamente, que se rompa su cable de retención, cesando el refuerzo que esta cometa proporcionaba y evitando la rotura de la línea general en cualquier punto débil, por disminuir todas las tracciones en la parte que correspondía al esfuerzo de esta cometa, dando así tiempo a recoger el material. (Rojas, 1919a, pp. 88)

Dada la complejidad del sistema de observación, era fundamental la existencia de *maestros cometeros*, es decir, personal dedicado a la tarea de elevar las cometas en los observatorios con una función distinta de la de los meteorólogos encargados de analizar los resultados:

[...] como el personal científico que antes dirigía los lanzamientos se renovaba a veces con frecuencia, se acudió al sistema de nombrar a dos maestros cometeros que, buenos mecánicos, realizan estos lanzamientos tres veces al día, y con éxito rotundo desde hace varios años, dejando así libre el tiempo al personal científico para dedicarse a las investigaciones. (Lorente, 1928, p. 16)

Durante los lanzamientos (Fig. 49.6) se debía procurar que no se produjera la rotura del cable principal de la cometa. El control se llevaba a cabo con ayuda de un dinamómetro, que se colocaba en el torno y controlaba la tensión que soportaba el mismo. La experiencia había demostrado que la rotura se producía, en la mayoría de los casos, cuando la cometa pasaba repentinamente de una capa de aire a otra de diferente velocidad. Por lo tanto, durante el ascenso era fundamental seguir la marcha de las variaciones de velocidad de las capas de aire. En los observatorios se realizaban tablas (Kleinschmidt, 1935, pp. 508-9) que, en función del tamaño y forma de la cometa, relacionaban la velocidad del viento con la tracción que experimentaba el cable de sujeción, leído en el dinamómetro del torno de maniobra. Así pues, observando que velocidad existente en la capa de aire que estaba atravesando la cometa, se aflojaba o soltaba el freno del tambor existente en el torno, para soltar o largar cable, en esta maniobra la experiencia de los *maestros cometeros* era esencial.

## 5 SONDEOS CON COMETAS EN ESPAÑA

En 1915, el por entonces director del *Instituto Central Meteorológico*, José Galbis Rodríguez, indicaba las dificultades que entrañaba realizar sondeos con cometas en el observatorio central de Madrid, que había iniciado su actividad en 1913:

En España no existe ningún Observatorio que pueda hacer este género de observaciones. El Observatorio central Meteorológico, al crear hace dos años la sección aerológica, pensó en situarla en alguna zona que permitiera el lanzamiento de cometas, pero razones económicas impedían crear un centro especial con material y personal suficiente para asegurar el trabajo continuo en algún paraje absolutamente aislado de poblado y de zona cultivable y cerca del Observatorio Central. Tampoco se encontró medio de solucionar este asunto. Si el procedimiento iniciado en Lindenberg, de servirse de un automóvil, da resultado, tal vez podamos nosotros emplearlo, si el Gobierno nos da los elementos necesarios; pero además de los inconvenientes antes citados, en el centro, de España, siempre habrá la dificultad de ser pocos los días en que la fuerza del viento permita la elevación de cometas. (Galbis, 1915, p. 29)



**Fig. 50** Red aerológica de España en 1946. Incluido en la publicación de la serie C (instrucciones), número 19, de la Oficina Central del Servicio Meteorológico Nacional, titulada *El Servicio Meteorológico Nacional de España (Antecedentes y Organización)*. “...Tan pronto como puedan ser vencidas las presentes dificultades, pueden funcionar normalmente todos los observatorios aerológicos que figuran en el mapa número 1. Los sondeos aerológicos, tanto en avión como por medio de radiosonda, serán efectuados con regularidad, y para completar los datos de ellos se contará con las observaciones de los Observatorios de montaña, cuya construcción está en ejecución, además de los que en el mismo mapa se marcan como proyectados, pero cuya instalación no ha de tardar.” (p.25)

Todo ello, unido a las dificultades de suministro de materiales e instrumentos a consecuencia de la I Guerra Mundial (García de Pedraza y Giménez de la Cuadra, 1985, p. 61), supuso que en este observatorio sólo se realizaran sondeos con globos durante la

segunda década del siglo XX (Anduaga, 2000, pp. 6 y 12). También sucedió así en el de Barcelona, fundado en 1914. En los años siguientes, se consolida las observaciones aerológicas con globos en los observatorios repartidos por el territorio español (Anduaga, 2000, pp. 17-8). Después de la Guerra Civil Española, la red aerológica existente en la España se puede ver en un mapa, publicado en el año 1946, por el *Servicio Meteorológico Nacional* (Fig. 50). Entre los observatorios existentes y en proyecto, podemos ver que existe un único observatorio desde donde se realizaban sondeos con cometas: el observatorio de Izaña (Tenerife). Desde su inauguración, en 1916, se venían haciendo observaciones con globos en este observatorio (Anduaga, 2000, p. 11), pero los sondeos con cometas se iniciaron a principios de los años cuarenta.

La idea de construir un observatorio en las laderas del Teide (Tenerife) parte del meteorólogo francés Teisserenc de Bort en 1909, durante una conferencia de la *Comisión de Aerostación Científica* celebrada en Milán (Galbis, 1915). Pero son los alemanes quienes se hacen eco del proyecto y solicitan permiso a través de la Embajada de España al Gobierno español. El proyecto es informado favorablemente por el entonces coronel de Ingenieros Pedro Vives Vich (1858-1938) del *Servicio de Aerostación Militar del Ejército Español*, que también estuvo en dicha conferencia. Los alemanes desembarcan con unas casetas prefabricadas en marzo de 1909, situándose en la Cañada de la Grieta a 2.100 m de altitud, empezando las observaciones. Para buscar la ubicación correcta del futuro observatorio se delega al capitán del arma de ingenieros del ejército español Antonio Gordejuela y Causilla (1882-1912), que se encarga de "colocar" las casetas de la comisión alemana y redacta un informe que constituye el proyecto provisional para la instalación del observatorio definitivo. Una comisión compuesta por el ingeniero geógrafo Eduardo Mier y Miura (1858-1917), el coronel Pedro Vives y el teniente de navío Roberto López Barril, examinan el proyecto y lo dan por válido, pero en noviembre de 1909 el capitán Gordejuela se tiene que ir a la campaña de África, en la cual fallece (Vives, 1912).

En 1911 se nombra una comisión compuesta por el ingeniero geógrafo Rafael Álvarez Sereix (1855-1946), el arquitecto Jerónimo Pedro Mathet Rodríguez (1875-1925) y el mismo José Galbis. Visitan Tenerife entre octubre y noviembre de 1911 y redactan una *Memoria y Proyecto definitivos de construcción y organización del Observatorio de Tenerife en Izaña*. En una conferencia pronunciada por Galbis, en 1913, durante el Congreso de Madrid de la *Asociación Española para el Progreso de*

*las Ciencias* (Galbis, 1915), se refiere a la ladera sur del Teide como posible ubicación del Observatorio, pero encuentra que en esa ladera hay fuertes remolinos que hacen:

[...] imposible cambiar las hojas de los aparatos registradores, que un papel lanzado al aire sube con el remolino a gran altura: estos remolinos, que desde luego falsean el estudio de las corrientes generales, dificultan y hasta impiden la elevación de cometas. [...] En los ensayos que allí hizo el capitán Gordejuela con unas cometas pequeñas, no le fue posible elevarlas, pues tomaban movimiento giratorio. (Galbis, 1915, pp. 40-1)

Por lo tanto, en el estudio de ubicación del Observatorio del Teide se tienen en cuenta las observaciones que se debían llevar a cabo, y entre ellas el lanzamiento de cometas y globos cautivos, cosa que repite a lo largo de la exposición. En 1912 por un Real decreto se crea el Observatorio Meteorológico de Tenerife y en 1913 se empieza a construir el definitivo Observatorio de Izaña, a 2.367 metros, inaugurándose el 1 de enero de 1916, bajo la dirección del ingeniero geógrafo Juan García de Lomas (Ory, 1995, 255).

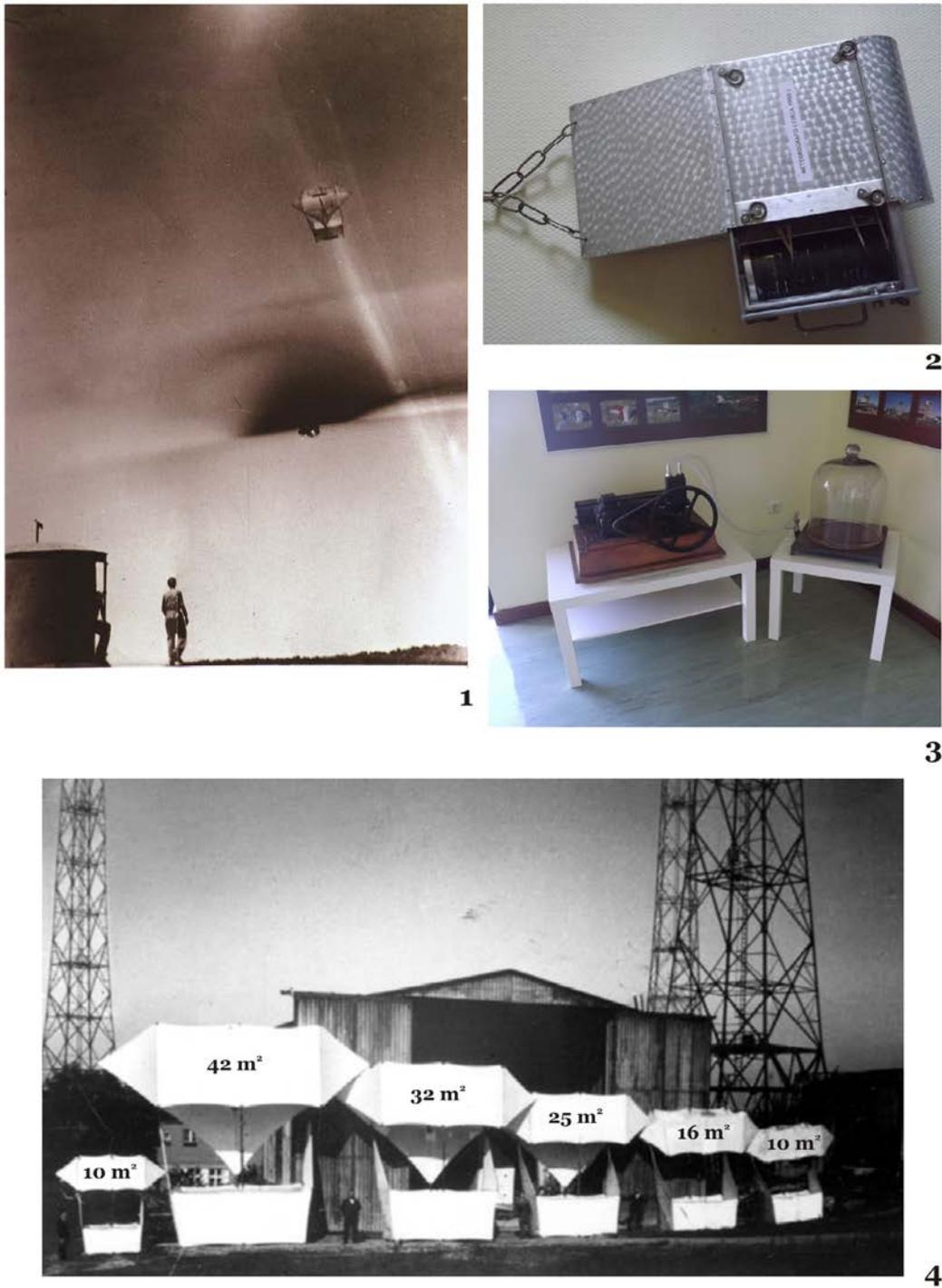
En 1941 es nombrado director el meteorólogo y climatólogo Inocencio Font Tullot (1914-2003), cargo que desempeñó hasta 1951 (Ory, 2007, p. 106). En mayo de 1942, Font es enviado unos meses a realizar un curso de aerología en el observatorio alemán de Lindenberg, fruto de un convenio con el servicio meteorológico de la Alemania nazi<sup>20</sup>. Entre otras técnicas, Font practica los sondeos con cometas y el gobierno alemán envía a Izaña cierto número de cometas y diverso material para realizar sondeos (Ory, 2007, p. 108). En esa época, como ya se ha comentado, este tipo de sondeo ya estaba en decadencia en los países de Europa y Estados Unidos, pero la falta de material aerológico en estos tiempos de la posguerra española, hizo que se diera un buen uso de ellas<sup>21</sup>.

Las observaciones con estas cometas se prolongaron en Izaña de manera más o menos irregular (Ory, 2007, pp. 112 y 116) hasta los años sesenta del siglo XX (Fig. 51.1), donde los sondeos aerológicos pasaron al observatorio del aeropuerto de los Rodeos (Tenerife), pero solo con globos libres con radiosondas (Ory, 1995, p. 257).

---

<sup>20</sup> “En tiempos de la Segunda Guerra Mundial se estableció una importante relación con la avanzada meteorología alemana. Algunos meteorólogos alemanes habían venido ya a España durante la Guerra Civil, acompañando a la Legión Cóndor [...] Por esta razón fue frecuente que varios meteorólogos españoles acudieron a Alemania para estudiar nuevos métodos y técnicas como el radiosondeo.” (Ory, 2007, p. 107).

<sup>21</sup> El 24 de marzo de 1942, el comandante del puesto de la Guardia Civil de Guimar (Tenerife), informa a Inocencio Font de los registros y gestiones realizadas en relación al “hurto cometido de la tela de las cometas perteneciente a ese observatorio” (Ory, 2007, p. 107), en el que resultaban sospechosas una serie de individuos. Este documento denota la crudeza de la época, donde la calidad y resistencia de la tela de unas cometas era suficiente para codiciar su robo para confeccionar género textil.



**Fig. 51** Sondeo termodinámico en Izaña con cometa a mitad del siglo XX (1). Meteorógrafo Gebrüder-Winter (nº 932) empleado en los sondeos (2). Bomba de vacío para calibrar los meteorógrafo (3) *GRUNDScher Drachen* empleadas en el Observatorio de Lindenberg. En Izaña según el inventario de 1958 poseía una cometa de 42 m<sup>2</sup>, dos de 16 m<sup>2</sup> y una de 25 m<sup>2</sup> (4)

En un inventario, que se conserva en el archivo del *Centro de Investigación Atmosférica de Izaña*, fechado el 2 de mayo de 1958 y firmado por Pedro Rodríguez, ayudante jefe accidental del observatorio, encontramos la siguiente relación de material:

Un torno de cometas Werk nº 371798 en buen estado [...] Un remolque de Cometas O. Lindenberg nº 105 en buen estado [...] Una cometa de 42 m<sup>2</sup> muy vieja y deteriorada alemana. Dos cometas de 16 m<sup>2</sup> viejas alemanas. Una cometa de 25 m<sup>2</sup> vieja alemana. Tres cometas de 25 m<sup>2</sup> nuevas españolas, desarmadas. Siete cometas de 25 m<sup>2</sup> nuevas españolas, desmontadas.

También se relacionan una serie de meteorógrafos en diverso estado de conservación. Como se puede apreciar, a finales de los años cincuenta, las cometas alemanas ya estaban muy deterioradas, por lo que se habían construido nuevas (Ory, 2007, p. 116). Lamentablemente las distintas remodelaciones realizadas en este observatorio han hecho que tan solo se conserven los aparatos registradores usados en estos sondeos (Fig. 51.2), algunos instrumentos de calibración (Fig. 51.3) no conservándose ningún resto de las cometas empleadas<sup>22</sup> (Fig. 51.4).

## 6 SONDEOS CON GLOBOS

Dejando aparte los sondeos con globos libres o cautivos tripulados, que utilizaban de manera excepcional en la investigación aerológica, los métodos más usados eran los globos sonda y los pilotos.

### 6.1 GLOBOS SONDA

El meteorólogo español, José Galbis describe este sondeo de la siguiente manera:

Un globo de caucho herméticamente cerrado, lleno de hidrógeno y con fuerza ascensional suficiente para elevar el meteorógrafo y otros accesorios (globo motor), va ascendiendo con velocidad vertical casi constante (según se desprende de los experimentos de Hergesell); conforme alcanza mayor altura en la atmósfera va, naturalmente, aumentando su volumen merced a la tensión interior y la disminución de la presión exterior; al llegar al límite de elasticidad de la goma, estalla, empezando en aquel momento el descenso, ocasionando por el peso y entra entonces en funciones el regulador de la caída, que unas veces es otro globo, otras un paracaídas, otras las dos cosas a la vez. (Galbis, 1915, pp. 14-5)

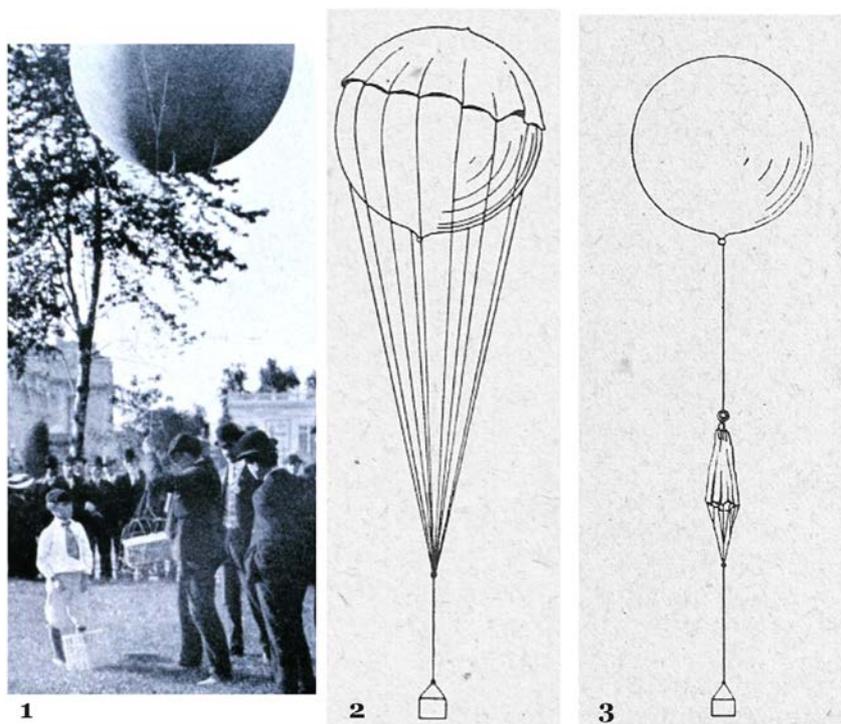
La ventaja sobre las cometas eran las alturas que podían alcanzar, superando los 20.000 m. de altura, y esta es la razón del por qué este sistema de sondeo ha perdurado hasta la actualidad, sobre todo con el desarrollo de las radiosondas (Middleton, 1969,

---

<sup>22</sup> Así lo confirma el actual director del *Centro de Investigación Atmosférica de Izaña*, Dr. Emilio Cuevas, en un correo electrónico de fecha 19 de septiembre de 2012.

pp. 328-46). El inconveniente que se presentaba a principios del siglo XX era que el meteorógrafo, tras su caída, debía buscarse posteriormente, por lo que a veces se tardaban días en recoger los registros. Por esa razón, al contrario que con las cometas, no se empleaba de manera sistemática, se optaba por lanzar los globos sondas sólo en días señalados<sup>23</sup>.

En cuanto a los métodos de lanzamiento, el más empleado en la segunda década del siglo XX es el de dos globos en *tándem* (método Hergessell); anteriormente se habían empleado sistemas con un solo globo y un paracaídas (método de Assmann) (Fig. 52.2-3) (Kleinschmidt, 1935, pp. 441-2).



**Fig. 52** Lanzamiento de un globo sonda (1904) (1) Métodos de colocar el paracaídas en un globo sonda según Assmann (2) (3)

## 6.2 GLOBOS PILOTO

De entre todos estos métodos, el sondeo con globos piloto era el método más simple de exploración de la atmósfera, destinado tan sólo a conocer la dirección y la velocidad del viento a diferentes alturas. Se emplea varias veces al día en las estaciones aerológicas de todo el mundo a finales del siglo XIX y principios del XX. Lanzar un

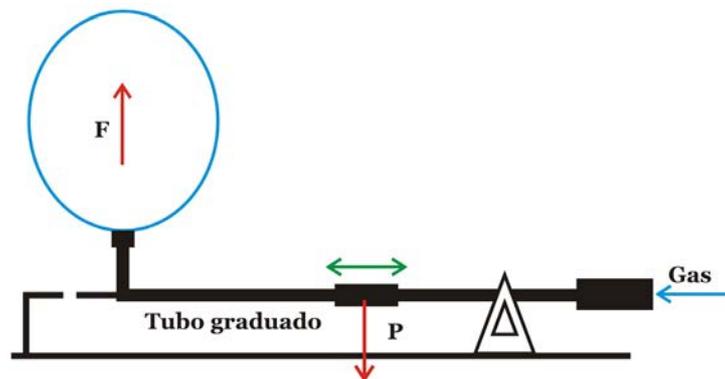
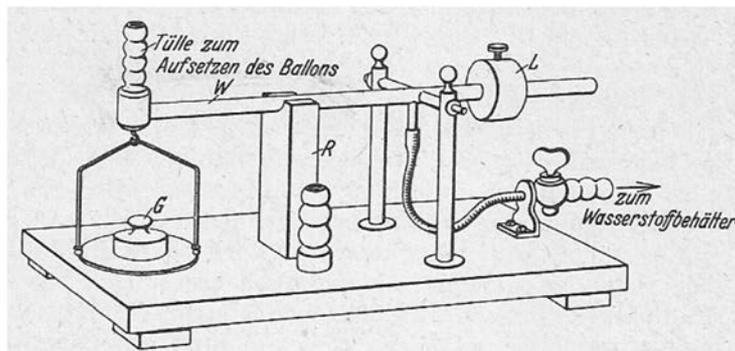
---

<sup>23</sup> La *Comisión Internacional para la aerostación científica*, fundada en Estrasburgo en 1898, fijó en su primer congreso de París en 1900, que se efectuaran exploraciones simultáneas de la atmósfera, el primer jueves de cada mes en varios países, empleando todos los métodos de sondeo aerológicos conocidos (Herrera, 1911).

globo pequeño era una maniobra frecuente entre los pilotos de globos libres, antes de realizar una ascensión, ya que les permitía conocer la dirección que tomaría el globo nada más despegar (Middleton, 1969, p. 276).

Los primeros globos piloto eran de papel, hasta que en 1903 el meteorólogo alemán Assmann utiliza globos de goma llenos de hidrógeno (Meteorological Office, 1961, p. 7). Este sistema de sondeo empleaba la propiedad de que su velocidad de ascenso permanecía prácticamente constante durante toda la subida, dependiendo del peso del globo y de la fuerza ascensional o peso que podían levantar a la salida. Este principio se explicaba porque la pérdida de fuerza ascensional que el globo experimentaba por la disminución de la densidad del aire que lo rodea se compensaba con el aumento del volumen del globo al disminuir la presión atmosférica exterior. El globo subía hasta que estallaba, debido a que la fuerza de dilatación del gas contenido en el globo superaba la elasticidad de la goma. Para calibrar el valor de la fuerza ascensional  $F$  del globo este se llenaba con ayuda de:

Una balanza de brazos desiguales [Fig. 53]. Uno de ellos era un tubo graduado a lo largo del cual corre una pesa  $P$  que se coloca en la división conveniente para que cuando la fuerza ascensional sea la deseada, el tubo este horizontal. (Lorente, 1927a, p. 144)

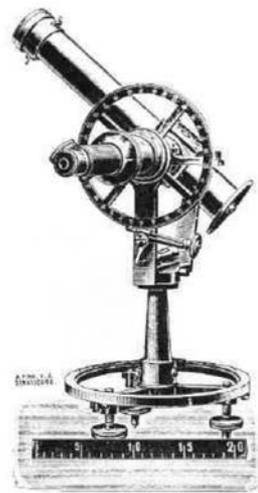


**Fig. 53** Balanza para lastrar globos

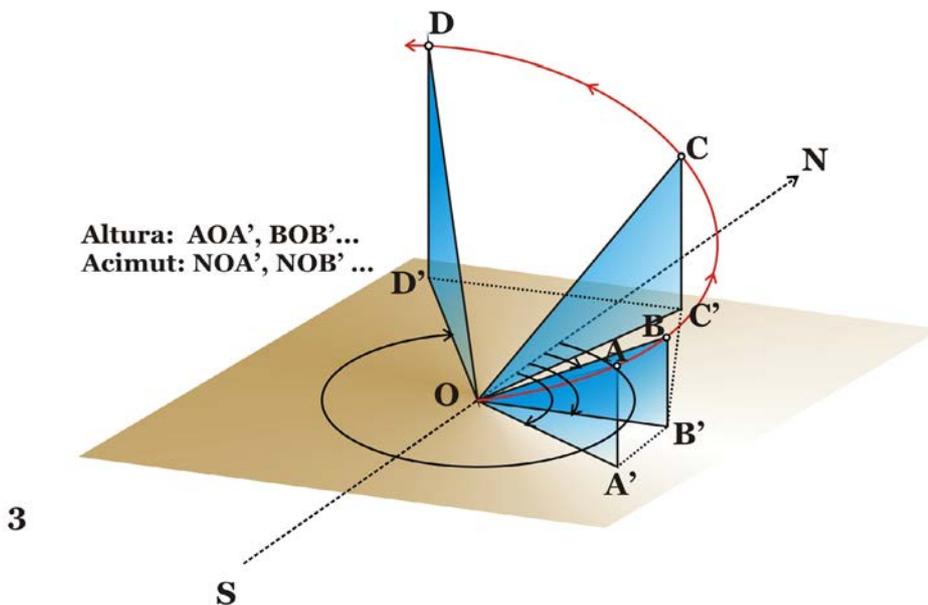
Una vez se lanzado el globo (Fig. 54.1), se seguía con ayuda de un aparato denominado *teodolito*, como los utilizados en topografía para medir ángulos verticales y horizontales. Pero este tenía la peculiaridad de que su ocular se encontraba acodado (Fig. 54.2) para facilitar la observación (Kleinschmidt, 1935, pp. 462-73). Por medio de este instrumento se determinaba la altura o ángulo vertical sobre el horizonte, y el acimut o ángulo respecto a la dirección Norte-Sur de la posición del globo durante su ascenso. Las lecturas de estos dos ángulos se realizaban cada 30 segundos, durante los cinco primeros minutos y después cada minuto.



1



2



3

**Fig. 54** Lanzamiento de un globo piloto (1). Teodolito de A. de Quervain (1905) para sondeos con globos piloto (2). Fundamento de la observación con globos piloto (3)

Supuesta la velocidad ascensional constante, si al cabo de 30 segundos el globo se encuentra en A, (Fig. 54.3) al cabo de 60 s. se encontrará en B, cumpliéndose que la altura  $BB' = 2AA'$ , al cabo de 120 s. el globo estará en C, donde  $CC' = 3 AA'$ , y así sucesivamente. El teodolito, situado en O, medía los ángulos  $AOA'$ ,  $BOB'$ , etc. Con ayuda de la trigonometría se pueden hallar las distancias  $OA'$ ,  $OB'$ , etc.:

$$\begin{aligned} OA' &= AA' \cotg AOA' \\ OB' &= BB' \cotg BOB' \end{aligned}$$

...

Una vez calculadas estas, se dibujan los puntos  $A'$ ,  $B'$ , etc. en un gráfico con ayuda de los radios  $OA'$ ,  $OB'$ ,  $OC'$ , etc., y el acimut correspondiente respecto a la línea Norte-Sur que haya dado la lectura hecha cada 30 o 60s. Uniendo estos puntos se obtendrá la proyección horizontal de la trayectoria del globo:  $OA'$ ,  $A'B'$ ,  $B'C'$ , etc. Como la distancia  $OA'$  es la componente horizontal de la trayectoria del globo de O hasta A, si la dividimos por el intervalo de tiempo (30 o 60 s.), nos dará la velocidad horizontal en metros por segundo del globo, o lo que es lo mismo la de la corriente de aire que existe a la altura  $AA'$ . El mismo razonamiento para la recta  $A'B'$ , que nos dará la velocidad del globo a la altura  $BB'$ , etc.

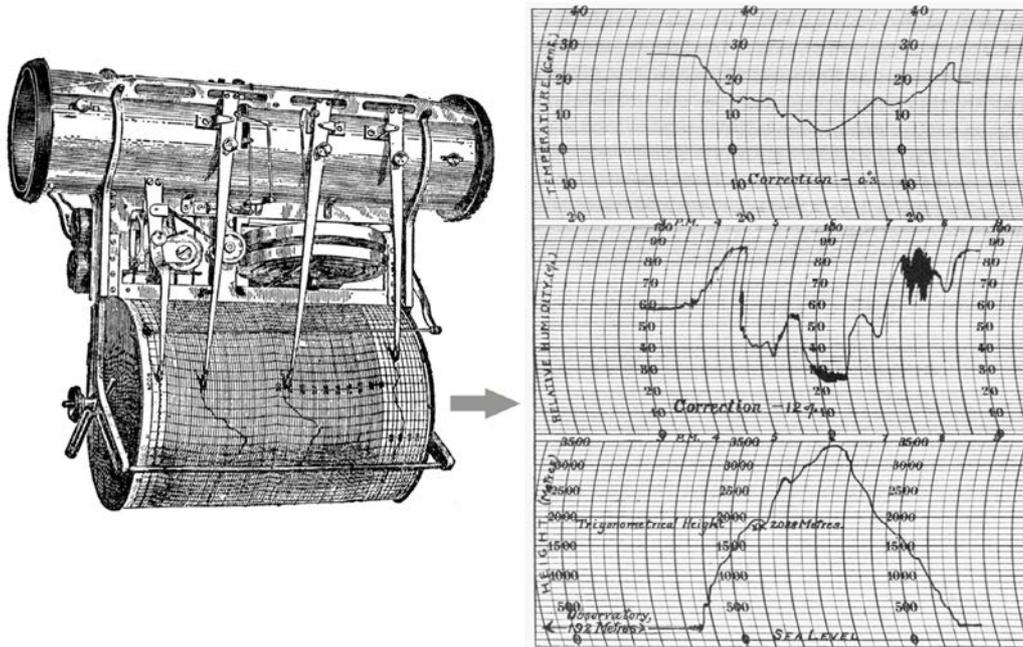
Para calcular la dirección del viento para cada intervalo, se trazaba por el centro del círculo una paralela al segmento correspondiente, por ejemplo  $B'C'$ , y contraria a la dirección del globo ( $OC'$ ), ya que como con las veletas dice de donde viene el viento, no hacia dónde va. La lectura en  $C'$ , nos da la dirección buscada. De este modo se tenían calculadas la velocidad y dirección del viento a diferentes alturas, que era el objeto del sondeo.

Este método era el más simple y era el más utilizado en las estaciones aerológicas a principios del siglo XX. Posteriormente el uso de tablas, reglas de cálculo específicas y teodolitos registradores (Kleinschmidt, 1935, pp. 453-7), simplifican enormemente los cálculos, ya que las observaciones se realizaban tres veces al día: a las 7 h., 12 h. y 18 h (Fontseré, 1918).

## 7 METEORÓGRAFOS PARA GLOBOS Y COMETAS

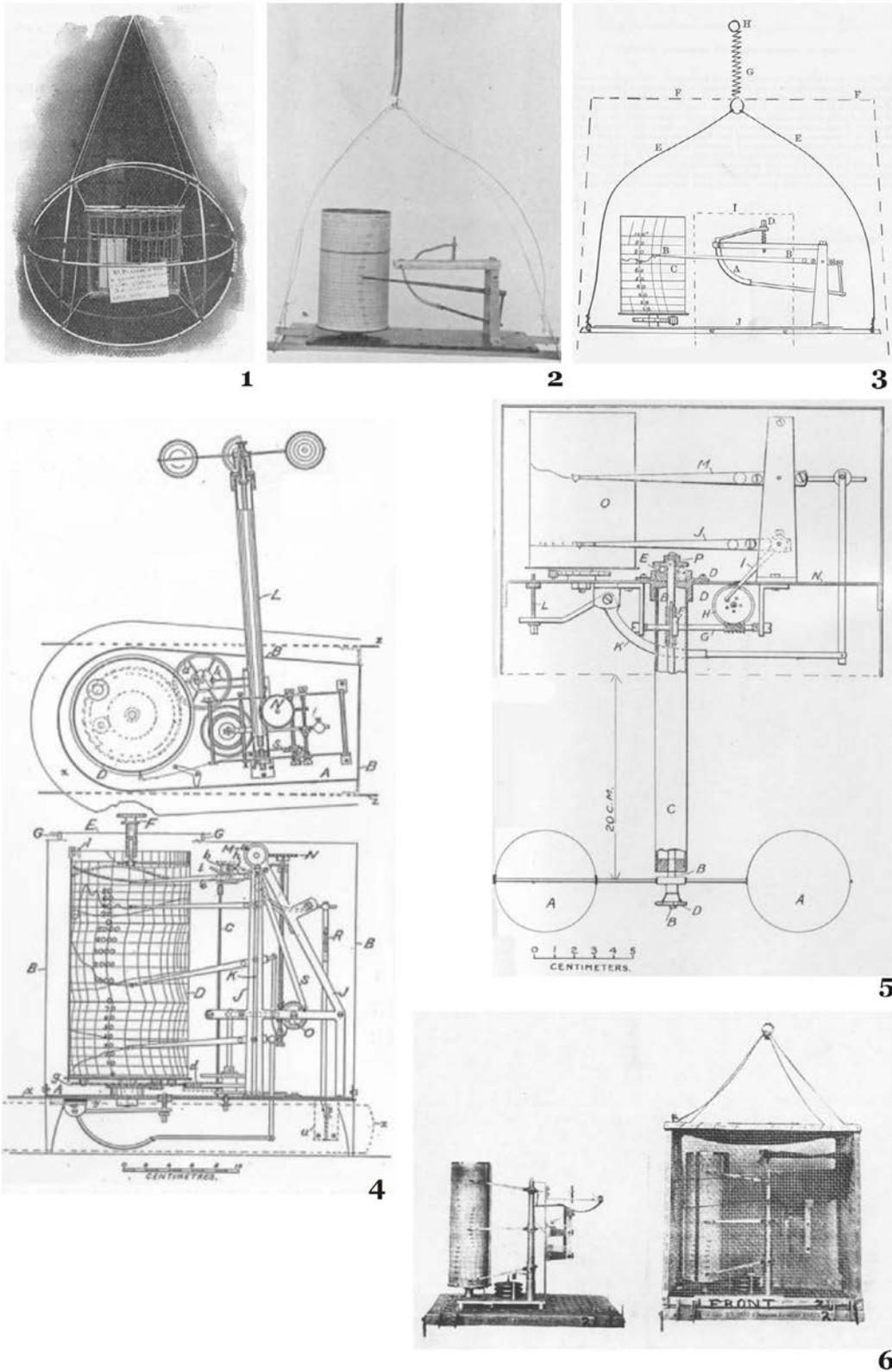
Para el registro simultáneo de los parámetros de la atmósfera, durante el ascenso por medio de globos y cometas, se utilizaba un instrumento de medida denominado *meteorógrafo*. Estos aparatos medían, a lo largo del tiempo, la presión, la temperatura,

la humedad del aire y otros parámetros. Por medio de unos estiletes movidos por las correspondientes sondas de medida, los datos de la medición se grababan sobre un tambor giratorio, que podía tener colocada una banda de metal ahumado o un papel graduado, si los estiletes deponían de una plumilla con tinta (Fig. 55).



**Fig. 55** Registros de un meteorógrafo

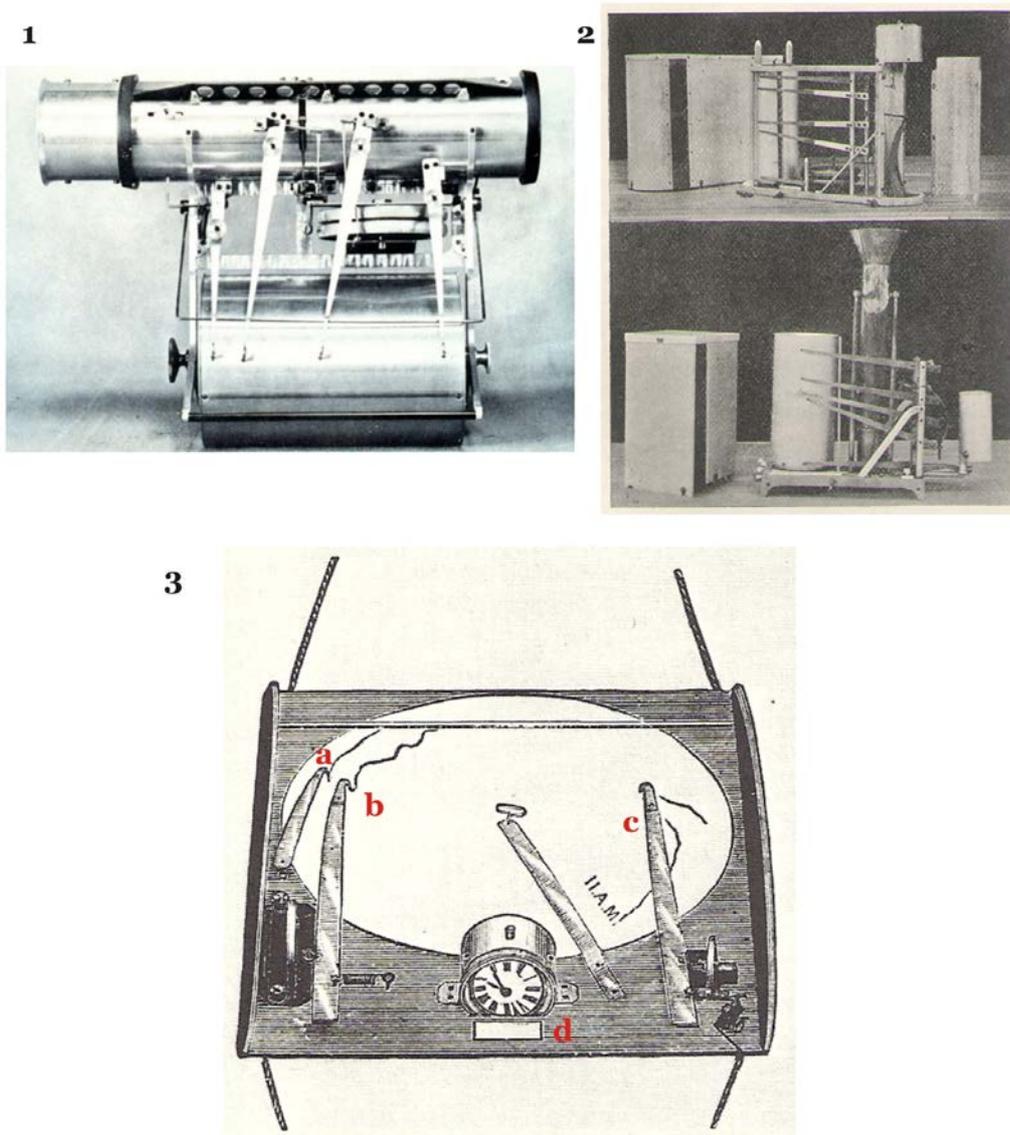
Dependiendo si iban a ser empleados en globos o en cometas, tenían unas características propias. El meteorógrafo de los globos sondas eran de material sumamente ligero y se instalaban en una barquilla de mimbre, que amortiguaba el golpe durante la caída. Los meteorógrafos más usados en los globos sonda eran del tipo *Bosch – Hergensel* (Fig. 56.1). El instrumento empleado para las cometas era similar a los usados en los globos. Sólo había que tener en cuenta en su diseño las oscilaciones a las que estaban sometidos, que podían falsear las mediciones. Además, dado que la cometa es una aeronave cautiva, se podía realizar también mediciones de la velocidad del viento, por lo que se le añadía al meteorógrafo una cuarta manecilla, con la sonda correspondiente para la captación de la velocidad del viento (anemómetro).



**Fig. 56** Meteorógrafo Bosch – Hergesell (1). Termógrafo (2) Partes de un termógrafo de Richard grabado del *Scientific American* de 15 de septiembre de 1894 (3) Meteorógrafo de cuatro elementos (1899) (4) Termoanemógrafo (1895) (5). Meteorógrafo de Richard. (6)

En 1894, en los primeros sondeos con cometa en el observatorio de Blue Hill (Estados Unidos) se usó un termógrafo de Richard modificado (Fig. 56.2-3), ya que el termógrafo de Richard original estaba pensado para registrar la temperatura en una estación fija en tierra. A partir de 1896 se aumenta la capacidad del aparato pudiendo registrar la presión y la humedad relativa. Al año siguiente, el meteorólogo S. P. Fergusson emplea un meteorógrafo de cuatro elementos, añadiéndole el registro de la velocidad del viento por medio de un anemómetro (Fergusson, 1904).

\*



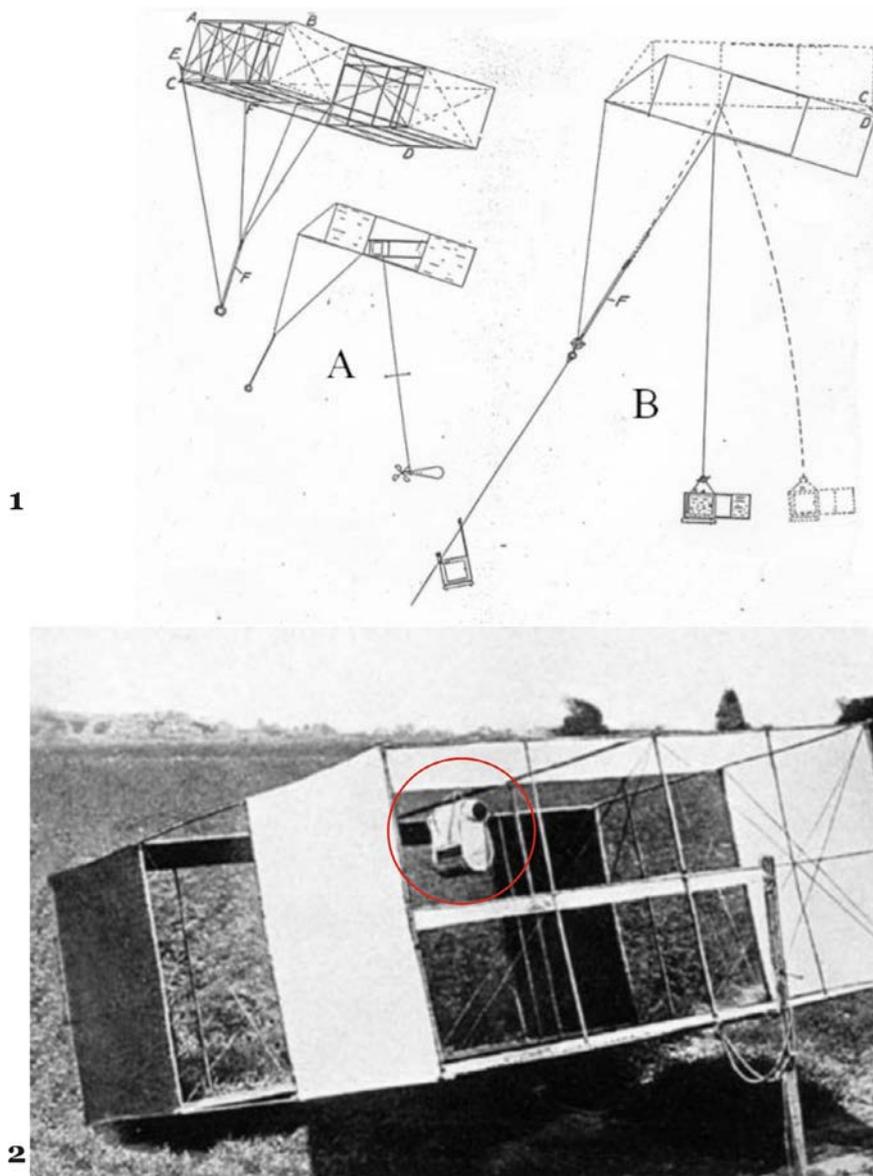
**Fig. 57** Meteorógrafo de Marvin (1). Meteorógrafo de Marvin – Assman (2). Meteorógrafo de Dines (3): (a) Manecillas para registrar la lectura del Humedad. (b) Presión barométrica. (c) Temperatura. (d) Velocidad del viento. (e) Recipiente conteniendo el pelo del higrómetro. (f) Mecanismo de lectura de la velocidad del viento. (g) Tubo de cobre conteniendo alcohol que constituye el termómetro. (h) Mecanismo de relojería para mover el disco gráfico. (i) Caja aneroide del barómetro

El meteorógrafo utilizado por el Servicio Meteorológico de Estados Unidos (Weather Bureau) fue el desarrollado (Fig. 57.1) por el meteorólogo norteamericano Charles Frederick Marvin, (1858-1943) (Marvin, 1898, pp. 17-20) y construido por la casa *Schneider Brothers* de Nueva York (Middleton, 1969, pp. 293-4). Este meteorógrafo fue modificado, perfeccionándolo añadiéndole un anemómetro *Assmann*. (Fig. 57.2) (Kleinschmidt, 1935, p. 405; Middleton, 1969, p. 296)

En Inglaterra, el meteorólogo William Henry Dines construye en 1904 un meteorógrafo (Fig. 57.3) muy simple: consiste en una tabla de madera, sobre la cual un disco cubierto con una hoja de registro gira movido por un mecanismo de relojería. Sobre la hoja se mueven las manecillas registradoras: la de presión, la de temperatura, la de la humedad relativa y una cuarta correspondiente al anemógrafo. Este último consiste en una ligera pelota de plástico de 7,6 cm de diámetro, colgada al final de una cuerda de 12 metros de fino hilo de coser. La tensión producida sobre el hilo a causa de la presión del viento sobre la pelota es transmitida por medio de un mecanismo hasta la manecilla correspondiente (Dines & Shaw, 1909, pp. 23-5). El instrumento se cuelga en la cometa por medio de cuatro hilos sujetos a las esquinas de la tabla. A Dines también se le debe otro sencillo meteorógrafo para ser utilizado en los globos sonda (Dines & Shaw, 1909, pp. 31-3; Kleinschmidt, 1935, p. 402).

Otro modelo de meteorógrafo, muy usado en Alemania es el denominado de *Bosch – Kleinschmidt* (Fig. 57.4). Este instrumento es el que adquiere a principios del siglo XX, el Observatorio Central Meteorológico español con el fin de ser utilizado en los experimentos aerológicos en el Observatorio del Teide (Galbis, 1915, p. 26).

La colocación del meteorógrafo era de vital importancia, ya que la sonda termométrica y la higrométrica debían estar suficientemente ventiladas, para dar una lectura correcta. Esta es la razón por la que las lecturas de temperatura eran más fiables, que las realizadas con globos sondas. Los meteorógrafos iban protegidos durante el sondeo en el interior de una caja de corcho, mimbre o aluminio y suspendidos, a una distancia conveniente, debajo de la cometa (Fig. 58.1) para evitar las sacudidas. Algunas veces para evitar las frecuentes caídas y preservar de la radiación solar, se ponían dentro de la estructura de la misma (Fig. 58.2).



**Fig. 58** Forma de colocar los meteorógrafos en el Observatorio de *Blue Hill* (Estados Unidos): En (A) el meteorógrafo está colocado dentro de la cometa, pero el anemómetro se encuentra suspendido. En (B) el meteorógrafo está suspendido del cable de la cometa (1). Meteorógrafo de *Marvin* colocado en la estructura de una cometa del *U.S. Weather Bureau* (2)

## 8 CONCLUSIONES

A finales del siglo XIX, la meteorología necesitaba de datos atmosféricos en las regiones alta de la atmosfera (~ 4000 m), pero no de una manera esporádica sino diariamente y en varios lugares, ya que así podría confeccionarse un mapa con las mediciones simultaneas, no sólo con los datos de superficie, sino en altura. El objetivo era predecir el tiempo. El desarrollo de la física de la atmosfera y de modelos teóricos

sobre la evolución de la misma, a partir de unas condiciones iniciales, hacia factible esta predicción.

Así pues, los *Servicios Meteorológicos* de los diversos países necesitaban un método para poder obtener diariamente dichos datos. Las máquinas voladoras existentes en esa época eran los globos y las cometas. Los globos, que ya llevaban más de un siglo de desarrollo, tenían todas las características que podríamos imaginar: elevarse a alturas por encima de la capa de las nubes o registrar el meteorólogo los datos directamente, entre otras; pero tenía la desventaja de ser un método caro.

El desarrollo de instrumentación simultánea y automática de los datos atmosféricos (meteorógrafos) ayudó a comprender que ya no hacía falta disponer de una persona que tomara los datos. Sólo había que elevar el instrumento con ayuda de un globo más pequeño que el que se necesitaba en uno tripulado, o emplear las cometas, que era otra máquina voladora que había experimentado un importante avance tecnológico a raíz de los experimentos que precedieron al desarrollo del aeroplano. A diferencia de los globos, al estar sujetas por un cable, las cometas permitían que los datos de la observación pudieran recabarse en la misma sesión de la observación. Los globos, una vez que explotaban, obligaban a buscar el meteorógrafo, operación que podría tardar días. Como contrapartida, este método permitía explorar alturas superiores a los 15.000 metros.

Las cometas perduraron hasta que aparecieron otros métodos más eficaces que las reemplazaron. Los sondeos con aeroplano y el desarrollo de las radiosondas hicieron que las cometas quedaran obsoletas. El aeroplano llegaba más alto que las cometas, y con mayor rapidez, permitiendo que un observador meteorológico a bordo tomase observaciones directas de los fenómenos atmosféricos. Por otro lado, la radiosonda permitía disponer de los datos a la vez que se realizaba el sondeo, alcanzando además regiones superiores. Por tanto, nuestro patrón narrativo de auge y caída se repite una vez más: tampoco a través de la aerología logró la cometa incorporarse al bagaje de una disciplina científica.

## 5 LA COMETA Y EL AEROPLANO

---

### 1 INTRODUCCIÓN

El hombre, que fisiológicamente no tiene adaptado su cuerpo para el vuelo, ha intentado a lo largo de la historia construir máquinas que suplan su limitación. Este desafío se materializó durante un largo periodo de tiempo en forma de leyendas, tradiciones, fantasías y sueños (Hallion, 2003, pp. 3-23). Pero por fin el hombre voló, y lo hizo valiéndose de dos tipos de máquinas: los aeróstatos y los aerodinos, es decir, los aparatos menos pesados que el aire (globos) y los más pesados (aeroplanos). Los globos tuvieron un rápido desarrollo desde finales del siglo XVIII (Hallion, 2003, pp. 61-80), y se llegó a creer que sería la única forma de maquina voladora que el hombre sería capaz de construir. Así no es de extrañar que el astrónomo y divulgador científico catalán José Comas y Sola (1868-1937), en un artículo publicado el 3 de mayo de 1902 en el periódico *La Vanguardia* de Barcelona, tras exponer las dificultades que presenta el vuelo mediante aeróstatos, escribiera refiriéndose a la navegación aérea con aparatos más pesados que el aire:

Toda seguridad de movimiento se fundamenta en la solidez del apoyo. Por esta razón la navegación aérea práctica ha sido hasta ahora un mito y, lo que es más grave, será en el futuro un mito al compararla con las locomociones terrestres y marítimas. Por esto los ensayos de navegación aérea, muy loables algunos por los buenos deseos que manifiestan en sus autores, no pasaran nunca de ser o fracasos o meras curiosidades deportivas.

Poco proféticas suenan ahora estás palabras, ya que el 17 de diciembre 1903, los hermanos Wilbur and Orville Wright, en Kitty Hawk (Carolina del Norte. Estados Unidos), realizaron, lo que se acepta como el primer vuelo de un hombre en una máquina voladora autopropulsada y controlada (Gibbs-Smith, 1966, pp. 35-6).

Más esperanzadas eran las palabras pronunciadas en 1894 por el físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), durante una conferencia ante la *Sociedad de Investigadores Científicos y Médicos Alemanes*, en donde habla de un tema muy en boga en ese tiempo: la navegación aérea. Tras mostrar las limitaciones que poseen los globos como máquinas voladoras para navegar por el aire como los barcos lo hacen por el mar, por ser complicados de dirigir, se inclina por el futuro de los aeroplanos, es

decir, las maquinas voladoras más pesadas que el aire. Estas máquinas volaban según unos principios dinámicos cuyo análisis exhaustivo requiere de complicadas formulas matemáticas. Dado que no era el lugar adecuado para exponerlas, Boltzmann explica que dicho *principio dinámico*:

[...] puede ser ilustrado por un simple juguete, la cometa. Esta está formada por una superficie ligeramente curvada cuya inclinación viene dada por el peso de la cola. Si se le arrastra mediante un hilo rápidamente por el aire, subirá hasta una altura considerable. (Boltzmann, 1894/2009, p. 109)

La cometa es para Boltzmann el símil perfecto de lo que es un aeroplano: una superficie curvada, inclinada respecto a la dirección del viento y empujada por un hilo desde tierra. A principios del siglo XIX se popularizó la idea de que un aeroplano debía ser una cometa en la que el hilo se ha sustituido por un motor lo suficientemente potente para empujar a la máquina para mantenerse su vuelo. Este sería el reto que movería a un grupo de entusiastas que creían que se podía volar encima de esta cometa libre propulsada. En este capítulo, analizaremos la metodología que siguieron para intentar construir máquinas voladoras a partir del estudio de *modelos a escala* con cometas.

Pretendemos mostrar de qué modo, en el siglo XIX, la cometa se inserta en las prácticas de modelización propias de la Historia de la Ingeniería, donde el modelo debe entenderse como un *modelo a escala*: el artefacto que el ingeniero pretende construir se ensaya con un prototipo de proporciones reducidas que permitan verificar el funcionamiento de todas o algunas de sus partes. El principio rector de este tipo de modelización es que el comportamiento del modelo a escala será el mismo que el del artefacto que se pretende construir. En palabras de Susan Sterrett (2009), tenemos aquí una inferencia analógica de una *situación física* a otra *situación física*. Este tipo de práctica se puede documentar desde los orígenes mismos de la ingeniería: pensemos principalmente en las maquetas de edificios o en los modelos a escala de máquinas hidráulicas, barcos e incluso máquinas de guerra (Müller, 2009, pp. 642-4).

Aunque la metodología de este tipo de modelización se basaba tradicionalmente en el ensayo y error, durante el siglo XVIII tenemos ya indicios de sistematización. Por ejemplo, en 1775, el ingeniero francés Charles Bossut (1730-1814) realizó por encargo del gobierno francés unos ensayos con modelos de cascos de barcos, con el fin de encontrar la forma del mismo que poseía una menor resistencia (Zwart, 2009, p. 764). En 1759 el ingeniero inglés John Smeaton (1724-1792), realizó una serie de experimentos sobre modelos a escala de una rueda hidráulica y un molino de viento

(Vincenti, 1990, pp. 138-9). Durante el siglo XIX, se siguieron utilizando los ensayos con modelos destacando en hidráulica el trabajo de William Froude (1810-1879), con modelos de navíos (Zwart, 2009, p. 765) o los ensayos sobre superficie aerodinámicas, con túneles de viento por el ingeniero Inglés Horatio Phillips (1845-1912) (Anderson, 1997, pp. 126-30) o los trabajos del ingeniero alemán Otto Lilienthal (1848-1896) con balanzas giratorias (Anderson, 1997, pp.138-55). A lo largo de este proceso, y en particular desde Froude en adelante, se fueron incorporando controles matemáticos sobre este tipo de inferencia de objeto a objeto, seleccionando las variables relevantes en el modelo y tratando de anticipar su comportamiento al cambiar de escala el artefacto.

El desarrollo del aeroplano a lo largo del siglo XIX y principios del XX se lleva a cabo mediante lo que Zwart denomina *ensayos directos* e *indirectos* de cometas y planeadores. Por *ensayo directo* se entiende cuando se estudia un prototipo de máquina voladora (cometa o planeador) a escala real, a diferencia del *indirecto*, que se realiza sobre un modelo a escala (Zwart, 2009, pp. 770-2). Desde los trabajos de Froude se sabía ya que para garantizar el resultado de un ensayo indirecto era necesario algún tipo de ley que asegure que los resultados del modelo a escala son extrapolables al artefacto que pretendemos construir. Sin embargo, en el desarrollo del aeroplano no se contó con ley alguna que permitiera justificar un ensayo indirecto hasta la segunda década del siglo XX. De ahí que la modelización fuera puramente empírica: en última instancia era necesario hacer un ensayo directo sobre el prototipo para verificar el resultado del ensayo indirecto (Zwart, 2009, p. 771).

En este contexto analizaremos en este capítulo cómo los pioneros de la aviación adoptaron la cometa como modelo a escala del ala de un avión. A diferencia de otro tipo de modelos a escala utilizados en la ciencia de la época<sup>1</sup>, la cometa no se utiliza para visualizar la ley que explica la fuerza que genera el aire al incidir sobre ella, sino como inferencia práctica de objeto a objeto: el comportamiento observado en un ensayo indirecto con una cometa se reproducirá en un ensayo directo con un ala (Zwart, 2009, p. 782-3). Así, mediante el uso de la cometa como modelo a escala, se pudieron aislar en los ensayos diversos parámetros que controlarían, en principio, el vuelo. El método

---

<sup>1</sup> Por ejemplo, en química se emplean los modelos moleculares fabricados con bolas y varillas, con el propósito de visualizar la estructura microscópica. Pero en el modelo no se cumplen las mismas leyes que en la molécula, ya que lo que mantiene unido a las bolas, que representan a los átomos, son las varillas que representan la fuerza del enlace químico, no cumpliéndose en este caso que las bolas/átomos estén unidos por la misma ley (Zwart, 2009, p. 783).

se basaba en la *variación* de tales parámetros: en cada ensayo se observa cómo varía el vuelo al cambiar alguna característica de la cometa, de modo que en sucesivas repeticiones variaremos en valor de tal parámetro para registrar el rango de efectos que tiene sobre el vuelo (Vincenti, 1990, p.139). Hasta la aparición del análisis dimensional, basado sobre principios físicos controlados matemáticamente, el método de variación de parámetros fue el que se aplicó al desarrollo del aeroplano. Como veremos, la cometa fue uno de los principales modelos a escala para la aplicación de tal método.

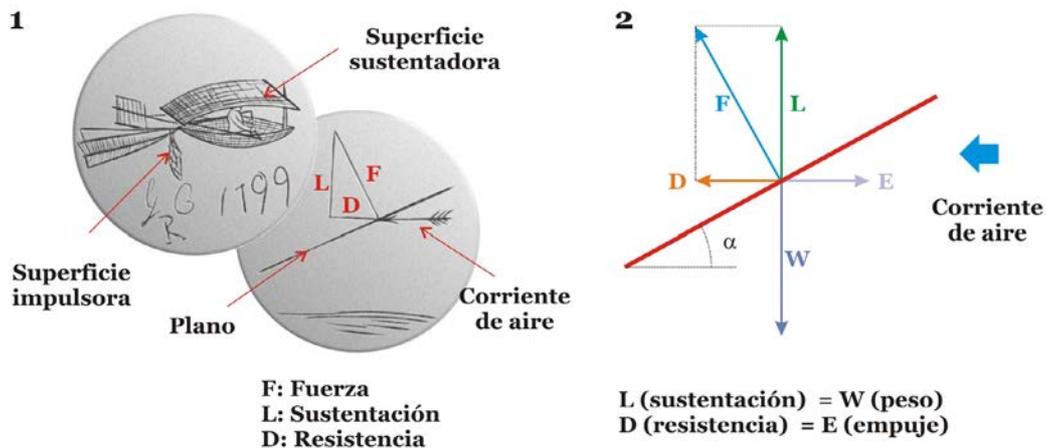
Este procedimiento pre-teórico de modelización condujo a los pioneros de la aviación a un éxito que los físicos de su tiempo les negaban. Al intentar modelizar de un modo puramente teórico cómo se generaba y cuánto valía la fuerza existente en las alas de los aeroplanos, los resultados concluían la imposibilidad de construir semejante máquina (Kármán, 1954, p.15). Lo cual no disuadía a los entusiastas del aeroplano: “las matemáticas, hasta nuestros días, nos han sido perfectamente inútiles con respecto al vuelo” advertía en 1879 el informe anual de la *Aeronautical Society* (citado por Kármán, 1954, p. 2). El resultado principal que, como vamos a ver, se obtiene con los ensayos indirectos sobre cometas es el de la superioridad de las superficies de ala curva sobre las planas en términos de fuerza de elevación. Un resultado que los modelos teóricos de la época no podían explicar (Kármán, 1954, p. 22).

Hasta finales del siglo XIX, la forma de la cometa empleada en los modelos a escala era la de una cometa plana, similar a la que usaban los niños en sus juegos. Como veremos en la sección 3, el australiano Lawrence Hargrave ideó un nuevo tipo de cometa formada por dos planos paralelos y dos superficies verticales. Al curvar la superficie de sustentación obtuvo una máquina voladora con un vuelo estable y con una gran fuerza de elevación. La cometa de Hargrave creó la esperanza entre los pioneros de la aviación de que añadiendo a esta estructura un motor ligero la máquina volaría. Cosa que sólo sucedió, al cabo de numerosos ensayos y modificaciones, en 1903 con el vuelo de la máquina diseñada por los hermanos Wright. Esta se impuso a otras aeronaves basadas en formas alternativas de cometa (e.g., la de Alexander Graham Bell).

Nuestro análisis seguirá de nuevo el esquema de auge y caída. En la sección 2, presentaremos el estado de la aerodinámica en el siglo XIX. Presentaremos después la cometa de Hargrave y sus desarrollos posteriores. Finalmente, daremos cuenta de cómo el desarrollo de formas alternativas de modelización, donde la inferencia era controlada matemáticamente por un modelo físico, desplazaron a la cometa como objeto de ensayo indirecto en el siglo XX.

## 2 PRIMEROS DESARROLLOS EN LA TECNOLOGÍA DEL AEROPLANO

Las especificaciones que debe tener un aeroplano, tienen su origen a principios del siglo XIX, cuando el rico noble inglés Sir George Cayley (1773-1857) publica tres artículos en *A Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts* (Cayley, 1809a, 1809b, 1810/1962), donde llega a la conclusión que el problema de volar con un aparato más pesado que el aire se puede resumir en “To make a surface support a given weight by the application of power to resistance of air” (Cayley, 1809a, 1809b, 1810/1962, p. 217). En palabras actuales, hay que generar sobre una superficie (ala) una fuerza de sustentación (L) que equilibre el peso (W) y un empuje o propulsión (E) que venza la resistencia del aire (D). En 1799, este principio mecánico lo había grabado Cayley, en un disco de plata (Fig. 59.1). Esta original manera de expresar sus ideas se repite en la otra cara del mismo, donde se encuentra dibujada una máquina voladora, en donde sus elementos de sustentación y empuje, se encuentran simbolizados en un plano rígido y dos remos.



**Fig. 59** Disco de plata, que se conserva en el *Science Museum* de Londres, en el que Cayley dibuja, en 1799, el problema mecánico de una máquina voladora más pesada que el aire (1) Diagrama de fuerzas sobre una placa expuesta a una corriente de aire (2)

Por lo tanto, para poder volar con un aeroplano había que resolver, por un lado un problema teórico, que era predecir la forma y dimensiones de la superficie (perfil aerodinámico) que generada una elevada fuerza de sustentación (L), con un valor bajo de resistencia (D), todo esto a velocidades relativamente bajas. A esto se añadía una serie de problemas de índole tecnológica, como encontrar, una estructura ligera provista de un motor ligero y potente que generada el empuje necesario para dar velocidad a la máquina y generar la sustentación, que además debía ser estable y de fácil control en el

aire. Analizaremos como se intentaban solucionar estos problemas a lo largo del siglo XIX.

## 2.1 PROBLEMAS TEÓRICOS FRENTE A SOLUCIONES PRÁCTICAS

Durante el siglo XVII, como vimos en el apartado “La física de la cometa” del capítulo 3, se había desarrollado un modelo teórico que predecía la resistencia que aparecía en los objetos en movimiento inmersos en un fluido. Este modelo se basaba en la interpretación de los resultados que aparecían en el libro II de los *Principia* de Isaac Newton, conocida como teoría de impacto o ley del seno cuadrado de Newton (Anderson, 1997, pp. 37-40). Esta ley postulaba que la resistencia de los objetos inmersos en un fluido era proporcional a la superficie expuesta a la corriente, a la densidad del fluido  $\rho$ , al cuadrado de la velocidad y al cuadrado del seno del ángulo de incidencia. Así, la fuerza  $F$  que aparece en una superficie de área  $S$ , bajo un ángulo  $\alpha$ , cuando incide una corriente fluida con velocidad  $v$  sería igual a:

$$F = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot \text{sen}^2 \alpha$$

Esta fuerza perpendicular al plano se descomponía en dos componentes; una perpendicular a la dirección del viento, que se denomina sustentación ( $L$ ), y la otra en la dirección del viento, que es la resistencia ( $D$ ) (Fig. 59.2):

$$L = F \cdot \cos \alpha = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot \text{sen}^2 \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$D = F \cdot \text{sen} \alpha = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot \text{sen}^3 \alpha$$

Por lo tanto, si queremos que la sustentación sea muy elevada debemos emplear valores altos de  $\alpha$ , pero esto no es recomendable, ya que se genera una gran resistencia ( $D$ ), y por tanto se necesitarán pesados motores. Por lo tanto, la solución era emplear grandes superficies de ala.

Si la ley de Newton es correcta, el pobre proyectista no tiene otra solución que construir un artefacto tremendo con una superficie de alas muy grandes y, por tanto, de gran peso, a menos que se construya una máquina con una superficie de alas razonable, pero con una relación sustentación-resistencia muy baja, lo que significa la necesidad de un motor muy pesado para la propulsión. (Kármán, 1954, p. 15)

Si la ley del seno cuadrado de Newton se cumplía, una máquina más pesada que el aire no podía volar, transportando el peso del motor y del piloto. Pero:

Los experimentos han demostrado que tres de las afirmaciones de Newton eran correctas: la proporcionalidad con respecto a la densidad, con respecto al cuadrado de la dimensión lineal y con respecto al cuadrado de la longitud [...] la proporcionalidad entre la fuerza que actúa sobre el elemento superficial y el cuadrado del seno del ángulo de inclinación, ha resultado totalmente falsa. Los ensayos han demostrado que la fuerza es, más bien, función lineal del seno del ángulo o del ángulo mismo, en caso de ángulos pequeños. (Kármán, 1954, p.15)

Como vamos a ver, desde mediados del siglo XVIII este modelo físico se elaboró paralelamente al desarrollo de una mecánica matemática de fluidos, aplicando la mecánica newtoniana al movimiento de los fluidos. Para que esto fuera posible se debió admitir una serie de simplificaciones con el fin de poder abordar su estudio. Así, por ejemplo, se consideraba que el fluido es un medio continuo, que no choca contra los objetos inmersos en él, sino que los contornea (Simón Calero, 1996, p. 260). Si bien estos modelos se trataban muy bien matemáticamente, presentaban la dificultad de que algunas conclusiones eran contrarias a la práctica. Como por ejemplo la conocida como *paradoja de D'Alembert*, que predecía que la fuerza de resistencia de un cuerpo sumergido en una corriente fluida era nula (Anderson, 1997, pp. 44-6).

❁ 286 ❁

en supposant la seule  $x$  variable. Donc cette masse fluide  $Zz$  est repoussée dans la direction  $AO$  par la force motrice  $dx dy dz \left(\frac{dp}{dx}\right)$ , ou bien par la force accélératrice  $= \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dx}\right)$ . De même maniere on verra que la masse fluide  $Zz$  est sollicitée dans la direction  $BO$  par la force accélératrice  $= \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dy}\right)$ , & dans la direction  $CO$  par la force accélératrice  $= \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dz}\right)$ . Ajoutons à ces forces les données  $P, Q, R$ , & les forces accélératrices entières seront :

selon la direction  $OA = P - \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dx}\right)$   
selon la direction  $OB = Q - \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dy}\right)$   
selon la direction  $OC = R - \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dz}\right)$ .

XXI. Nous n'avons donc qu'à éгалer ces forces accélératrices avec les accélérations actuelles que nous venons de trouver, & nous obtiendrons les trois équations suivantes :

$$P - \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dx}\right) = \left(\frac{du}{dt}\right) + u \left(\frac{du}{dx}\right) + v \left(\frac{du}{dy}\right) + w \left(\frac{du}{dz}\right)$$

$$Q - \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dy}\right) = \left(\frac{dv}{dt}\right) + u \left(\frac{dv}{dx}\right) + v \left(\frac{dv}{dy}\right) + w \left(\frac{dv}{dz}\right)$$

$$R - \frac{1}{q} \left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dw}{dt}\right) + u \left(\frac{dw}{dx}\right) + v \left(\frac{dw}{dy}\right) + w \left(\frac{dw}{dz}\right)$$

Si nous ajoutons à ces trois équations premièrement celle, que nous a fournie la considération de la continuité du fluide :

**Fig. 60** Las tres ecuaciones de Euler para un fluido incompresible y no viscoso en el párrafo XXI de la memoria *Principes généraux du mouvement des fluides* (1755)

En 1755, Leonard Euler publica en la *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et Belles Lettres* de Berlín, tres monografías (Euler, 1755a, 1755b, 1755c), en que reduce el comportamiento del fluido a un conjunto de ecuaciones diferenciales (Fig. 60) desarrolladas a partir de las leyes de Newton, definiendo a la presión como una fuerza que actúa normalmente sobre cualquier superficie interna o externa al fluido (Anderson, 1997, pp. 48-9). Las ecuaciones de Euler, aunque simples en su planteamiento, presentaban dificultad en su resolución. Además habían sido deducidas con dos importantes hipótesis (los fluidos eran incompresibles y no viscosos<sup>2</sup>) que, aunque validas en muchas situaciones, no abarcaban la totalidad de los problemas planteados en mecánica de fluidos. La teoría del movimiento de los fluidos no viscosos la desarrollarían a mediados del siglo XIX, de manera independiente, el ingeniero francés Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) en 1822 y el físico irlandés Sir George Gabriel Stokes (1819-1903) en 1845 (Anderson, 1997, pp. 88-93). A ellos se debe un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, las denominadas Ecuaciones de *Navier-Stokes* (Fig. 61). Estas ecuaciones describen el movimiento de un fluido viscoso alrededor de un cuerpo sumergido en él, pero, presentan una importante limitación: no existe una solución exacta a las mismas, no hay una solución analítica a determinados problemas técnicos (Anderson, 1997, p. 93)

$$\begin{aligned}\rho \cdot \mathbf{g}_x - \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} &= \rho \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{y}} + \mathbf{w} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}} \right) - \varepsilon \cdot \left( \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{y}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}^2} \right) \\ \rho \cdot \mathbf{g}_y - \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{y}} &= \rho \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{y}} + \mathbf{w} \cdot \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{z}} \right) - \varepsilon \cdot \left( \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{y}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{z}^2} \right) \\ \rho \cdot \mathbf{g}_z - \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{z}} &= \rho \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \mathbf{y}} + \mathbf{w} \cdot \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \mathbf{z}} \right) - \varepsilon \cdot \left( \frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial \mathbf{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial \mathbf{y}^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial \mathbf{z}^2} \right)\end{aligned}$$

**Fig. 61** Ecuaciones de *Navier – Stokes*. Donde u, v, w son las tres componentes del vector velocidad V(x, y, z, t),  $\mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y, \mathbf{g}_z$  son las componentes de la fuerza de gravedad por unidad de volumen, p(x, y, z) es la presión por unidad de volumen en un punto,  $\rho$  es la densidad y  $\varepsilon$  representa el coeficiente de fricción del fluido

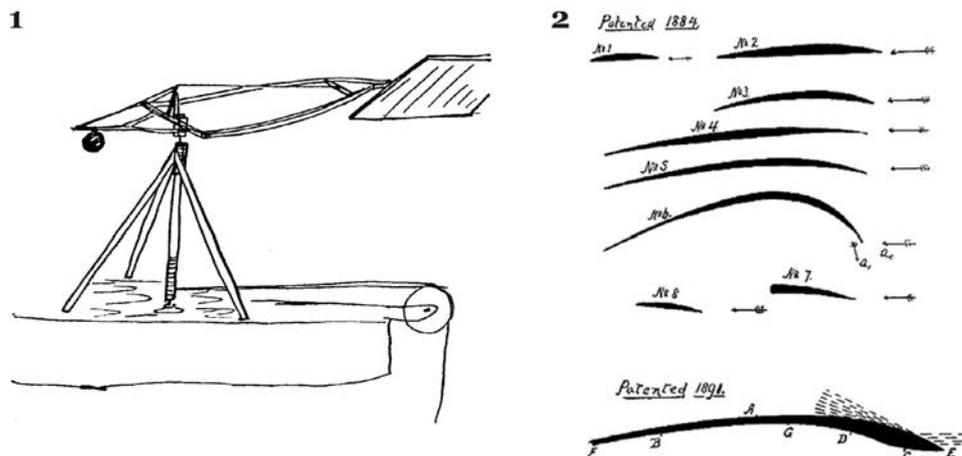
Paralelamente a estos estudios teóricos, durante el siglo XVIII y el XIX, se realizaron una serie de medidas del comportamiento de los fluidos por medio de

<sup>2</sup> Se dice que un flujo es incompresible cuando su densidad es homogénea en todo el fluido y permanece constante con el tiempo. Un flujo viscoso newtoniano es aquel que al ser sometido a un esfuerzo cortante se deforma moviéndose con una velocidad inversamente proporcional a una constante denominada coeficiente de viscosidad, en el caso de que la relación no sea lineal los fluidos se denominan no-newtonianos (Anderson, 1997, p. 38).

ensayos. En 1759 el ingeniero inglés John Smeaton (1724-1792) publica en las *Philosophical Transactions of the Royal Society* (Smeaton, 1759) un estudio en el que muestra los resultados de una serie de experimentos realizados sobre el comportamiento de dos máquinas, a escala reducida, movidas por fluidos: una rueda hidráulica y un molino de viento. Por las medidas realizadas sobre las aspas del molino, deduce que la fuerza que ejerce una corriente de aire sobre la superficie de un plano perpendicular a la dirección del flujo es:

$$F = K \cdot S \cdot v^2$$

Donde F es la fuerza aplicada en el centro del plano, S el área del plano y v la velocidad del viento. K es una constante de proporcionalidad que Smeaton, por medio de sus ensayos, le asignó un valor igual a 0,005, para F en libras, S en pies cuadrados y v en millas por hora<sup>3</sup> (Anderson, 1997, p. 58). Valor que fue cuestionado por Cayley en 1809, mediante ensayos con una balanza de brazos rotatoria (Fig. 62.1), en los que obtiene un valor<sup>4</sup> de  $K = 0,0037$  (Gibbs-Smith, 1962, p. 16). Pero, el valor original de 0,005 se mantendrá a lo largo del siglo XIX, hasta que los hermanos Wright en 1901 se dan cuenta del error y por medio de ensayos lo actualizan (Anderson, 1997, p. 76).



**Fig. 62** Balanza empleada en los experimentos de Carley (1). Perfiles curvados patentados por Horatio F. Phillips (2)

Este era el conocimiento teórico del que partieron los pioneros de la aviación, principalmente ingenieros que adoptaron desde un principio un enfoque experimental.

<sup>3</sup> Si ponemos D en kilos, S en metros cuadrados e V en metros por segundo.  $K = 0,13$  (Anderson, 1997, p. 143).

<sup>4</sup> Valor que se acerca al actual  $K = 0,00289$  (Anderson, 1997, p. 76).

Así, en 1871, el ingeniero inglés Francis Herbert Wenham (1824-1908), perteneciente a la *Aeronautical Society of Great Britain*, construyó el primer *túnel de viento*, que es un dispositivo experimental consistente en un cilindro en el que se genera un corriente de aire con un ventilador, colocando en su interior una serie de superficies bajo distintos ángulos de incidencia, pudiendo medir las fuerzas generadas sobre los mismos (Hallion, 2003, p. 117). Este nuevo sistema de experimentación es utilizado también por el ingeniero inglés Horatio F. Phillips (1845-1926), quien descubrió que si las superficie expuestas al viento están curvadas generan, para un mismo ángulo de inclinación, una mayor sustentación que las planas (Phillips, 1885) (Fig. 62.2).

Wanham y Phillips ejemplifican el perfil del ingeniero que trabaja en aerodinámica práctica durante la segunda mitad del siglo XIX. Autodidactas y con conocimientos de mecánica apoyados principalmente en su *buen oficio* se propusieron como objetivo práctico desarrollar una máquina voladora, frente a los físicos universitarios cuya consideración de la misma era la de un simple objeto teórico dentro de la mecánica de fluidos (Anderson, 1997, p. 138). La credibilidad de los ingenieros experimentó un importante impulso gracias a la creación de sociedades científicas aeronáuticas, que con sus publicaciones técnicas<sup>5</sup>, conferencias y congresos anuales suplieron el *abandono académico* de esta disciplina (Anderson, 1997, p. 115).

La primera de ellas se creó en Francia en 1852 con el nombre de *Société Aérostatique et Météorologique de France*, siendo una de las más activas la fundada en Inglaterra en 1866, la *Aeronautical Society of Great Britain*<sup>6</sup>.

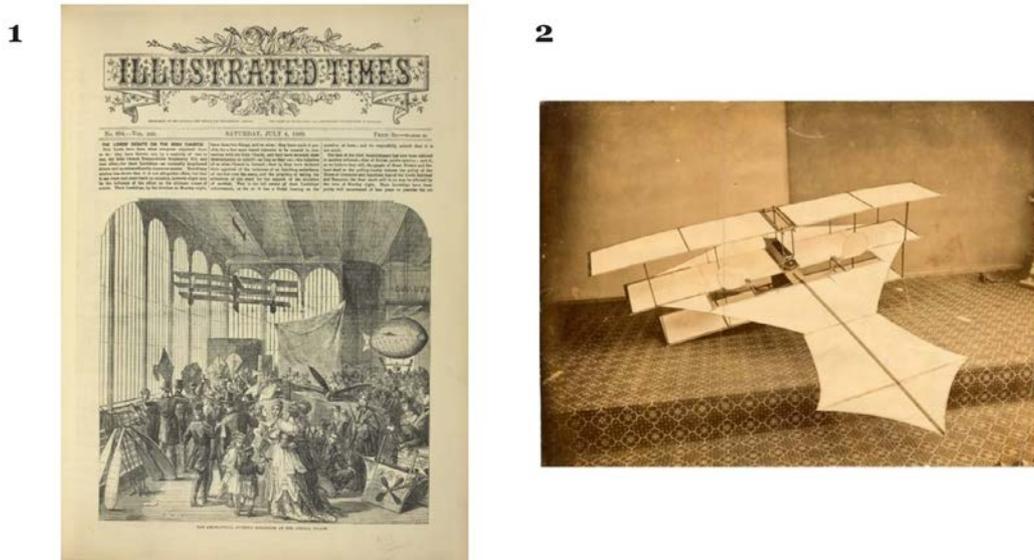
A lo largo del siglo XIX la sociedad británica no sólo realizó reuniones de sus miembros o editó publicaciones sobre aerodinámica aplicada, como los trabajos de F. H. Wenham, sino también exposiciones, como la organizada en 1868 con máquinas voladoras como globos, cometas y aeroplanos en el *Cristal Palace* de Londres (Fig. 63.1), con el propósito de mostrar al público los avances de la aeronáutica (Gibbs-Smith, 1960, pp. 17-9). Aunque la mayoría de las máquinas voladoras que se exhiben eran artefactos inviables, alguna de ellas tuvieron un cierto éxito, como el triplano (Fig. 63.2) construido por el ingeniero inglés John Stringfellow (1799-1883), que alzó el vuelo a través de un cable, impulsado por una hélice movida por una pequeña máquina

---

<sup>5</sup> Entre otros *L'Aéronaute* y *L'Aérophile* en Francia y *The Journal of the Royal Aeronautical Society* en Inglaterra. Véase Gibbs-Smith (1966, p. 355).

<sup>6</sup> En las actas de su primera reunión fundacional, celebrada el 12 de enero de 1866, podemos leer: "The Aeronautical Society of Great Britain has been formed to encourage, to observe, to record, and to aid, in proportion as its ability is strengthened by the support of its members" (Citado en Anderson, 1997, p. 116).

de vapor (Gibbs-Smith, 1966, p. 15). No obstante, aprovechando la fascinación popular sobre el vuelo (de la que ya vimos cómo se benefició la cometa en el capítulo 2) contribuyeron a la credibilidad de su empresa.



**Fig. 63** Primera página de la revista inglesa *Illustrated Times* de 4 julio de 1868, con un grabado de la exhibición de *Aeronautical Society of Great Britain* en el *Crystal Palace* de Londres (1). Triplano de Stringfellow (1868) (2)

Por lo tanto, a finales del siglo XIX tenemos estudios teóricos muy desarrollados pero con unas ecuaciones matemáticamente complejas e irresolubles, salvo para casos sencillos. Principalmente, un modelo teórico, la conocida como ley del seno cuadrado de Newton, que predice dimensiones para las alas no acordes con los resultados experimentales. Por otro lado, unos métodos de aerodinámica aplicada que, por ensayo y error, analizaban qué formas eran las más adecuadas para las alas por su gran sustentación para ángulos de inclinación pequeños. En este contexto científico y tecnológico se desarrollan los primeros ensayos indirectos con cometas para probar la posibilidad del vuelo mecánico.

## 2.2 **PRIMERAS MÁQUINAS VOLADORAS MÁS PESADAS QUE EL AIRE**

George Cayley en 1799 había fijado los principios que debían regir el vuelo de un aeroplano, pero la idea llevaba asociada una serie de problemas que no tenían solución con la tecnología de la época. Uno de los primeros problemas estaba relacionado con la forma del ala que proporcionaría la sustentación suficiente para volar y la adecuación de su estructura. Cayley no emplea ningún fundamento teórico o modelo físico (Kármán,

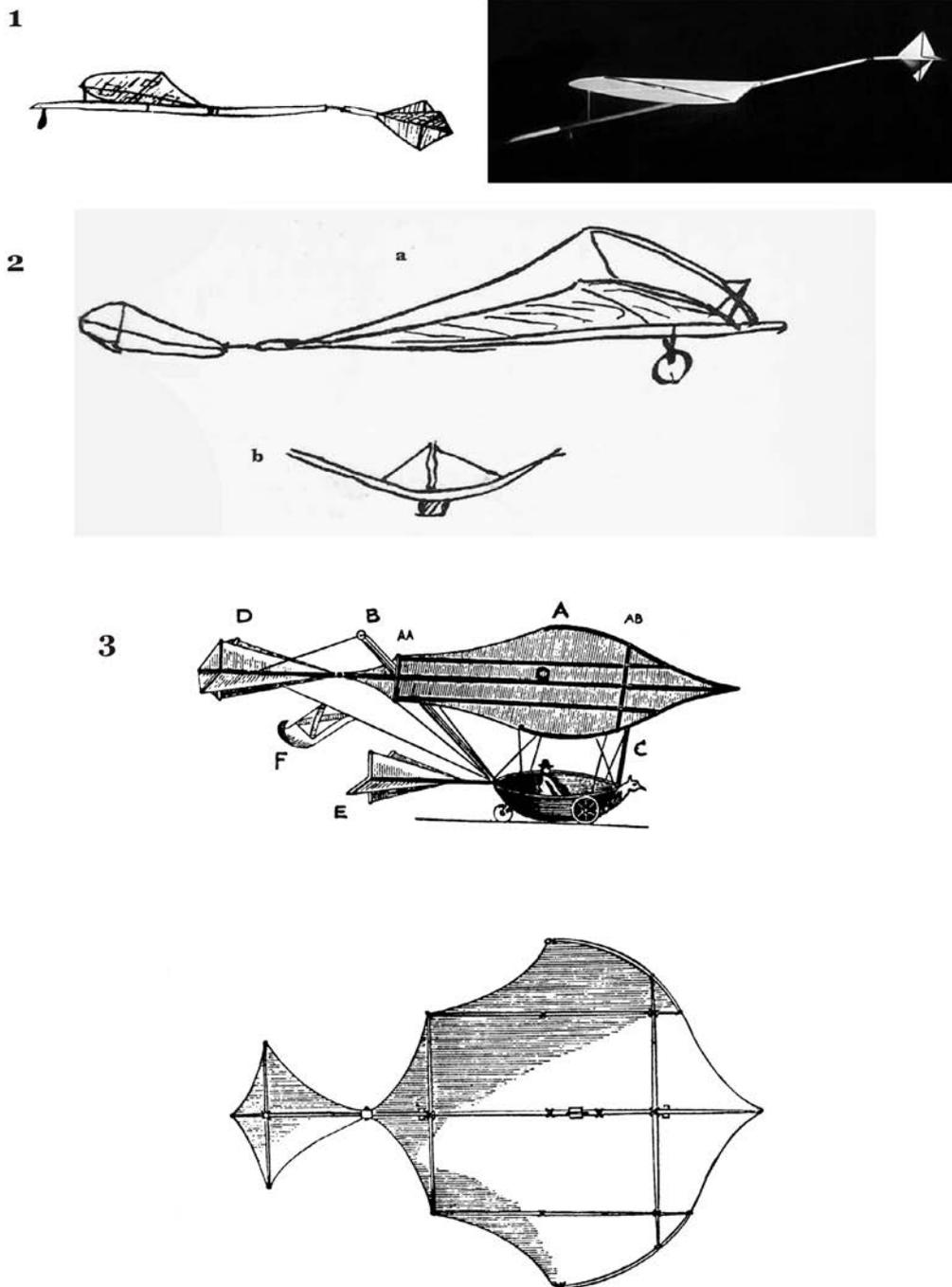
1954, p. 17): sus primeras aportaciones están apoyadas el estudio del vuelo de los pájaros, así como con pruebas de las fuerzas generadas en superficies, medidas por medio de una balanza de brazos rotativa y, finalmente, en la construcción de planeadores (Gibbs-Smith, 1962, pp. 11-8). En 1804, Cayley construye un modelo de planeador cuya ala recuerda la forma cometa plana (Fig. 64.1), inspiración que se confirma en sus cuadernos de notas:

A common paper kite containing 154 sq. inches was fastened to a rod of wood at the hinder end and supported from the fore part from the same rod by a peg, so as to make an angle of 6°. With it this rod proceeded on behind the kite and supported a tail, made of two planes crossing each other at right angles, containing 20 inches each. (Citado en Gibbs-Smith, 1962, p. 18)

Tenemos aquí el primer caso de ensayo indirecto del vuelo de un planeador apoyado en el vuelo de una cometa. En años sucesivos, Cayley modifica y perfecciona sus planeadores, a la vez que estudia nuevos métodos de propulsión mediante alas batientes o rotativas. Como vamos a ver, la cometa sigue siendo una fuente de inspiración para Cayley a lo largo de sus análisis. En 1818, describe en una carta dirigida a lord John Campbell (1777-1847), un nuevo modelo de planeador, en el que usa dos cometas, una grande curvada para el ala, y una más pequeña para la cola:

A child's kite furnishes a good experiment on the balancing and steering of aerial vehicles, with a smaller one put the reverse way as a rudder stuck on by thick wire, so as to be set properly, and a weight to fasten to the middle stick till it will sail from the top of a hill slanting to the bottom, with perfect steadiness, obeying the rudder which should be turned a little up, and oblique to either side the steering is required: the bow of the large kite should be bent up thus (Fig. 64.2b) by a bit of stick and a string. I have made surfaces of this kind carry down weights as high as 80 or 90 [lbs.] with perfect steadiness and steering to either side at pleasure. (Citado en Gibbs-Smith, 1962, p. 85)

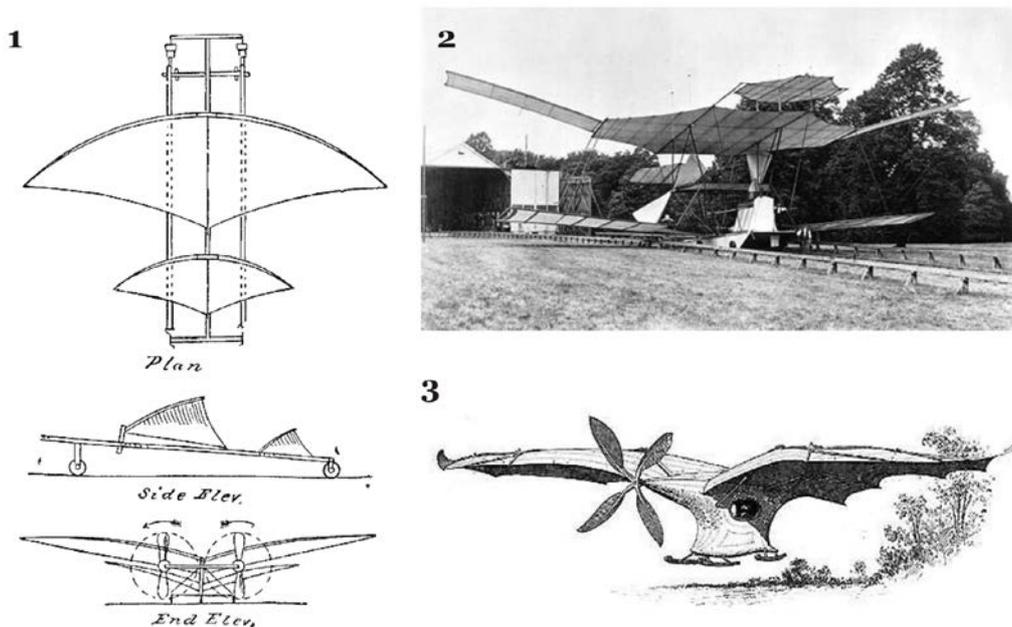
En el año 1852 se publica en la revista *Mechanics' Magazine* (Gibbs-Smith, 1962, pp. 149-57) la descripción de lo que Cayley denomina *Governable Parachutes* (Fig. 64.3). Según Gibbs-Smith (1962, p. 149), esta máquina es la primera aeronave en un sentido moderno diseñada y completamente desarrollada por Cayley: un planeador sin ningún medio de propulsión. Estaba pensado para ser lanzado desde un globo y poseía unas alas, que recuerdan a una cometa plana similar a los otros planeadores descritos, en las que se podía variar el ángulo de incidencia y dos colas, para el control de la elevación y cabeceo.



**Fig. 64** Planeador de Cayley de 1804 (1). Planeador de Cayley (1818) (2). *Governable Parachutes* (1852) (E) cola para el control de elevación y cabeceo, por parte del piloto. (D) Cola ajustable mediante el cable (B) (3)

Tras estas primeras experiencias aparecieron, a lo largo del siglo XIX, múltiples propuestas de diseños de máquinas voladoras, más o menos viables, que emplean como elemento sustentador tres tipos de diseños basados en tres posibles modelos a escala: la cometa, la vela, o las alas de un pájaro o murciélago. Así, por ejemplo, en 1879 el inglés

Thomas William Moy (1828-1910), exhibe en una reunión de la *Aeronautical Society of Great Britain*, un pequeño aeromodelo (Fig. 65.1), que describe como una cometa militar (*military kite*) montada sobre ruedas y provista de un mecanismo de propulsión (Gibbs-Smith, 1960, p. 21).



**Fig. 65** Monoplano de Moy (1879) (1). Máquina voladora de Maxim (1874) (2). *Éole* de Ader (1890) (3)

Pero no sólo se necesitaba una superficie sustentadora. Había que encontrar un motor capaz de dar la potencia necesaria para vencer la gran resistencia del aire y alcanzar una velocidad mínima que genere la sustentación necesaria para equilibrar el peso. Esto era un nuevo reto tecnológico: se ensayaron motores movidos por gomas o por aire comprimido, e incluso pesadas máquinas de vapor, como la usada por el ingeniero francés Clément Ader (1841-1925) a finales del siglo XIX. En 1890 su *Éole* (Fig. 65.3), artefacto volador construido con unas alas de murciélago articuladas de 14 m de envergadura y un peso de 300 kg, voló una distancia de 50 m. (Anderson, 2002, pp. 57-8). Máquina pequeña comparada con la construida por el ingeniero americano Hiram Stevens Maxim (1840-1916), con un peso de más de tres toneladas (Fig. 65.2), provista también de una máquina de vapor para impulsarla. En 1894 se levanta del suelo unos segundos (Anderson, 2002, pp. 52-7).

Todas estas pruebas realizadas en la última década del siglo XIX representaron un importante avance para la tecnología del aeroplano (Anderson, 2002, p. 64). Nos

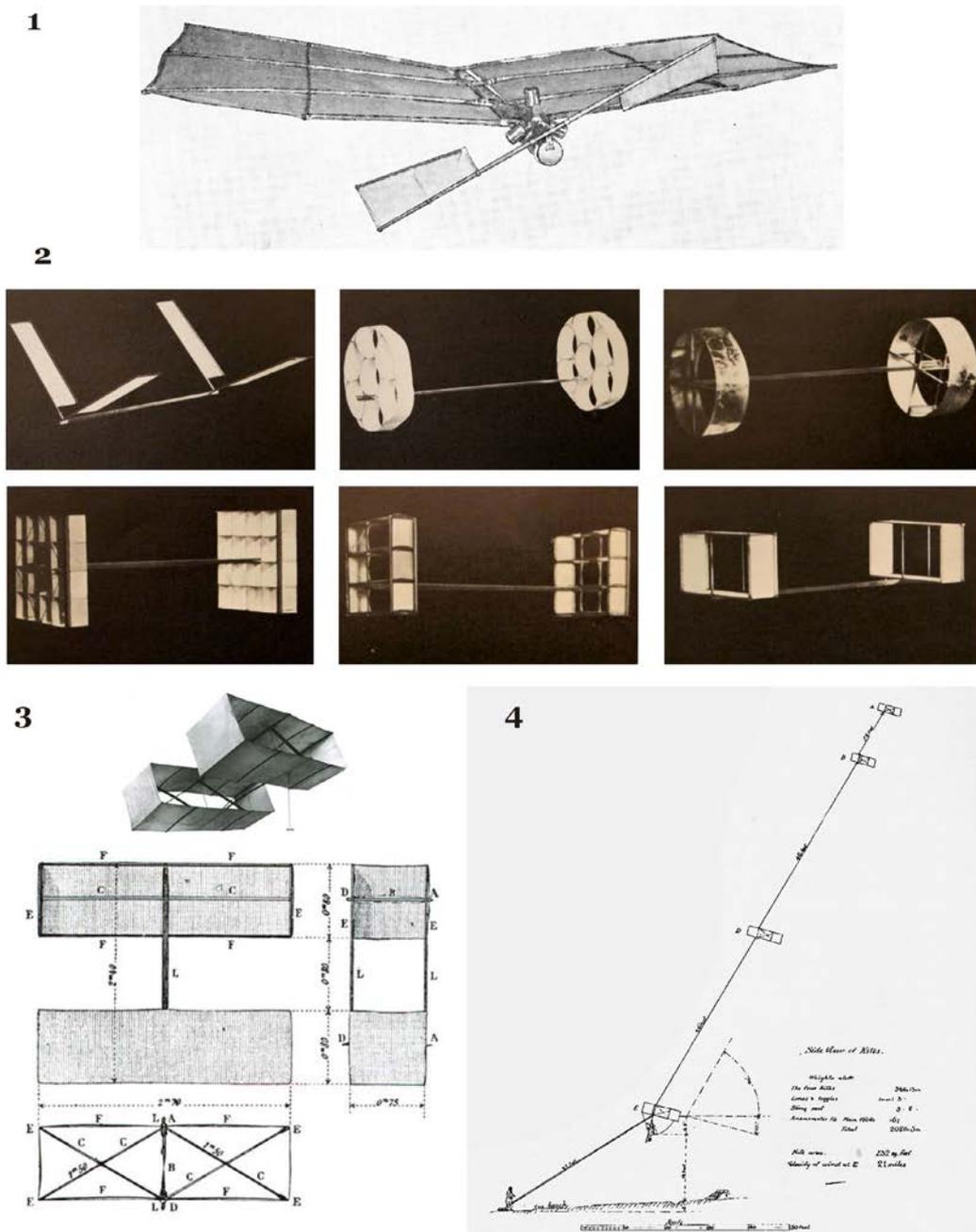
concentraremos ahora en la fase siguiente, en la que se procede a una investigación sistemática de la forma del ala mediante ensayos indirectos con ayuda de cometas y planeadores.

### 3 LA OBRA AERONÁUTICA DE LAWRENCE HARGRAVE. LA COMETA CELULAR

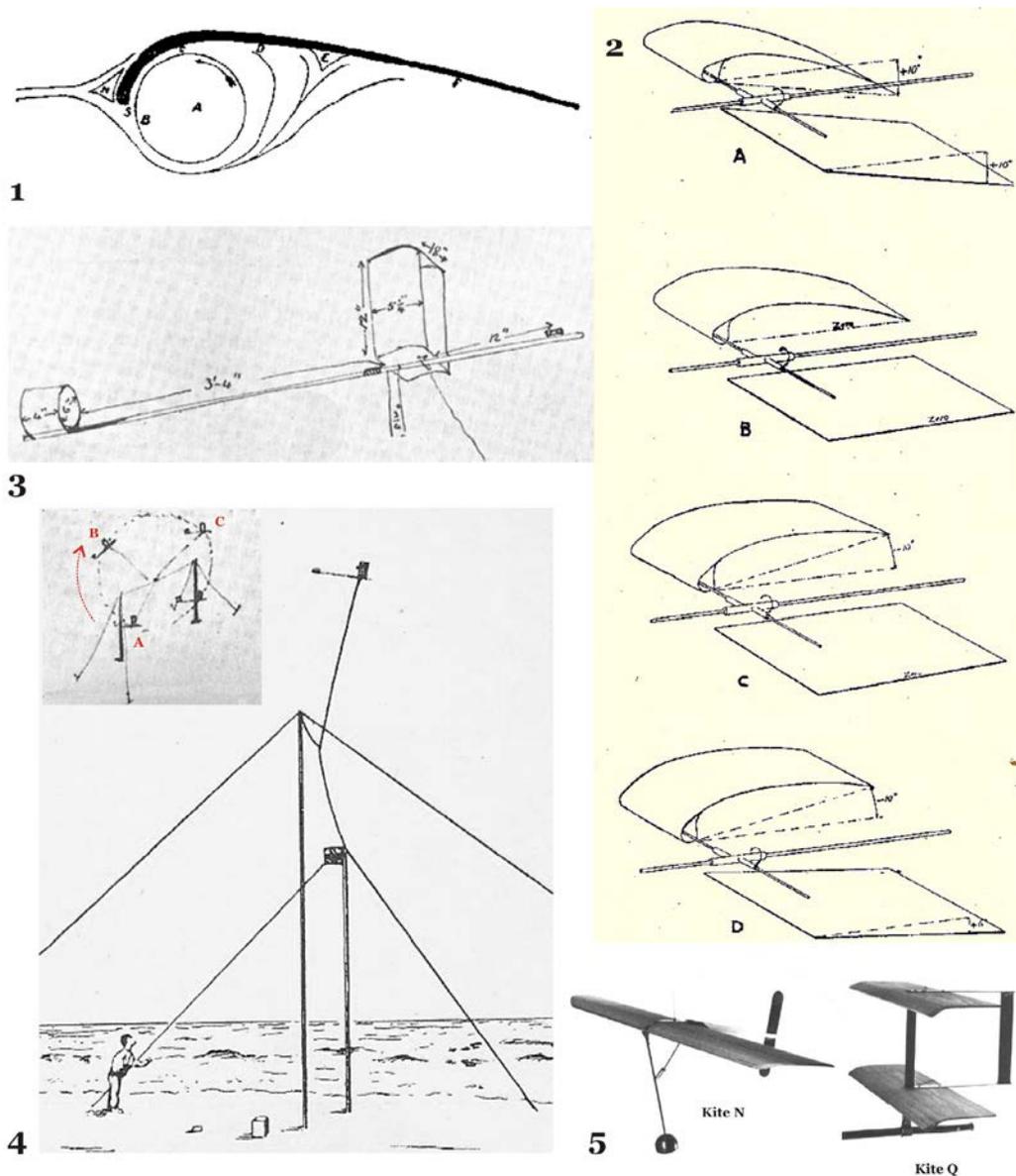
Lawrence Hargrave nació en Inglaterra en 1850, pero de joven emigra a Nueva Gales del Sur (Australia), donde su padre es destinado como juez. Allí entró a trabajar en la *Australian Steam and Navigation Company* durante cinco años, lo que le supone una formación en ingeniería. En 1872, el joven Hargrave se enrola en una expedición por Nueva Guinea, con el naturalista italiano Luigi Maria D'Albertis (1841-1901) (Shaw & Ruhen, 1977, pp. 25-34). Tras regresar de la expedición, en el año 1877, se establece en Sidney, ocupando un puesto de ayudante en el *Observatorio Astronómico* de la ciudad (Shaw & Ruhen, 1977, p. 38).

En 1880, empezó a interesarse por la aerodinámica del vuelo de artefactos más pesados que el aire. Sus primeros trabajos se centran en el estudio de modelos de primitivas máquinas voladoras propulsadas por motores de gomas o aire comprimido (Fig. 66.1) (Roughley, 1937, pp. 5-22), algunas de ellas con sistemas de *alas batientes*. En 1893, publica un artículo en la *Journal of the Royal Society of New South Wales* (de ahora en adelante: *JRSNSW*), donde describe sus primeros experimentos con cometas (Hargrave, 1893a). Parte del principio aerodinámico enunciado en 1866 por Wenham, que establecía que la configuración de dos o más superficies una encima de otra, producía una mayor sustentación, que con una sola más larga (Hargrave, 1893a, p. 78). Construye varias formas de cometas (Fig. 66.2), siendo la configuración más eficaz la formada por dos celdas rectangulares por su gran estabilidad y fuerza de elevación (*Cellular Kite*) (Hargrave, 1893b, 1896 Plate VII). (Fig. 66.3). En los años siguientes realiza ensayos, que publica en 1895 en la *JRSNSW* (Hargrave, 1895), señalando que las superficies con una cierta curvatura, conseguirán una mayor fuerza de elevación, (Hargrave, 1895, p. 45 Plate VI y VII). En este artículo describe como el 12 de noviembre de 1894, en la playa de *Stanwell Park* (Nueva Gales del Sur. Australia), Hargrave se elevó del suelo sujeto a un tren de cuatro de sus cometas (Hargrave, 1895, p. 44 y Plate XI) (Fig. 66.4). Estas pruebas le hacen concluir que volar con una máquina es posible:

The particular steps gained are the demonstration that an extremely simple apparatus can be made, carried about, and flown by one man; and that a safe means of making an ascent with a flying machine, of trying the same without any risk of accident, and descending, is now at the service of any experiment who wishes to use it. (Hargrave, 1895, p. 47)



**Fig. 66** Máquina voladora de motor aire comprimido (1891) (1). Cometas experimentales (1893) (2). Reproducción y plano de la cometa celular de Hargrave (3). Tren de cometas de Hargrave, con el que voló el 12 de noviembre de 1894, en la playa de Stanwell Park (Nueva Gales del Sur, Australia) (4)



**Fig. 67** Remolino formado según Hargrave debajo de una superficie curva de un ala (Hargrave, 1898, p. 219) (1). Aparato experimental de Hargrave para demostrar la mayor sustentación generada por una superficie curva (2). *Soaring kite* (1897) (3). Dispositivo experimental para probar la eficacia de las cometas playa de *Stanwell Park* (Nueva Gales del Sur, Australia). Soltando la cometa en A, comprobaba si volaba a sotavento (B) o a barlovento (C), es decir, avanzaba respecto del viento, como hacen los pájaros cuando planean (4). *Soaring Machines* (1898) (5)

En 1897, Hargrave publica un artículo en la *JRSNSW* titulado *The Possibility of Soaring in a Horizontal Wind* (Hargrave, 1897), su objetivo era explicar la capacidad que tienen ciertas aves de volar horizontalmente contra el viento, sin necesidad de batir las alas. Hargrave estaba convencido de que esta facultad de las aves estaba relacionada

con la forma curvada<sup>7</sup> de sus alas, que propiciaba la aparición de un vórtice por debajo de la superficie combada (Fig. 67.1), generando una depresión permitiendo al ala sustentarse y avanzar sobre la corriente de aire. La presencia de dicho remolino lo visualizó observando el movimiento de la llama de una vela colocada debajo de un perfil de aluminio con la forma del ala de una gaviota (Roughley, 1937, p. 29). Para demostrar la ventaja de usar alas con superficies curvadas frente a las planas realiza una serie de experimentos. En uno de ellos, utiliza un original mecanismo, formado por una varilla horizontal, en cuyos extremos se colocaban dos perfiles de ala, uno con curvatura y el otro plano. Al pesar ambos lo mismo, si se ponían en una corriente de aire, bajo un mismo ángulo de incidencia, dependiendo a qué lado girase se podía comprobar quien generaba más sustentación, así en A, C y B ganaba el perfil curvo y en D el plano (Fig. 67.2).

En 1897, en playa de *Stanwell Park* (Nueva Gales del Sur. Australia), vuelve a realizar ensayos indirectos con cometas, pero esta vez son modelos especiales de cometas con las alas curvadas (*soaring kites*), que simulan las alas de las aves (Fig. 67.3). Para evitar que los modelos puedan romperse si se estrellan contra el suelo emplea el siguiente dispositivo experimental: une con una cuerda los extremos de dos postes verticales, clavados, a una cierta distancia, en la arena de la playa. En medio de dicha cuerda ata el hilo de la cometa a ensayar. Esta línea posee una longitud menor que la altura de los postes, de esta forma si pierde sustentación la cometa no chocará contra el suelo (Fig. 67.4) (Hargrave, 1897, pp. 211-3). En uno de los postes coloca una bandera para que conocer la dirección del viento. Como método de ensayo emplea una variación de parámetros, en este caso varía la forma, configuración, superficie del ala y peso de la cometa, comprobando su vuelo con un viento horizontal con una determinada velocidad. Si la cometa vuela con un ángulo hacia barlovento de la vertical de los postes, es decir, avanzando frente al viento (Fig. 67.4C), es como lo hacen los pájaros:

I stand to leeward of the poles and start the soaring kite at a positive angle; it then flies as an ordinary kite to near the zenith. The vortex then forms under the curved aluminium surfaces and draws the apparatus at the full stretch of the string and cord, through 180 degrees of arc to windward of the poles.

The flag shows the wind to be horizontal, and the string that is plainly visible in the photograph shows the soaring kite pulling about 20 degrees to windward of the zenith. The

---

<sup>7</sup> En los experimentos con túneles de viento, Phillips habían puesto de manifiesto que una superficie curva, al contrario que le pasa a una superficie plana, presenta sustentación bajo un ángulo de inclinación respecto al viento igual a cero, es decir en un vuelo horizontal (Anderson, 2002, p. 51).

wind was blowing at 12 or 14 miles per hour, which was inadequate to effect the best pull the affair was capable of. (Hargrave, 1897, pp. 211-2)

En el año 1898 publica en la *JRSNSW* el artículo *Soaring Machines* (Hargrave, 1898). Allí describe una serie de ensayos indirectos con unos pequeños modelos de máquinas voladoras formadas por alas curvas de aluminio provistas de un timón de profundidad y lastradas bajo el ala, con el fin de simular el peso del piloto (Fig. 67.5). En realidad son planeadores (de ahí el nombre de *soaring machines*), que los ensaya en la playa volándolos como cometas en el mismo dispositivo empleado en 1897 (Fig. 67.4), su justificación es:

It may be thought that it would be more conclusive if the models were allowed perfect freedom. This matter has not escaped consideration, and the reasons for not working with free apparatus at present still hold good. By using the captive method, any amount of skill and patience expended in the manufacture of the soaring machine is amply repaid by its possession and the knowledge that the experiment can be repeated under similar conditions. Whereas if the free method were used, a form that merely wanted a little adjustment to be perfect, would frequently be smashed or lost in the sea without anything remaining to show its defects or lead to rapid improvement.

Of course if I lived in the centre of a sandy plain, with numerous assistants to make and repair constructions of my design, certain advantages would accrue, but at present I try to make the utmost use of the facilities at my disposal. (Hargrave, 1898, p. 218)

Por lo tanto, lo importante es no perder el modelo y así poder comparar los experimentos bajo las mismas condiciones. Variando configuraciones, superficie, así como la posición y peso del lastre, comprueba que máquina vuela de manera estable hacia barlovento, en función de la velocidad del viento y del lastre (Hargrave, 1898, p. 220). Hargrave continuó hasta el final de sus días, en 1915, realizando estudios y descubrimientos relacionados con la aeronáutica, sin llegar nunca a patentar ninguna de sus cometas o *soaring machines*, ya que prefirió que fueran de dominio público para todo aquel que quisiera utilizarlos (Hart, 1982, p. 137).

La cometa celular de Hargrave tuvo así una gran difusión e influencia en la forma de las alas de los aeroplanos y planeadores, donde se verificó su gran estabilidad y sustentación. Así, un ejemplo, en las alas de los planeadores y aeroplanos construidos en Francia, en la primera década del siglo XX, las cometas de Hargrave están muy presentes: por ejemplo, en los construidos por los hermanos Gabriel Voisin (1880-1973) y Charles Voisin (1882-1912) (Fig. 68.1-2) (Gibbs-Smith, 1960, pp. 52 y 68). Otro ejemplo lo tenemos en el aeroplano *I4bis* (Fig. 68.3) del brasileño Alberto Santos-Dumont (1873-1932), que voló en Francia en 1906 (Gibbs-Smith, 1960, pp. 53-4), o en

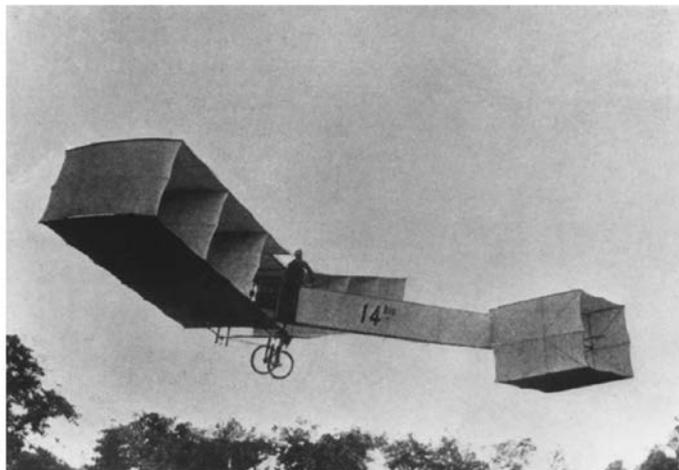
los experimentos que en Estados Unidos llevaron a los hermanos Wright a realizar su primer vuelo controlado, como veremos más adelante.



**1**



**2**



**3**

**Fig. 68** Planeador con flotadores de Voisin-Archdeacon (1905) (1). Aeroplano-Farman (1909) (2). Aeroplano 14bis de Santos-Dumont (1906) (3)

## **4 LA COMETA COMO ENSAYO DEL AEROPLANO**

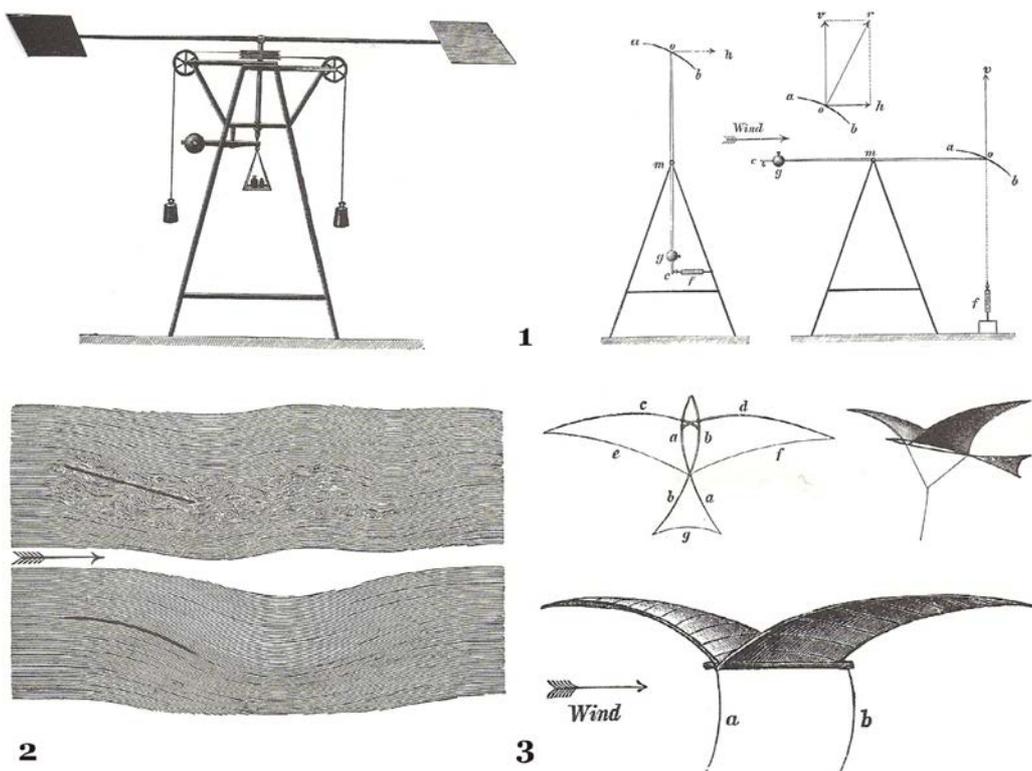
### **4.1 ENSAYOS CON PLANEADORES Y COMETAS**

La cometa celular desarrollada por Hargrave ofrecía una prometedora forma para las alas, pero para ser usada como un aeroplano, es decir, sin un hilo que la sujetara a tierra, había que hacerla estable y controlable. Los estudios con planeadores dieron con la solución.

En 1866, el ingeniero alemán Otto Lilienthal (1848-1896) inicia una serie de experiencias, que se prolongará con algunas interrupciones hasta 1889. Se sirvió de dos dispositivos experimentales: una balanza giratoria, similar a la empleada por Cayley, y un dispositivo para realizar las mediciones de superficies expuestas a un viento real

(Fig. 69.1) (Anderson, 1997, pp. 138-55). Lilienthal realiza una serie de mediciones de la sustentación y la resistencia de una variedad de superficies planas y curvadas para distintas velocidades del aire y ángulos de inclinación (Anderson, 1997, p.139). Los resultados de estas mediciones son publicadas en 1889 en su obra *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst* (Lilienthal, 1889/2001), donde se muestra una vez más, como ya había hecho Phillips con su túnel de viento o Hargrave en sus ensayos con las *soaring machines*, que la sustentación y la resistencia de una superficie expuesta al viento, si esta curvada genera para un mismo ángulo de inclinación una mayor sustentación que si es plana:

Experiment enables us to determine the actual degree of superiority of curved over plane wing, but in view of the importance of this matter we must obtain a perfect conception of the nature of this phenomenon. (Lilienthal, 1889/2001, p. 56)



**Fig. 69** Balanzas utilizadas por Lilienthal para hallar las fuerzas generadas en los perfiles (1). Recorrido de una corriente de aire sobre un plano y una superficie curva según Lilienthal (2) Cometas de Lilienthal (1874) (3)

En este caso, al contrario que Hargrave, no realiza experimentos con el fin de trazar el recorrido del viento y comprobar el origen del fenómeno, sino que especula sobre el mismo. Lilienthal supone que el origen de esta propiedad se encuentra en cómo

*contornea* el aire en una superficie curva (Fig. 69.2). Esto hace que aparezca una onda más perfecta que en un plano, ejerciendo una sustentación más efectiva de acuerdo con el principio de acción-reacción<sup>8</sup> (Lilienthal, 1889/2001, p. 58).

La observación del vuelo de los pájaros y de las formas de sus alas, le lleva a realizar ensayos con cometas, según relata en su obra (Lilienthal, 1889/2001, pp. 90-4). En el mes de septiembre de 1874 construye una cometa cuya forma de alas, cuidadosamente curvadas, recuerda a las aves marinas que emplean el planeo como técnica de vuelo (Fig. 69.3). Controlando la cometa con dos hilos la “obliga” a mantenerse paralela a la dirección del viento y tras soltar en amarre comprueba que realiza un planeo durante más de 50 metros, antes de engancharse en unos árboles:

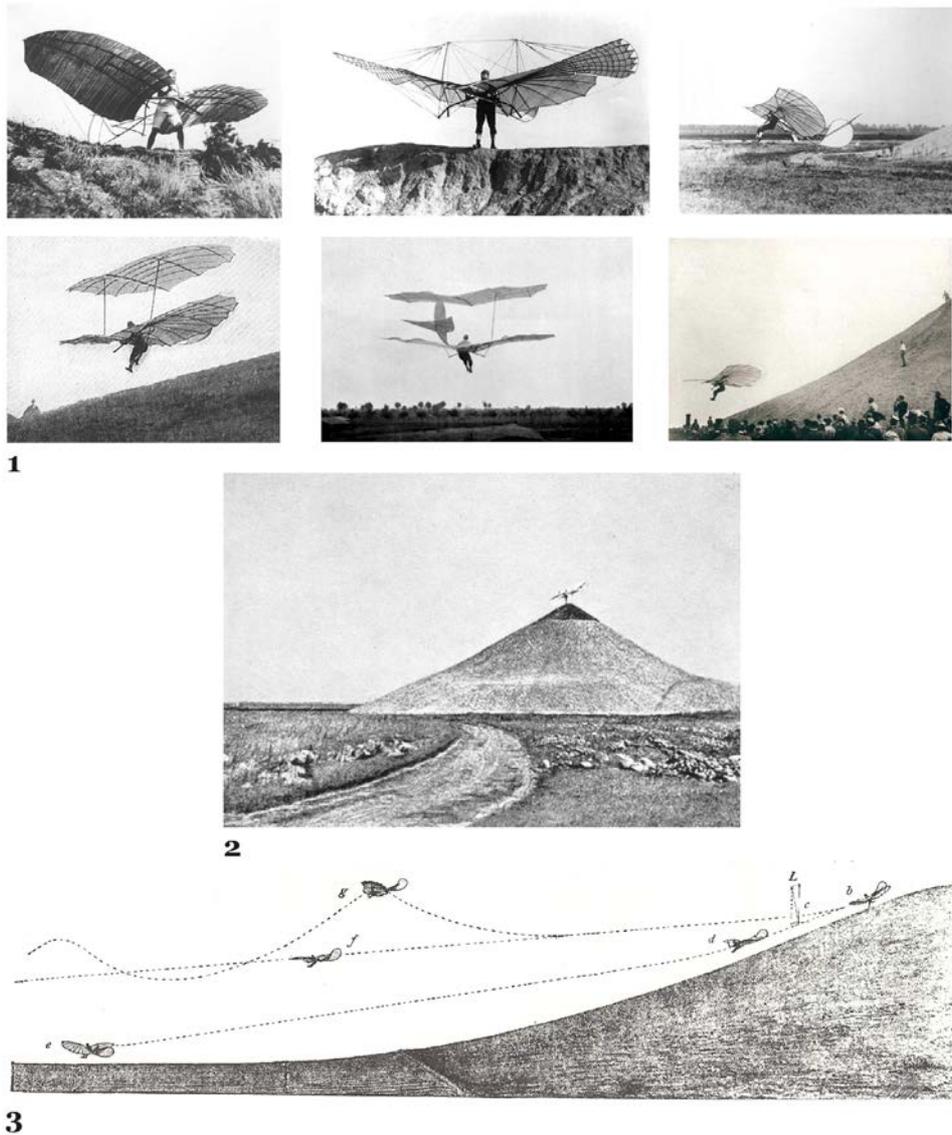
We returned home, after this experiment (September, 1874), with the conviction that sailing flight was not the exclusive prerogative of birds, but that the possibility of man flying in this manner was established, since no powerful movement of wings, but only a skilful direction of the wings, was required for purpose. (Lilienthal, 1889/2001, p. 94)

En esta experiencia tenemos, como en Cayley, un ensayo indirecto sobre la posibilidad de construir una máquina voladora a partir de una cometa. Lilienthal está convencido que si se quiere volar hay que emular a los pájaros. Por lo tanto, tras los resultados obtenidos en los ensayos con perfiles de alas, los complementa construyendo planeadores (Fig. 70.1). En 1889 Lilienthal, junto con su hermano Gustavo, construye un ala de 11 metros, donde la sección de la misma esta curvada, aplicando sus experimentos con superficies curvas, situado en el medio de ellas. No despegó, pero comprueba que la estructura posee una gran fuerza de sustentación (Anderson, 2002, p. 59), este será el primero de las diferentes máquinas que probará en los años siguientes<sup>9</sup>. En 1894 construye una colina artificial en *Gross Lichterfelde*, cerca de Berlín (Fig. 70.2). La forma cónica de la misma le permite lanzarse independientemente de la dirección del viento (Anderson, 1997, p. 158). En 1896 la gran inestabilidad de uno de ellos, hace que Otto Lilienthal, sufra un fatal accidente en el que muere.

---

<sup>8</sup> El modelo teórico que explicó de manera efectiva como se produce la sustentación en una superficie curva inclinada al viento no se desarrolló hasta los años 1918-19, consecuencia de los trabajos del ingeniero inglés Frederick Lanchester y sobre todo del ingeniero y físico alemán Ludwig Prandtl (Anderson, 1997, pp. 282-92).

<sup>9</sup> Lilienthal construyó dieciocho modelos de planeadores entre los años 1891 y 1896, incluyendo dos biplanos y un modelo de alas batientes (Hallion, 2003, p. 164).



**Fig. 70** Planeadores de Lilienthal (1). Colina artificial en *Gross Lichterfelde* (Berlin) (2). Diferentes recorridos de los distintos planeadores desde la colina de *Gross Lichterfelde* (3)

El mismo año de su muerte se publica en el *Aeronautical Annual* un artículo de Lilienthal, con el título *Practical experiments for development of human flight* (Lilienthal, 1896). En este escrito resume sus ensayos directos con máquinas voladoras, indicando que el problema de volar no debe ser tratado globalmente, sino que requiere el estudio de varias variables por separado:

Those proceeding on this basis therefore applied themselves, not to the problem of flying as a whole, but rather divided it into its elements, and sought first to bring a clear understanding into said elements which should form the basis of final success. For example, take the laws of atmospheric resistance, upon which all flying depends, and regarding which, until very recent years, the greatest uncertainty has existed; these have

now been defined to such an extent that the different phases of flight can be treated mathematically. Besides which, the physical processes of the natural flight of the creatures have become the subject of minute investigation, and have in most cases been satisfactorily explained. The nature of the wind also, and its influence on flying bodies, have been carefully studied, thus enabling us to understand several peculiarities of the birds' flight hitherto unexplainable, so that one can apply the results thus obtained in perfecting human flight. (Lilienthal, 1896, pp. 7-8)

Pero si se quiere construir una máquina voladora, no sólo se logrará de manera teórica, ya que aquellos:

[...] who have occupied themselves to any extent with actual flying experiments, have found that, even if they mastered theoretically the problem of flying, the practical solving of the same can only be brought about by a gradual and wearisome series of experiments based one upon the other. (Lilienthal, 1896, p. 8)

A continuación explica sus experiencias con sus planeadores. En esencia consisten en probar diferentes longitudes de alas, superficies y estructuras (monoplanos y biplanos), con las que consigue vuelos más distantes. Así por ejemplo encuentra que con un planeador biplano consigue mejores recorridos, incluso se eleva más alto, que el punto de partida (Fig. 70.3), cosa que no ocurría con un monoplano (Lilienthal, 1896, p.16). El tamaño y viento con el que puede volar, está limitado al control del vuelo, que sólo puede llevarlo a cabo desplazando con su cuerpo el centro de gravedad de la máquina (Anderson, 2002, p. 60).

Por lo tanto, Lilienthal realizó con sus planeadores ensayos directos con el objetivo de encontrar como los pájaros podían volar. Él creía que esa era la única forma de conseguir el vuelo mecánico. Su prematura muerte no le permitió proseguir con el siguiente paso en su plan, conseguir que la maquina avanzara batiendo las alas, como hacían las aves<sup>10</sup>.

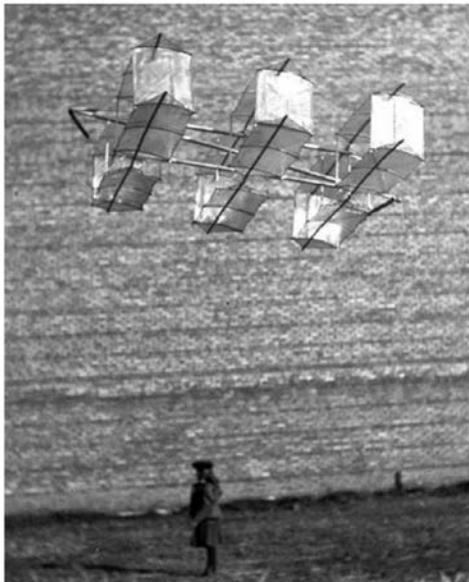
Octave Chanute (1832-1910), un ingeniero francés nacionalizado norteamericano publicó en 1894 el libro *Progress in Flying Machines* (Chanute, 1894/1997), divulgando y recopilando las aportaciones teóricas y prácticas producidas hasta el momento. Chanute también realizó su aportación prosiguiendo con los ensayos de Lilienthal, con el diseño de varios modelos de planeadores (Chanute, 1897). En 1895, contrata los

---

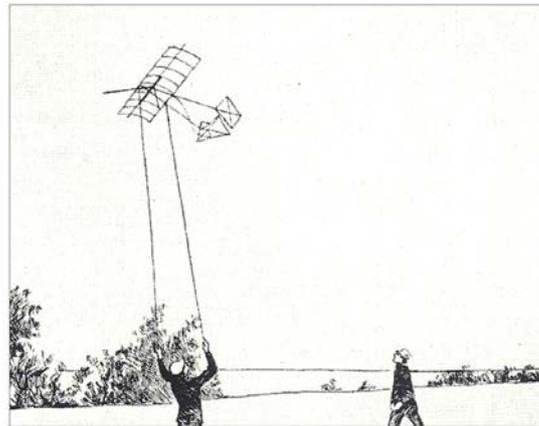
<sup>10</sup> “My experiments tend particularly in two directions. On the one side I endeavor to carry my experiments in sailing through the air with immovable wings to this extent; I practise the overcoming of the wind in order to penetrate, if possible, into the secret of continued soaring flight. On the other hand I try to attain the dynamic flight by means of flapping the wings, which are introduced as a simple addition to my sailing flights. The mechanical contrivances necessary for the latter, which can reach a certain perfection only by gradual development, do not allow yet of my making known any definite results.” (Lilienthal, 1896, pp. 11-2).

servicios del ingeniero Augustus M. Herring (1865-1926), con quien empieza a realizar ensayos indirectos con cometas. En la primavera de 1895 Herring construye y vuela la que denominan *Ladder Kite* (Fig. 71.1), su objetivo:

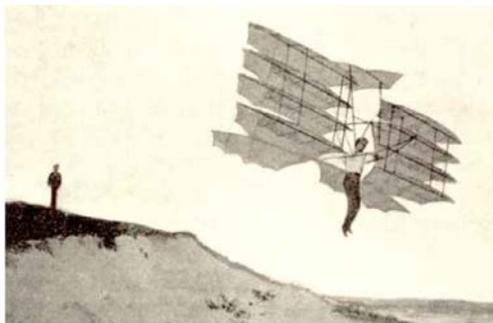
The construction of this kite permitted the grouping of surfaces in different arrangements, to test for equilibrium. When it displayed excellent stability in gusty winds, Chanute instructed Herring to build along similar lines the first of his famous “multiple-winged” gliders, with six sets of superposed wings [Fig. 71.2]. (Scamehorn, 2000, p. 27)



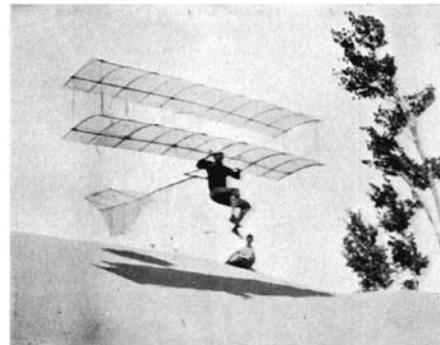
1



3



2



4

**Fig. 71** *Ladder Kite* de Chanute (1895), que construyó Herring (Short, 2011, foto p. 207) (1). Planeador basado en el trabajo de Lilienthal, formado por seis alas dobles (Chanute, 1897, Plate V) (2). Cometa de Herring (1896) (Herring, 1897, Plate XI) (3). Planeador biplano de Chanute (1896) (4)

Luego la cometa le proporciona cual es la configuración idónea de las alas de un planeador. En verano de 1896, con el fin de realizar ensayos directos con planeadores, se desplazan Chanute y Herring a las dunas de *Miller Beach*, (Indiana), uniéndoseles el ruso William Paul Butusov, y el electricista y carpintero William Avery, (Scamehorn,

2000, p. 28). En mayo de 1896 Herring realiza una serie de ensayos indirectos con una cometa provista de una superficie curva y un estabilizador de cola:

This kite, which is here shown [Fig. 71.3] in a 28-mile wind, possessed such perfect power in maintaining the surfaces at a small angle with the wind, through changes which would otherwise prevent it from flying at all, that, in momentary freshening or changes, it would rise until the strings passed the zenith and made an angle of 6 to 8 degrees beyond the vertical. The average angle maintained by the surfaces with the horizontal varied between such narrow limits that it could not be easily detected by the eye. From a number of observations it was found possible to set the regulator to maintain an angle of between 2 and 3 degrees (above horizontal), and calculations from the weight and surface of kite, the pull on the string, and its angle above the horizontal show that the lift and drift of the kite correspond very closely indeed with the theoretical ones computed from the annexed tables<sup>[11]</sup>. (Herring, 1897, pp. 67-8)

Como resultado de estos ensayos diseñaron un modelo de planeador biplano, con un perfil curvado, provisto de una cola cruciforme que le da al planeador un vuelo estable, con una clara influencia de la cometa de Hargrave (Fig. 71.4) (Gibbs-Smith, 1966, pp. 28-30).

#### **4.2 LOS ENSAYOS DIRECTOS CON COMETAS EN EL AEROPLANO DE LOS HERMANOS WRIGHT**

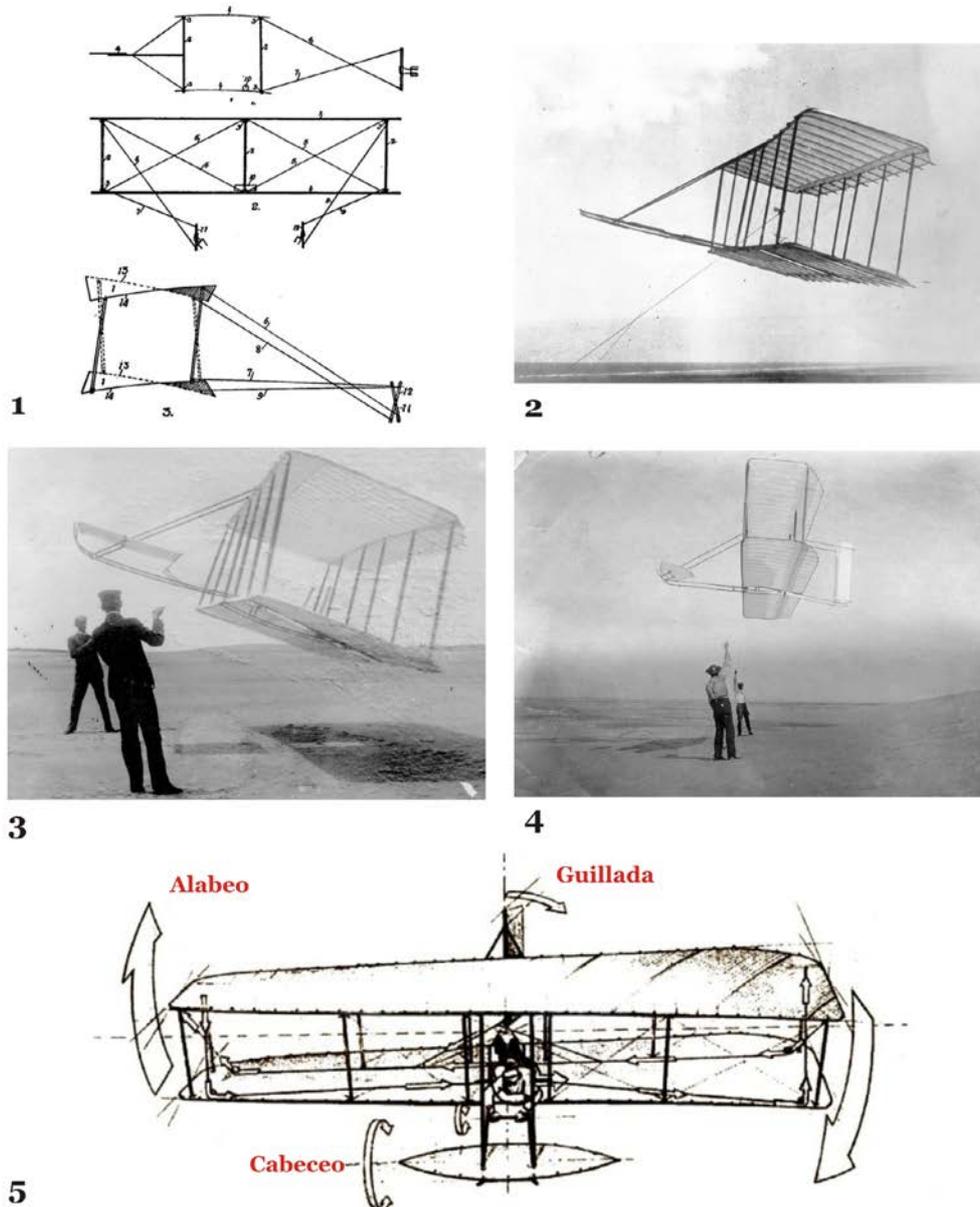
En este estado de cosas aparecen los hermanos Wilbur Wright (1867-1912) y Orville Wright (1871-1948), que como fabricantes de bicicletas comprendieron lo importante que es el equilibrio y control en una máquina voladora (Wright, 1953, p.12). Tras estudiar la obra de Lilienthal y Chanute idean un sistema de control para un planeador. En agosto de 1899 realizan un ensayo directo por medio de una cometa biplano. En esencia, es una cometa celular de Hargrave de planos curvados, en la que omiten las superficies verticales que cierran las celdas, que tenían una función de estabilizar la cometa en su vuelo (Hart, 1982, p. 151). Por lo tanto, para que la cometa vuele estable es necesario controlarla desde el suelo por medio de cuatro hilos (Fig. 72.1). El tira y afloja de los hilos provoca una torsión en las alas, produciendo un efecto alerón en ellas que ayuda a restablecerse el equilibrio de un modo dinámico (Wright, 1953, p. 13).

Los hermanos Wright ensayaron los sucesivos planeadores durante los años 1900, 1901 y 1902, haciéndolos volar antes como una cometa (Fig. 72.2-3-4). El principal

---

<sup>11</sup> Se refiere a las tablas con los valores de sustentación y resistencia en función del ángulo de incidencia y la velocidad del viento, calculados por Lilienthal (Anderson, 1997, p. 149). Herring verifica experimentalmente, con su cometa regulable, valores para 1, 2, 4, 11, 16, 19 y 20 grados. (Herring, 1897, nota p. 68).

propósito de estos ensayos es comprobar el sistema de control de los planeadores desde tierra antes de ser tripulados, así como la fuerza de sustentación del perfil del ala empleado. Por lo tanto, estamos ante un ensayo directo de las máquinas voladoras.

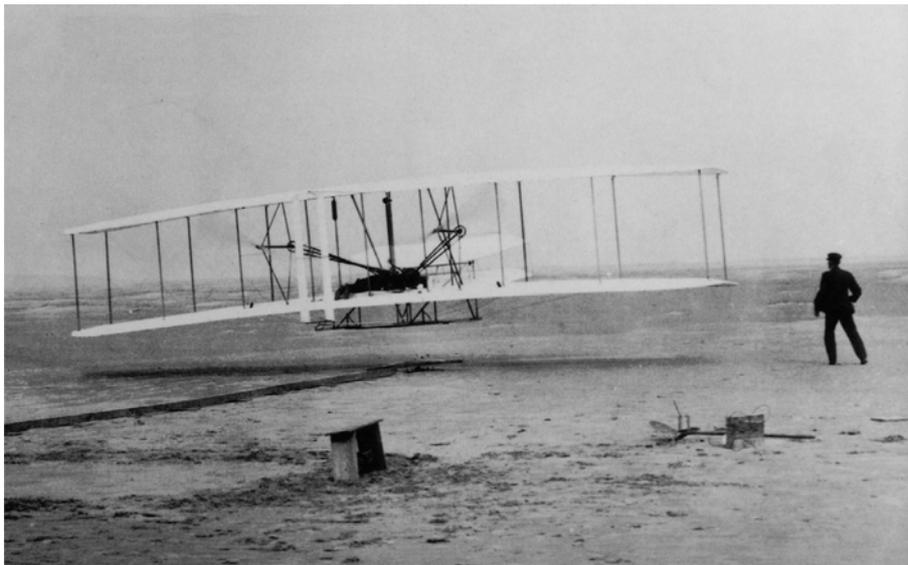


**Fig. 72** Dibujo de la cometa de 1899, realizado en 1912 no se conservan fotos de su vuelo (1). Planeador volando como una cometa el 5 de octubre de 1900 (2). Planeador de 1901 volando como cometa (3). Planeador de 1902 volando como cometa (4). Control de los tres ejes (cabeceo, alabeo y guillada) del *Flyer I* (5)

La falta de sustentación en el planeador de 1901 les hace llegar a la conclusión de que el perfil empleado en las alas, basado en las mediciones de Lilienthal (Wright, 1953, p.15), no da los resultados previstos. Deciden entonces realizar mediciones en su

taller de bicicletas de Dayton (Ohio) por medio de un túnel de viento (Anderson, 2002, pp. 105-11), obteniendo un nuevo perfil de ala más eficaz, que prueban con éxito a finales de 1902 en presencia del mismo Chanute. Este planeador controlado en los tres ejes: cabeceo (timón de profundidad delantero), alabeo (torsión de las alas) y la guiñada por medio de un timón móvil trasero añadido para una mayor maniobrabilidad (Fig. 72.5). Este mismo año Chanute le sugiere que dada las prestaciones del planeador sería interesante añadir un motor, el cual debe ser ligero y potente, y estar provisto de unas alas rotatorias (hélices) (Anderson, 2002, pp. 118-23). Tras un año de trabajo en este sistema de propulsión construyen el *Flyer I*, el cual vuela de manera controlada el 17 de diciembre 1903 en *Kitty Hawk* (Carolina del Norte), aceptándose como el primer vuelo de un hombre<sup>12</sup> en una máquina voladora autopropulsada y controlada (Fig. 73):

Wilbur and Orville Wright were the first men to make powered, sustained and controlled flight in an aeroplane, and land on ground as high as that from which they took off. They were also the first to make and fly a fully practical powered aeroplane. (Gibbs-Smith, 1966, pp. 35-6)



**Fig. 73** Vuelo del *Flyer I*, el 17 de diciembre de 1903, pilotado por Orville, corriendo en el lado del ala Wilbur

## 5 EL AUGE DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL

El éxito del vuelo de los hermanos Wright hizo que el mundo académico, hasta entonces indiferente, se interesara por dar una explicación de por qué volaban estas

---

<sup>12</sup> Unos días antes, el 8 de diciembre de 1903, un aeroplano, conocido con el nombre de *Great Aerodrome*, diseñado por el astrónomo norteamericano Samuel Langley (1834-1906) y pilotado por el ingeniero Charles M. Manly, se había estrellado tras despegar desde una catapulta instalada en una barcaza en el río Potomac (Hallion, 2003, pp.145-57).

máquinas más pesadas que el aire (Anderson, 1997, pp. 260-1). En la primera década del siglo XX aparecen los trabajos del ingeniero ruso Nikolái Joukowsky (1847-1921), del físico y matemático alemán Wilhelm Kutta (1867-1944), el ingeniero inglés Frederick Lanchester (1868-1946) y el ingeniero y físico alemán Ludwig Prandtl (1875-1953), entre otros (Kármán, 1954, pp. 31-58). Estos modelos teóricos explicaron de manera efectiva como se produce la sustentación en las alas de los aeroplanos, por lo que tuvieron un gran impacto en el diseño de las maquinas voladoras, gracias a la transferencia tecnológica entre estos estudios y el diseño de aeroplanos en las décadas posteriores (Anderson, 2002, pp. 132-82).

Estos modelos permitieron pasar del esquema de ensayos indirectos preteóricos sobre la forma de las alas a partir de cometas a ensayos donde el cambio de escala era objeto de verificación matemática. El análisis dimensional fue desarrollado formalmente en 1914 por el físico americano Edgar Buckingham (1867-1940), con la formulación de su Teorema- $\Pi$  (Sterrett, 2009, p. 818-21). El análisis de Buckingham parte de que todo sistema físico se define por un número de variables independientes que lo especifican. Si por medio de un experimento quisiéramos comprobar la dependencia de una de ellas con el resto, lo que habría que medir sería su variación con una de ellas, manteniendo el resto constante. Esto implicaría una gran cantidad de pruebas. El teorema propone transformar esas variables por otras sin dimensión, formadas a partir de las variables implicadas, denominadas grupos adimensionales. Con esto se consigue reducir el número de variables independientes que especifican un problema (Sterrett, 2009, p. 820). Así un problema que requiere muchas pruebas experimentales puede resolverse con un menor esfuerzo por medio del análisis dimensional. El uso de estos grupos adimensionales hizo posible que se sistematizara el estudio con modelos a escala de aeroplanos.

La validez de los ensayos en un túnel de viento por medio de modelos a escala se fundamenta en lo que se conoce como semejanza física (Zwart, 2009, pp. 772-3): si dos fenómenos físicos responden a una misma formulación, la solución para uno de los fenómenos es también válida para el otro. Así, existe una relación entre las fuerzas que actúan sobre un aeroplano y las medidas con un túnel de viento sobre un modelo a escala del mismo (Zwart, 2009, pp. 769-80). Pero para que esta semejanza se cumpla, una vez asegurada la semejanza geométrica, hay que aplicar el análisis dimensional, ya que se debe cumplir que los grupos adimensionales involucrados en el fenómeno deben

tener el mismo valor en el aeroplano a escala real y en el modelo (Sterrett, 2009, p. 801).

Por lo tanto, el desarrollo del análisis dimensional permitió por un lado reducir el número y complejidad de las variables que intervenían en la descripción de un fenómeno físico, en este caso las fuerzas involucradas en las alas aeroplano. Por otra parte el análisis dimensional permitía relacionar los datos medidos en un modelo a escala generando una serie de datos que podían ser utilizados en aeroplano a escala real. El vuelo de la cometa como modelo a escala tocó así a su fin. No obstante, como veremos en la sección siguiente, tuvo todavía su canto del cisne.

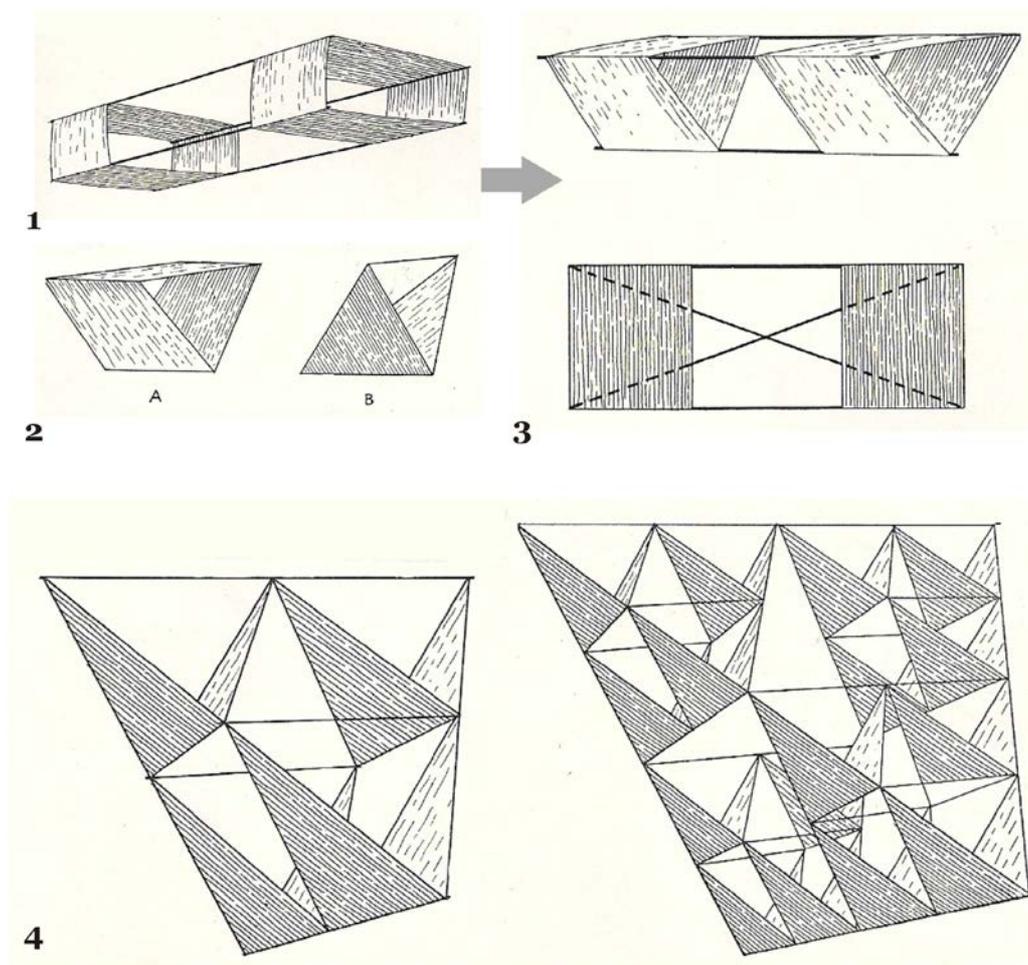
## 6 EPÍLOGO: LAS COMETAS TETRAÉDRICAS DE ALEXANDER GRAHAM BELL

Después del año 1895, tras haber patentado el teléfono<sup>13</sup>, el interés de Alexander Graham Bell (1847-1922) se dirige fundamentalmente a la aeronáutica. En el año 1901, en su residencia de *Cape Breton* en Canadá, inicia experiencias con cometas con el fin de establecer una estructura estable y con un gran poder sustentador con el fin de construir un aeroplano tripulado (Parkin, 1964, p. 4).

En el año 1903 expone sus conclusiones en un artículo titulado *The Tetrahedral Principle In Kite Structure* que publicó en el *National Geographic Magazine* (Bell, 1903). Bell explica la superioridad del tetraedro frente a las cometas celulares de Hargrave, ya que conforme esta cometa se construye con un tamaño más grande su estructura requiere elementos cada vez más pesados. Además es necesario colocar tensores en forma de diagonal para evitar que la cometa se colapse. Sin embargo, estos elementos complican el vuelo, “[...] adding to the *drift* of the kite without contributing to the *lift*” (Bell, 1903, p. 221). Por lo tanto, sólo hay que transformar la celda rectangular de Hargrave (Fig. 74.1) en una triangular (Fig. 74.3), de esta forma evita la varillas tensoras diagonales, pero da un paso más, y comprueba que la celda triangular (Fig. 74.2A) se pueda transformar en un tetraedro (Fig. 74.2B). Partiendo de esta celda básica construye estructuras volantes cada vez más complejas (Fig. 74.4).

---

<sup>13</sup> En 1860, el inventor italiano afincado en Estados Unidos, Antonio Meucci (1808 – 1889), presenta su invento que denomina *teletrófono*, pero al ser incapaz de reunir la cantidad de 250 dolores que cuesta una patente, tiene que conformarse con un trámite preliminar que registra el 28 de diciembre de 1871 y que sólo puede renovar en 1872 y 1873. En 1876, Alexander Graham Bell registró su patente, que realmente no describe el teléfono pero lo refiere como tal. Cuando Meucci se entera, pidió a su abogado que reclamara ante la oficina de patentes, algo que nunca sucedió. Meucci murió en 1889, sin el reconocimiento de la primicia de su invento, no sería hasta el 2002, cuando la Cámara de Representantes de los Estados Unidos, reconoce que fue Meucci antes que A. Graham Bell el inventor del teléfono. Véase Meucci (2010).



**Fig. 74** Dibujos de las estructuras tetraédricas básicas en el artículo del *National Geographic Magazine*

En 1901, el astrónomo norteamericano Simon Newcomb (1835-1909) había publicado en la revista *McClure's Magazine* un artículo titulado *Is the Air-ship Coming?*, en el que intentaba demostrar que volar con una máquina más pesada que el aire era físicamente imposible (citado en Bell, 1903, pp. 226-8). Su argumento se basaba en que si partimos de una estructura voladora pequeña, que sabemos que vuela, y la aumentamos su tamaño para que pueda transportar un hombre, el volumen aumentará al cubo de sus dimensiones lineales, pero su superficie sólo al cuadrado. Como su peso depende de la densidad del material con el que está fabricado (que, a la vez, depende del volumen), pero la fuerza de sustentación depende de la superficie, Newcomb concluía que para que la máquina voladora se eleve del suelo con una carga de un hombre o bien se necesitaba descubrir una nueva fuerza en la naturaleza o bien un material más ligero (citado en Bell, 1903, p. 226). Por lo tanto, las cometas al aumentar de tamaño, eran más difíciles de volar.

Pero en la cometa tetraédrica formada por adición de células básicas (Fig. 74.4) se producía una sorprendente propiedad: el aumento de peso producido al añadir una nueva célula tetraédrica aumentaba en la misma proporción la superficie donde se genera la sustentación, manteniéndose constante la relación peso-superficie, y por tanto su capacidad de vuelo (Bell, 1903, p. 229). Veamos con más detalle esta propiedad. Una celda tetraédrica está formada por seis aristas que cada una tendrá un peso  $P_a$ , por lo tanto, cada celda pesara  $P_c = 6 \cdot P_a$ . La superficie sustentadora de la celda está formada por las dos caras del tetraedro que se encuentran forradas de tela, que será igual al área de esas dos caras, que llamaremos  $A_c$ . Si suponemos que la vela prácticamente no aporta peso a la estructura, la relación peso-superficie será igual a  $P_c/A_c$ . Luego para una cometa formada por cuatro celdas tendremos veinticuatro aristas y cuatro superficies sustentadoras:

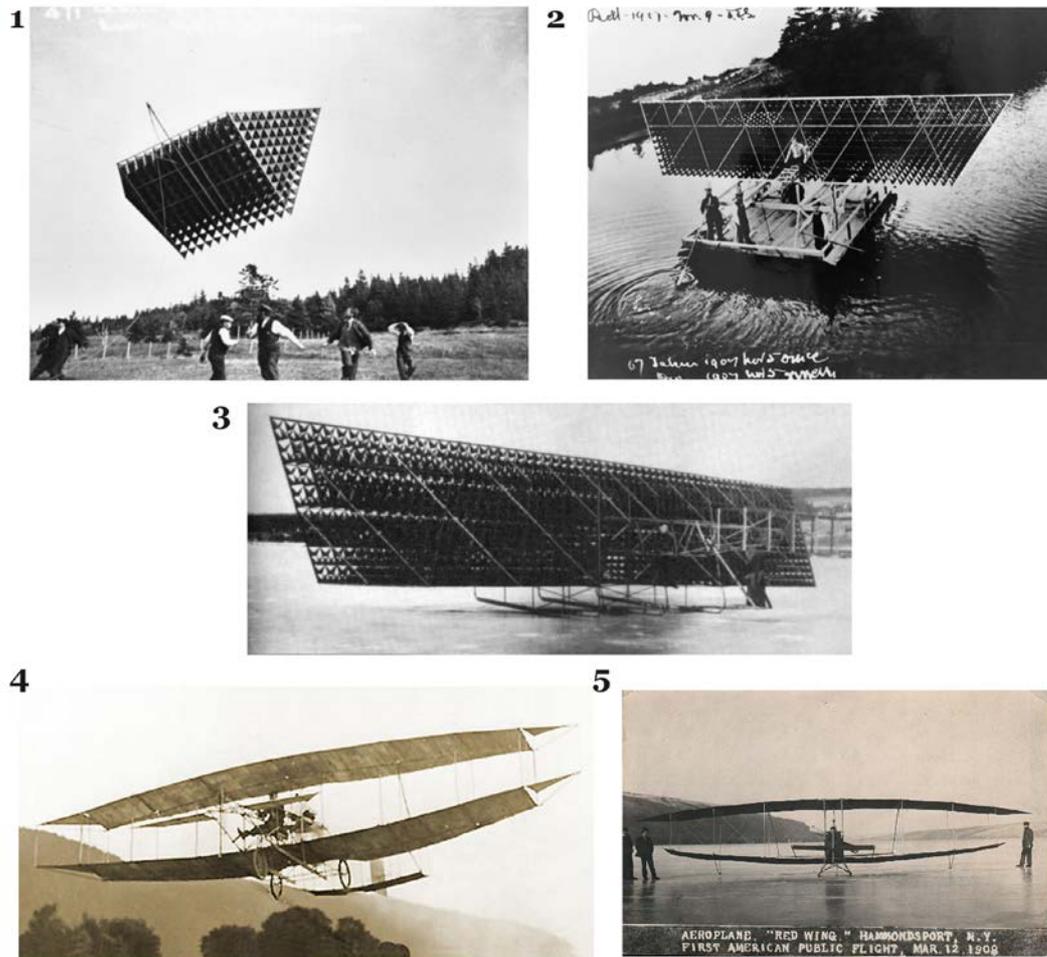
$$\frac{P}{A_c} = \frac{24 \cdot P_a}{4 \cdot A_c} = \frac{6 \cdot P_a}{A_c} = \frac{P_c}{A_c}$$

En general, si denominamos E al número total de aristas de una estructura formada por N celdas tetraédricas, tenemos que  $E = 6 \cdot N$ , Por lo tanto:

$$\frac{P}{A_c} = \frac{E \cdot P_a}{N \cdot A_c} = \frac{6 \cdot N \cdot P_a}{N \cdot A_c} = \frac{6 \cdot P_a}{A_c} = \frac{P_c}{A_c}$$

Luego se conserva la relación peso-superficie, pudiendo fabricar cometas tan grandes como se quiera, con sólo añadir superficies nuevas celdas. La única limitación, que señala Bell es de tipo estructural, ya que llega un momento que se necesitan nuevas varillas para hacer la estructura más sólida, pero sin llevar asociadas nuevas superficies sustentadoras (Bell, 1903, p. 229).

En el año 1905, una cometa compuesta de 1.300 células, de nombre *Frost King* (Fig. 75.1) eleva por accidente a uno de sus manipuladores hasta una altura de 10 m. Una cometa con un peso de 57 Kg, volando con un viento de 17 km/h, había sido capaz de elevar una persona de 75 Kg (Parkin, 1964, p. 14). Esta circunstancia hace concluir a Bell que una estructura mayor, impulsada por un motor, proporcionará el empuje necesario para transportar a un hombre.



**Fig. 75** *Frost King* (1905) (1). *Cygnet I* (1908) (2). *Cygnet II* (1909) (3). Aeroplano *June Bug* diseñado por Glenn Curtiss (1908) (4). Aeroplano *Red Wing* de Thomas Selfridge (1908) (5)

Bell funda en el año 1907, junto con un grupo de entusiastas de la aeronáutica: Frederick Walker (Casey) Baldwin (1882-1948), John Alexander Douglas McCurdy (1886-1961), el teniente Thomas Etholen Selfridge (1882-1908) y Glenn Hammond Curtiss (1878-1930), la *Aerial Experiment Association*. El fin de esta asociación fue el desarrollo de un aeroplano. Para ello Bell aporta la cantidad de 20.000 dólares a la sociedad, así como el laboratorio que había construido en *Beinn Bhreagh*, que era una casa de su propiedad en Nueva Escocia (Canada) (Parkin, 1964, p. 41). Ese mismo año, con ayuda de los miembros de la asociación, Bell construyó una cometa de 3.393 celdas tetraédricas, provista de flotadores, con el nombre de *Cygnet I* (Fig. 75.2). Arrastrada con ayuda de un barco de vapor por la *Bahía de Baddeck* (Canadá), se eleva a una altura de 51,2 m., llevando como pasajero al teniente Selfridge. Tras un vuelo de siete minutos, durante los que la cometa muestra una gran estabilidad y fuerza de

sustentación, se afloja el cable y ameriza suavemente en el agua (Parkin, 1964, p. 47). Tras el éxito de este vuelo, en 1909, Bell construyó una cometa más grande, la *Cygnets II* (Fig. 75.3). Una versión ampliada de la anterior, capaz de transportar una persona e impulsada con un motor (Parkin, 1964, p. 89). La falta de potencia del mismo hace que el resultado no sea el deseado. Esto, unido a que los demás miembros de la agrupación optan por diseños de aeroplanos más convencionales (Fig. 75.4-5), conduce al abandono del proyecto, disolviéndose ese mismo año la *Aerial Experiment Association* (Parkin, 1964, pp.155-66).

La cometa de Bell no tuvo tanto éxito de la de Hargrave como ala de aeroplano. Los problemas estructurales y la dificultad de fabricación fueron determinantes. Además, cuando la cometa de Hargrave se transformó en el ala de un aeroplano, a las superficies sustentadoras se les dio una curvatura, lo que incrementó la fuerza de sustentación. Esto no ocurría en las celdas tetraédricas de las cometas de Bell. Si a esto le sumamos que los experimentos con alas de aeroplano, más convencionales que los otros miembros de la *Aerial Experiment Association* construyeron, mostraron mejores resultados. Esto fue determinante para el abandono del tetraedro como forma de ala.

### 1. La transformación de la cometa

¿Qué es una cometa? Comenzábamos en la introducción apelando al DRAE para señalar que nuestro análisis trataría de rescatar los usos extraviados entre dos definiciones separadas doscientos años. Antes, desde luego, había sido muchas cosas más, desde sus orígenes en la antigua China como objeto revestido de significados místicos, religiosos y rituales (Needham, 1965, pp. 568-602). Posteriormente, en Japón se transformó en un juego de competición entre distintos grupos sociales (Hart, 1982, pp. 33-49) y en Oceanía sirvió como un utensilio para pescar (Barton & Dietrich, 2009). Antes incluso de nuestra primera definición, ya en Europa entre los siglos XV y XVII, la cometa aparece en libros de magia natural o alquimia, así como en algunos tratados sobre máquinas de guerra. Paralelamente la cometa se introduce en la cultura popular occidental como un juego para niños (Hart 1982, p. 86), y es así como llega hasta nosotros.

No obstante, tras su incorporación al acervo científico, aunque no permaneciera en él, su propia entidad como juguete se transformó. Como veíamos en el capítulo 2, el experimento de Franklin resultó lo suficientemente cautivador como para que, una vez agotado su interés científico, los aficionados a la física recreativa lo siguiesen practicando como divertimento en el siglo XIX. Eso sí, con cometas adecuadamente aisladas para prevenir electrocuciones. Los aficionados a volar cometas se beneficiarían también de los modelos mecánicos de Euler estudiados en el capítulo 3, pues su único interés retrospectivo resultó ser el de aprender cómo elevarla a una altura mayor, tal como se transmitía, a modo de ilustración, en manuales de física recreativa durante más de cien años.

El uso de la cometa como dispositivo de elevación de meteorógrafos propulsó, como veíamos en el capítulo 4, el desarrollo tecnológico de la cometa, adquiriendo formas demasiado complejas para un simple juguete. Para un niño resultaría complicado elevar una cometa Hargrave a más de 4000 metros. Fueron estos desarrollos, según veíamos en el capítulo 5, los que propiciaron el uso de cometas como modelos a escala para probar formas de ala, en los primeros días de la aviación. Sin embargo, la aparición de

alternativas más eficientes abortó la investigación sobre cometas. A pesar de algunos usos esporádicos<sup>1</sup>, a lo largo del siglo XX la cometa se convirtió de nuevo en un simple juego de niños, aunque, en ocasiones, con trazas aún de su pasado científico. Ejemplo de ello lo tenemos hoy en día en el diseño de cometas destinadas a la modalidad deportiva denominada *kitesurf* (véase Fig. 16). En el diseño de este tipo de cometas se emplean las mismas técnicas del pasado, como el ensayo directo de prototipos que vimos en el capítulo 5, pero con materiales y herramientas de diseño actuales (Breukels, 2010).

Pese a su éxito como juguete, como decíamos en la introducción, la cometa sería, sin embargo, un objeto científico fracasado. Quisiera cerrar esta Tesis con una reflexión sobre el sentido de la historia de un objeto semejante. Al fin y al cabo, la Historia de la ciencia es, como tantas otras, la de sus éxitos más que la de sus fracasos. En los términos de la introducción, la de los objetos que logran ingresar en algún paradigma, no la de los que quedan fuera de él. Para justificar el interés de la cometa para la Historia de la ciencia desde la constatación de su fracaso quisiera reivindicar su carácter de *ciencia complementaria*, en el sentido de Hasok Chang. Veamos en qué consiste este concepto.

## **2. Una ciencia complementaria con cometas**

En *Inventing Temperature Measurement and Scientific Progress* (2004), Hasok Chang se plantea el modo en que la Historia y la Filosofía de la ciencia (HFC de ahora en adelante) pueden contribuir a la propia empresa científica. Desde su punto de vista, su misión disciplinar sería la de proporcionarnos una *ciencia complementaria*, en el sentido siguiente:

A discipline that contributes to scientific knowledge through historical and philosophical investigations. Complementary science asks scientific questions that are excluded from current specialist science. (Chang, 2004, p. 3)

En otras palabras, a la HFC le correspondería estudiar todo aquello que la ciencia fue abandonando como objeto de investigación, no para justificar la elección del paradigma vigente sino para rescatar el conocimiento que pudo perderse al elegirlo. ¿Qué aportaría aquí la HFC? Según Chang, recuperación (*recovery*), conciencia crítica (*critical awareness*) y nuevos desarrollos (*new developments*).

---

<sup>1</sup> La cometa se empleó para realizar fotografías aéreas, como podemos véase en el anexo 2. En la actualidad se sigue empleando este sistema de fotografía aérea (Hanson, 2001).

La HFC recuperaría ideas o fenómenos elaborados por científicos del pasado cuya exclusión del paradigma vigente podría revisarse a la luz de nuestros conocimientos actuales, obligándonos a repensar su alcance. Por ejemplo, Chang estudia cómo se estructuró el concepto de temperatura y su medida, sobre la base de un consenso científico alcanzado mediante un refinamiento gradual de las convenciones métricas. Chang demuestra en su obra que ese consenso se puede alcanzar sin contar con un acuerdo de partida sobre los puntos fijos de una escala de temperatura (Chang, 2004, pp. 48-52). Recupera así el concepto de *sobrecalentamiento*, es decir, la posibilidad de que el agua pueda hervir por encima del punto de ebullición normal, concepto que raramente aparece en los textos de física actuales, pero sí en los del siglo XIX. A base de replicar experimentos del pasado, Chang muestra que el sobrecalentamiento realmente sucede, lo cual le sirve para obligarnos a repensar los fundamentos de nuestras escalas termométricas: el acuerdo sobre ellas no se basa en captar datos ontológicos absolutos, sino en el modo en que las operaciones de medición nos obligan reconciliar nuestras distintas escalas.

Es decir, la recuperación de conocimientos del pasado trae aparejada *conciencia crítica* sobre nuestro conocimiento presente. Chang (2004, p. 243) reivindica la necesidad de evitar la fe ciega en los resultados científicos: sería imposible dar cuenta racionalmente del progreso de la termometría si exigiéramos a los experimentalistas del XVIII y el XIX una justificación basada en datos empíricos autoevidentes y, por ello, incontestables para todos ellos. Chang reivindica aquí una posición epistemológica coherentista para interpretar como progresivo este proceso: es el apoyo mutuo que se van prestando las distintas mediciones –juzgado no por la verdad, sino por otras virtudes epistémicas (tales como la exactitud, fecundidad etc.)– lo que justifica su aceptación.

Una vez recuperados y analizados críticamente los conceptos y los experimentos del pasado, la ciencia complementaria permite *nuevos desarrollos*: ¿merece la pena para la física actual investigar el sobrecalentamiento?

If we look back at a decision made by past scientists and there seems to be room for reasonable doubt, that is a plausible indication that what was rejected in that decision may be worth reviving. When the complementary scientist picks up a rejected research program to explore its further potential, or suggests a novel research program, that is also not done with the crank's conviction that his particular heresy represents the only truth. And if specialists should ever choose to adopt an idea originating from complementary science, they may want to adopt it as the undisputed truth; however, that would still not change the fact that complementary science itself is not in the truth business. (Chang, 2004, p. 247)

Frente a la *ciencia especializada* (en términos kuhnianos, la ciencia normal), Chang defiende la posibilidad de que la HFC, como *ciencia complementaria*, propicie la generación de alternativas. Si ciertos elementos de la ciencia del pasado fueron desestimados o rechazados por razones imperfectas o invalidadas, se podrían reabrir estas vías de conocimiento y tratar de explorarlas de nuevo. En definitiva, la *ciencia complementaria* es la continuación de la ciencia *por otros medios* (Chang, 2004, p. 250).

Desde esta perspectiva podemos reivindicar el estudio de objetos científicos fracasados, como es el caso de la cometa. El fracaso de un objeto científico, su exclusión de un paradigma, no agota, en principio, su potencial interés para la HFC entendida en la perspectiva de Chang. En este sentido, y volviendo sobre la cometa, recordemos que su descarte, en las cuatro categorías objetuales que exploramos, no se debe a que generase resultados erróneos: el experimento de Franklin fue replicado con éxito; los modelos de Euler eran tan correctos como su mecánica racional; como dispositivo de elevación de meteorógrafos era fiable, y también como modelo a escala ingenieril para las alas de aeroplano. Siguiendo la sugerencia de Daston, el problema de la cometa, en estas cuatro categorías, era de *productividad*: la cometa no contribuía a generar suficientes resultados interesantes en ninguna de ellas o bien había alternativas más eficientes para obtenerlos, y de ahí en todos los casos resultase desplazada.

Como demuestra su éxito en la física recreativa, es posible replicar los experimentos de Franklin, como hizo en varias ocasiones a finales del siglo XIX el meteorólogo Alexander McAdie (McAdie, 1897), empleando distintos tipos de cometas (planas hexagonales, de Eddy y de Hargrave) más desarrolladas que la empleada por Franklin, así como instrumentos de mediación de la electricidad atmosférica actuales para la época, como un *electrómetro de Mascart*. Estos nuevos experimentos no hacen más que confirmar lo demostrado Franklin, es decir, la naturaleza eléctrica del rayo, pero además ratifica el descubrimiento de Tiberius Carvallo (véase página 49) de que la cometa capta electricidad de la atmosfera en días despejados, sin que exista una tormenta cerca (McAdie, 1897, p. 743). En la actualidad se han realizado este tipo de medidas de la electricidad atmosférica con ayuda de cometas y electrómetros colgados de su hilo<sup>2</sup>,

---

<sup>2</sup> En los años ochenta del siglo XX, el *Cooperative Institute for Research in the Environmental Sciences* (CIRES) de la Universidad de Colorado emplearon cometas tipo *parafoil*, incorporando una serie de electrómetros suspendidos a lo largo del hilo de la cometa con el fin de reañizar mediciones del campo

confirmado la existencia de la electricidad atmosférica fuera de las nubes de tormenta. Pero, a diferencia de los experimentos de Chang, estas réplicas del de Franklin no hay residuo que explorar: la ciencia especializada absorbió todo cuanto podía aprenderse en el experimento.

Los modelos de Euler, reinterpretados desde la física actual, no nos enseñan nada que no sepamos sobre la elevación de cometas, ya que el modelo geométrico empleado y el modelo físico de la fuerza que genera la corriente de aire sobre el plano de la cometa (la teoría de impacto), según vimos en el apartado, ha sido superado y no es alternativa a los modelos actuales de la mecánica de vuelo de la cometa, más desarrollados y con resultados comprobados en túneles de viento<sup>3</sup>. Y, por supuesto, podríamos seguir elevando meteorógrafos o probando formas de ala con cometas, pero no lograríamos resultados distintos, en el mejor de los casos, de los que obtendríamos utilizando medios convencionales.

En este sentido la actitud crítica que propicia nuestro recorrido por los usos científicos de la cometa es, en realidad, la de *confianza* en la propia ciencia especializada, en su capacidad para agotar nuestro conocimiento de múltiples parcelas de la realidad, al menos tan lejos como alcanzan nuestras capacidades o intereses. Parte del interés del experimento de Franklin radica justamente en que su éxito popular permitió comprobar a públicos muy diversos la naturaleza eléctrica del rayo, sin dejar resquicios en sus resultados para interpretaciones alternativas. Las mediciones efectuadas con meteorógrafos elevados con cometas no arrojaron predicciones diferentes que las efectuadas con globos o con aeroplanos, ya que la única diferencia estribaba en el aparato elevador no en el instrumento de medida que era el mismo, pero con la ventaja de alcanzar alturas cada vez mayores (véase Tabla 2 de la página 106), en donde antes no se podían realizar mediciones. Del mismo modo, los ensayos realizados con cometas sobre la forma de las alas se vieron confirmados por estudios posteriores, ya que las teorías desarrolladas<sup>4</sup> en las primeras décadas del siglo XX, que explican cómo se genera la fuerza de sustentación en los perfiles de las alas de los aviones

---

eléctrico atmosférico sobre la Isla Navidad, territorio australiano situado en el Océano Índico (Balsley, et al., 1992).

<sup>3</sup> Por ejemplo, en la tesis doctoral realizada por Dawson, (2011), se desarrolla un modelo de la mecánica del vuelo de una cometa acrobática de dos hilos, modelo mucho más complejo que el de una cometa de un hilo. El uso de técnicas matemáticas más desarrolladas, así como el empleo de la simulación con ayuda de ordenadores hacen posible resultados teóricos fiables, que se comprueban experimentalmente en túneles de viento (Dawson, 2011, pp. 42-4).

<sup>4</sup> Véase nota 8 página 148.

(Wegener, 1997, p. 133), puede explicar también cómo aparece la fuerza aerodinámica responsable de elevar a una cometa inmersa en una corriente de aire<sup>5</sup>.

Por lo tanto, debemos concluir que podemos desarrollar una ciencia complementaria sobre usos alternativos de las cometas a partir del conocimiento científico acumulado en los siglos XVIII y XIX. La investigación que examinamos en los capítulos precedentes agota nuestro conocimiento de este objeto volador.

### 3. La cometa y el control de la naturaleza

Es interesante, para finalizar, que advirtamos de qué modo esta imagen cerrada de la cometa es justamente la que se proyecta en la imaginación popular a lo largo del XIX, a juzgar por los usos literarios documentados por van Riet (2012). A partir de un estudio de la literatura inglesa y norteamericana de la época, van Riet sostiene que, siendo un símbolo heterogéneo, la cometa sirve predominantemente como imagen de nuestras aspiraciones de control sobre la naturaleza, sea exitoso (Prometeo) o fallido (Ícaro o Faetón). Los usos literarios de la cometa alcanzan su auge en las décadas de 1880 y 1890, coincidiendo con los orígenes de la aviación (van Riet, 2012, p. 92), pero todavía con ecos del experimento de Franklin.

Un buen ejemplo de la cometa como metáfora del control sobre la naturaleza es el relato “La cometa de Sim Vedder” (Stoddard, 1880). En él, W. O. Stoddard nos presenta a Sim Vedder, un tipo muy flaco que construye cometas tan grandes como él, siguiendo el diseño de una gran cometa hexagonal tipo *puerta de granero* (Fig. 76). Gracias a la superioridad de su diseño, frente a la simple cometa cuadrada de Franklin, ya que su estructura es más robusta frente a vientos fuertes<sup>6</sup>, Vedder es capaz de hacer volar su enorme cometa en plena tormenta sin que se rompa y sin ser electrocutado: “didn't you ever hear of Dr. Franklin? We're doing just what he did”, declara orgulloso ante su público.

A pesar de su fracaso como objeto científico y tecnológico, el auge y caída de la cometa se corresponde, en la interpretación que propongo, *con el éxito de la ciencia para agotar sus usos*. Las sucesivas caídas de la cometa (como parte de un dispositivo experimental, como modelo mecánico, como instrumento de elevación, como modelo a

---

<sup>5</sup> Existe una amplia bibliografía sobre la aerodinámica del vuelo de una cometa, como ejemplo se puede citar trabajos de tipo divulgativo (Ito & Komura, 1983; Wright, 1998) u otros más complejos (Sánchez, 2006; de Groot, 2010; Dawson, 2011).

<sup>6</sup> El meteorólogo norteamericano McAdie la empleó para elevar instrumentos meteorológicos en el observatorio de Blue Hill en la segunda mitad del XIX. Véase el apartado 1 “Cometas de un solo hilo” de la introducción.

escala) no son sino ejemplos de progreso científico y tecnológico: a finales del siglo XIX nuestro dominio teórico y práctico del vuelo de la cometa era tan perfecto como para poder dar por agotadas todas sus posibilidades. Lo que sucedió en todos los casos tan pronto como se presentó una alternativa mejor. La exploración de este objeto científico fracasado merece, creo, un lugar en la Historia de la ciencia, en la medida en que nos permite ejemplificar cómo explota y mejora nuestros recursos cotidianos (en este caso, un juguete), transformando con ello nuestro mundo.



**Fig. 76** Ilustración que acompaña en relato *La cometa de Sim Vedder* donde se muestra una gran cometa plana hexagonal tipo *puerta de granero*, al fondo, sujeta por un hombre en posición vertical, se ve una cometa plana con *forma de pera*. Este última forma es la más utilizada en la iconografía popular de la cometa en la Inglaterra del siglo XIX, en contraste con la *puerta de granero* propia de las ilustraciones en los cuentos norteamericanos (van Riet, 2012, p. 60)



## 1 LA COMETA EN JORGE JUAN Y SANTACILIA

---

### 1 INTRODUCCIÓN

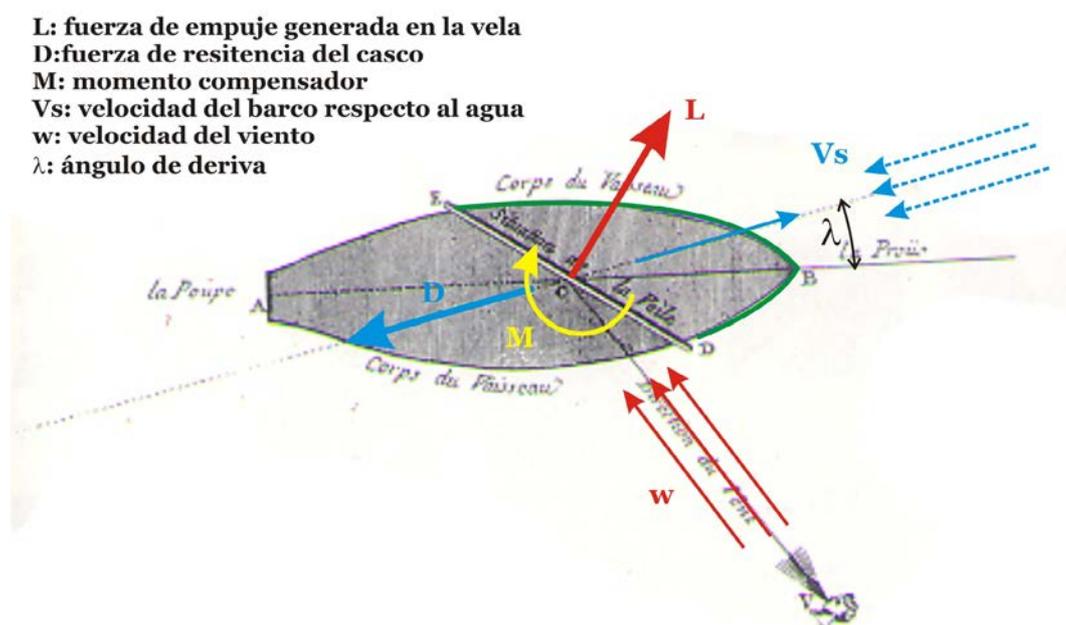
En este anexo presentamos un trabajo sobre las cometas del marino y matemático español Jorge Juan y Santacilia (1713-1773), publicado al final del tomo primero de su obra *Examen Marítimo* (1771). Este escrito, relacionado con la mecánica del vuelo de las cometas, lleva por título *Sobre la teoría de los cometas que vuelan los niños para verificar la ley con que resisten los fluidos* (Juan y Santacilia, 1771, pp. 399-424). Aunque podría considerarse una prolongación del análisis que presentamos en el capítulo 3, es preferible presentarlo por separado ya que es necesaria una exposición detallada del contenido matemático del trabajo, hasta ahora apenas conocido, que habría entorpecido el argumento de dicho capítulo.

Jorge Juan analiza la mecánica del vuelo de las cometas, mediante un análisis crítico de la memoria *Des Cerfs-Volans* de Johann Albert Euler, que vimos en el apartado “El vuelo de la cometa según Johann Albert Euler” del capítulo 3. Su propósito y objetivo era verificar una peculiar teoría sobre la resistencia de un cuerpo sumergido en un fluido, desarrollada por Jorge Juan, frente al paradigma de la época, la teoría de impacto, vista en el apartado “La física de la cometa” del capítulo 3. Nuestro autor pretende demostrar que si se siguen las suposiciones, razonamientos y conclusiones que presenta Johann Albert Euler en su memoria, se necesitaría un fuerte viento, casi un huracán, para hacer volar una pequeña cometa, cosa que es contraria a la práctica diaria. En cambio, argumenta, si se sigue su propia teoría y sus propuestas, los resultados son más acordes con la experiencia.

No es necesario decir que la teoría de Jorge Juan fracasó, y con ella el análisis que proponía sobre el vuelo de las cometas. Tampoco aquí consiguieron incorporarse a un paradigma, según se defiende en esta Tesis. Sin embargo, la particular combinación de teoría y experimentación propuesta por Jorge Juan en su trabajo merece ser recordada, si quiera sea como anexo, en el contexto de nuestra Tesis.

## 2 LA RAZÓN COMPUESTA DUPLICADA FRENTE A LA SIMPLE RAZÓN

La teoría de impacto, como vimos en el apartado “La física de la cometa” del capítulo 3, era el modelo físico que se aplicaba, durante el siglo XVIII, a la solución del denominado problema de la resistencia, aplicado a los estudios sobre las máquinas impulsadas por fluidos (tales como molinos de viento, ruedas hidráulicas, turbinas, etc.) (Simón Calero, 1996, pp. 309-73; Suay, 2008), y en los tratados de artillería (Hidalgo, 1993).



**Fig. 77** Sobre la *fig. 2* de *Plancha XV* de la *L'Encyclopedie de Diderot et D'Alembert* se han dibujado la fuerza **L** generada en la vela (ED) para un viento de velocidad **w**, y la resistencia **D** que ofrece la fracción del casco que recibe la corriente (zona remarcada). **M** es el momento generado por el timón y las velas asimétricas para que el barco navegue de manera estable. El ángulo de deriva ( $\lambda$ ) es el ángulo que forma la línea de proa a popa con la dirección de la velocidad del navío respecto al agua (**Vs**)

La teoría de impacto también se abordaba en los denominados tratados navales<sup>1</sup>. En estas obras se consideraba a un barco (Fig. 77) como una máquina compuesta por un elemento impulsor: la vela (ED) y un elemento resistente: el casco (ADBEA), por lo tanto, si se conocía la fuerza (L) que ejercía la vela para una velocidad de viento dada (w), oponiéndose a esta la resistencia del casco (D) sobre el agua se podría hallar la

<sup>1</sup> La relación de obras y monografías navales del siglo XVIII es bastante larga, destacaremos las siguientes: *Scientia Navalis* (1749) y *Théorie complète de la construction et de la manoeuvre des vaisseaux* (1773) de Leonhard Euler. *De la manoeuvre des vaisseaux* (1757) de Pierre Bouguer. (Simón Calero, 2005, pp. 574-6; Ferreiro, 2007).

velocidad del navío ( $V_s$ ) como una fracción de la velocidad del viento (Simón Calero, 2010, p. 234-8).

Estos estudios necesitaban de una serie de modelos físicos sobre el comportamiento de los fluidos y unos modelos geométricos de los elementos implicados (velas, cascos, etc.) con el fin de reducirlos a un *modelo matemático* cuyo funcionamiento puede ser analizado desde los presupuestos de la mecánica racional, obteniendo resultados numéricos con una cierta aplicación práctica (Suay, 2008, p. 121). La mayoría de los autores daban por válidos estos resultados sin ser comprobados, ya que el objeto de sus estudios era la aplicación de la matemática mixta a entidades concretas, no la verificación experimental<sup>2</sup>. Es como si una vez que se ha fijado un modelo geométrico de la máquina o navío, y el modelo físico del fluido, las expresiones deducidas por razonamientos matemáticos ya tienen una validez suficiente, y si algo falla es consecuencia o del modelo geométrico o del físico, o de ambos, es decir, el grado de aproximación a la realidad, no del análisis empleado. Esta es también la explicación que daba Benito Bails (1730-1797) en la introducción al tomo V de sus *Elementos de Matemática* (1780).

No siendo la Matemática Mixta otra cosa que la aplicación de la Geometría y el Álgebra á la Física, pueden y deben salir erradas sus consecuencias siempre que supongamos en los cuerpos que consideramos una naturaleza, ó propiedades que no sean las verdaderas, ó no tengamos bastante exploradas. Las reglas de calcular son muy seguras, ciertísimas las proposiciones de la Geometría, pero los resultados de su aplicación han de ser forzosamente distintos según los diferentes supuestos sobre que va fundada. (Bails, 1780, pp. XXXVIII-XXXIX)

La teoría de impacto establecía que la fuerza de resistencia de una superficie en una corriente fluida “[...] es en razón compuesta duplicada de su velocidad y seno del ángulo de incidencia.” (Juan y Santacilia, 1771, p. 399) Jorge Juan en su introducción al *Examen Marítimo* repasa las dificultades prácticas que tiene la teoría de impacto cuando se aplica al manejo de los navíos comparando los resultados que dan los distintos tratados navales tanto los que “han servido de Norte en lo científico de la Marinería” (Juan y Santacilia, 1771, p. XIV), y otros con un contenido más práctico:

[...] la práctica por otro lado no es menos maestra, particularmente si, después de bien examinada y despejada de los accidentes que puedan hacerla variar no se conforma con la teórica. En este caso, no hay Científico que no crea, que algún supuesto falso precedió á

---

<sup>2</sup> “Al respecto recordamos que la diferencia entre un experimento y una aplicación está en que en el primero se conforma un dominio tratando de aislar los efectos de un fenómeno, mientras que en las otras lo que se hace es aplicar una teoría a una entidad concreta” (Simón Calero, 2001, p. 267).

esta: es preciso buscarle y corregirle, porque la práctica es distinta de theórica: si no concuerdan, alguna de las dos esta viciada. (Juan y Santacilia, 1771, p. XIV-XV)

Estas afirmaciones serán recurrentes en su obra y será su justificación de la necesidad de variar los principios de la teoría de la resistencia universalmente aceptados, así por ejemplo según Jorge Juan (1771, p. XV): Pierre Bouguer establece teóricamente en su *Traité du naviere* publicado en 1746, que un navío no puede andar más de un  $100/336$  de la velocidad del viento, y según Deme Mariotte (1620-1684) en su *Traité du mouvement des eaux* (1686) una velocidad de viento de 24 pies de Paris<sup>3</sup> por segundo (7,8 m/s) es la máxima que puede soportar el velamen de un barco, con este viento, por lo tanto, el barco andará  $(100/336) \cdot 24 = 7,14$  pies por segundo (2,18 m/s) que equivalen a 4,6 millas por hora (7,85 Km./h) lejos del valor práctico de entre 9 y 11 millas que suele andar un barco con ese viento. Luego si un navío anda 11 millas por hora (18,93 Km./h), es decir, 17,25 pies por segundo (5,26 m/s) el viento debería correr a  $(336/100) \cdot 17,25 = 58,96$  pies ingleses por segundo equivalentes aproximadamente a 58 pies de Paris, un verdadero huracán. Así que, tras describir más experiencias establece:

Ya tampoco hay con esto más asilo: es preciso y evidente, que la theórica enseñada es falsa, o mejor decir, que lo sean los principios o suposiciones sobre que se fundó. Estos se reducían á sentar, que la fuerza del viento en las Velas, así como la de las aguas en el costado del navío, son como las areas chocadas, como los quadrados de las velocidades y senos de incidencia con que chocan los fluidos. (Juan y Santacilia, 1771, p. XIX)

Luego si la teoría de impacto no resuelve el problema era necesario dar otra alternativa. Los principios físicos en que se basa la teoría de impacto hay que cambiarlos, cosa que Jorge Juan hace en el capítulo 2 del Libro II del Volumen I de su *Examen Marítimo*<sup>4</sup>.

Empieza estudiando la fuerza que ejerce sobre una superficie diferencial (LN·NM) sumergida en un fluido en reposo (Fig. 78.a). Sobre la misma actúa una fuerza perpendicular<sup>5</sup>, en la dirección DC, cuyo valor es  $m \cdot a \cdot LN \cdot NM$ . Donde m es el peso

---

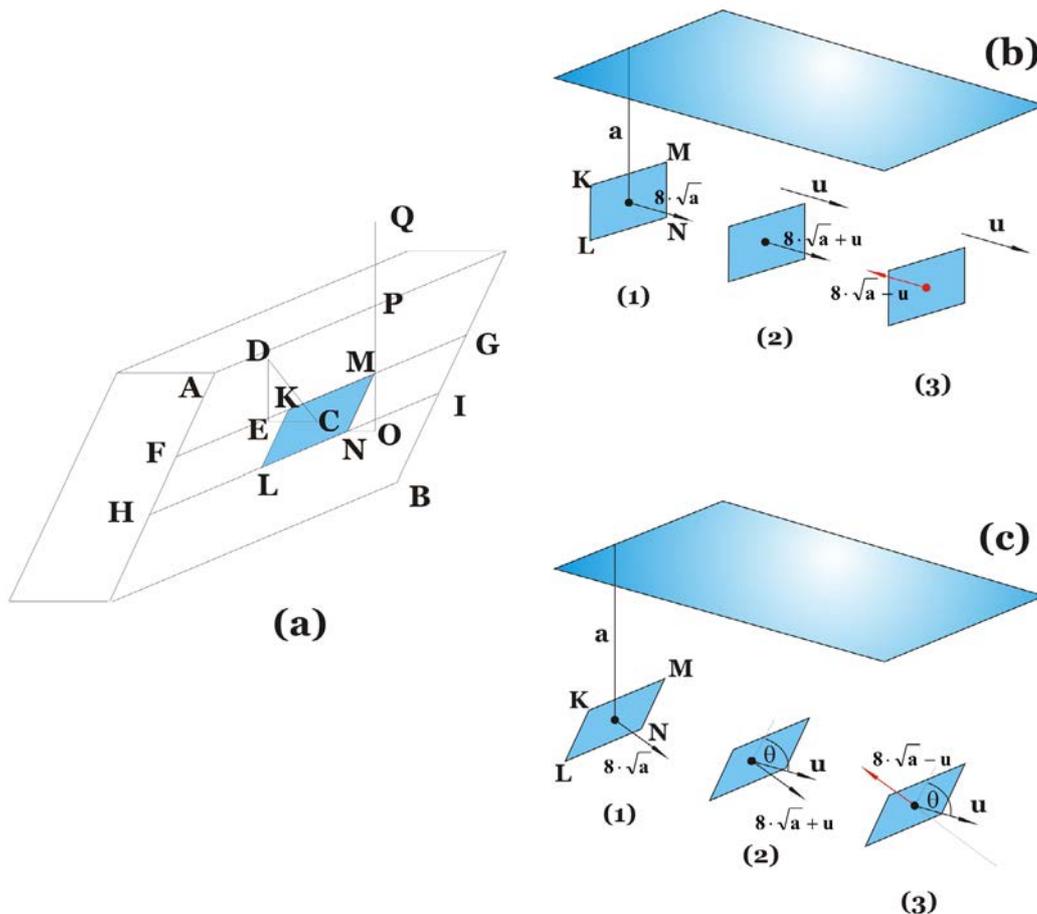
<sup>3</sup> Un pie de Paris es igual a 324,83 mm y el pie ingles es igual a 304,80 mm. Sobre el sistema de unidades empleado en el siglo XVIII, (Simón Calero, 1996, pp. 669-71).

<sup>4</sup> Que tiene por título: *De la fuerza con que en el movimiento actúan los fluidos contra una diferencia – diferencial de superficie*. (Juan y Santacilia, 1771, pp. 218-41).

<sup>5</sup> Es un concepto de la estática de fluidos (hidrostática) que dice que la presión en un punto situado a una profundidad a es igual al peso específico del fluido m por dicha profundidad y es la misma en todas las direcciones. Jorge Juan, lo había tratado en el capítulo anterior (Juan y Santacilia, 1771, pp. 210-8), como se aprecia lo pone en términos de fuerzas no de presión por eso multiplica m·a por la superficie del elemento diferencial (LN·NM).

específico de un pie cúbico de fluido y  $a$  es la altura vertical sobre la superficie. A continuación razona:

Si en la superficie que comprime al fluido que está en reposo, se hace un agujero, que por ahora se puede suponer infinitamente pequeño, saldrá por él el fluido con una velocidad igual a la que adquiriera este cayendo libremente de la altura vertical  $a$  que tenga el fluido sobre el agujero. (Juan y Santacilia, 1771, p. 218)



**Fig. 78** Fuerza sobre una superficie sumergida en un fluido según la teoría de Jorge Juan

Aquí Jorge Juan identifica la profundidad  $a$  con un velocidad ficticia que adquiriere el fluido si a esa profundidad pudiera producirse el “fluir” del mismo, además como la fuerza hidrostática es igual en todas direcciones, esta velocidad también es igual en todas direcciones. Considerando la magnitud de la aceleración de la gravedad<sup>6</sup> de 32 pies/s<sup>2</sup>, la velocidad ficticia es<sup>7</sup>:

<sup>6</sup> Aquí utiliza medidas inglesas donde la aceleración de la gravedad vale 32 pies/s<sup>2</sup> (9,75 m/s<sup>2</sup>), en medidas de Paris su valor es 30 pies/s<sup>2</sup> (9,74 m/s) (Simón Calero, 1996, pp. 669-71).

<sup>7</sup> La velocidad  $v$  de salida de un fluido por un orificio infinitamente pequeño de un depósito es igual a la velocidad que adquiriría un cuerpo en caída libre desde una altura  $a$ , luego la velocidad es igual a la raíz

$$u_z = \sqrt{2 \cdot g \cdot a} = \sqrt{64 \cdot a} = 8 \cdot \sqrt{a}$$

A continuación sustituye la altura por la velocidad en la expresión de la fuerza:

$$\left. \begin{array}{l} u_z = 8 \cdot \sqrt{a} \Rightarrow a = \frac{u_z^2}{64} \\ m \cdot a \cdot LN \cdot NM \end{array} \right\} \Rightarrow m \cdot \frac{u_z^2}{64} \cdot LN \cdot NM$$

Si el elemento está en reposo (Fig. 78.b-1) por el orificio diferencial el fluido tiene una velocidad ficticia igual a ocho veces la raíz cuadrada de la profundidad  $a$ . Pero si el elemento se mueve (Fig. 78.b-2-3) con velocidad  $u$ , la velocidad de salida se suma o resta a dicho valor, así hace corresponder el signo positivo para la parte delantera del elemento y el negativo para la trasera, por lo tanto, la fuerza es:

$$m \cdot \frac{u_z^2}{64} \cdot LN \cdot NM = m \cdot \frac{(8 \cdot \sqrt{a} \pm u)^2}{64} \cdot LN \cdot NM = m \cdot LN \cdot NM \cdot \left( \sqrt{a} \pm \frac{1}{8} \cdot u \right)^2$$

Cuando la velocidad  $u$  no incide perpendicularmente sobre la superficie (Fig. 78.c), sino con un ángulo  $\theta$ . Se sustituye  $u$  por la velocidad normal a la superficie  $u \cdot \text{sen } \theta$ .

$$m \cdot LN \cdot NM \cdot \left( \sqrt{a} \pm \frac{1}{8} \cdot u \cdot \text{sen } \theta \right)^2$$

Este valor es su ecuación básica de la resistencia. A continuación, hasta el final del capítulo, Jorge Juan sigue con una completa y complicada casuística sobre los valores de las distintas proyecciones en determinadas direcciones de esta fuerza obtenida, terminando con un Escolio en el cual justifica y compara su teoría con la de otros geómetras como Walis, Euler, Daniel Bernoulli y Newton, concluyendo “[...] por muy simple que sea la teórica que hemos empleado, no dexara de combatirse con muy solidos fundamentos, si la practica no nos la verificara por quantos medios se proporcionan.” (Juan y Santacilia, 1771, pp. 231-2). Una vez más insiste en que la práctica es el juez de la veracidad de la teoría. La característica que tiene la teoría de Jorge Juan es que está basada en la gravedad, por la dependencia de la profundidad  $a$ , en contra de la teoría de impacto que no considera el peso de las partículas del fluido, tan

---

cuadrada de dos veces la aceleración de la gravedad por la altura. Este principio fue establecido por Evangelista Torricelli (1608-1747) en su obra *De motu gravium* en 1644 (Simón Calero, 1996, pp. 383-6).

sólo su choque. Además, la teoría de impacto explica muy bien el caso del aire, en el que se puede admitir la formación de un vacío posterior<sup>8</sup>, pero en el caso del agua este vacío no se forma ya que el fluido rellena el hueco según Jorge Juan por la acción de la gravedad, circunstancia que hace disminuir la resistencia (Simón Calero, 1996, pp. 263-67; 2001, pp. 225-8).

Jorge Juan continúa en los capítulos siguientes (Juan y Santacilia, 1771, pp. 241-84)<sup>9</sup> aplicando la ecuación básica para calcular la resistencia en placas planas y cuerpos sumergidos o flotando en un fluido. Por ejemplo, calcula la expresión de la resistencia<sup>10</sup> de un prisma, de dimensiones b, c y a, sumergido en un fluido a una profundidad D, mucho mayor que la altura a del prisma. Si se mueve dentro del fluido con una velocidad normal  $u \cdot \text{sen} \theta$ , el valor de la resistencia es:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot c \cdot a \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot u \cdot \text{sen} \theta = R \cdot u \cdot \text{sen} \theta$$

Donde R depende del peso específico del fluido (m), de la superficie de la cara expuesta del sólido ( $S=c \cdot a$ ) y de la profundidad (D). Luego la resistencia es proporcional a la velocidad y el seno del ángulo de incidencia, en contra de la teoría de impacto. El cálculo de la constante R para el caso del aire lo realiza cuando estudia la forma geométrica de una vela hinchada por el viento<sup>11</sup>. Allí estudia la resistencia que ejerce una placa plana en una corriente de aire con un ángulo de incidencia  $\theta$ , la expresión según su teoría es la mitad que la del prisma<sup>12</sup>.

$$\frac{1}{4} \cdot m_{\text{aire}} \cdot S \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot u \cdot \text{sen} \theta$$

Para hallar la profundidad D, considera la atmósfera como un *mar de aire* donde la superficie terrestre es el fondo situado a D pies de profundidad. El cálculo de este valor lo efectúa basándose en las experiencias realizadas en su viaje a Perú<sup>13</sup>, en las que

---

<sup>8</sup> Por esta razón distingue las fuerzas que aparecen en la parte delantera (*impelente*) y trasera (*impelida*) de un cuerpo en movimiento dentro o flotando en un fluido. Siendo la fuerza de resistencia total la resultante de todas ellas (Simón Calero, 2001, pp. 230-6).

<sup>9</sup> Para el análisis de estos capítulos véase Simón Calero (2001).

<sup>10</sup> Proposición 40 corolario 2 (Juan y Santacilia, 1771, p. 275).

<sup>11</sup> En concreto en el capítulo primero del Libro III del volumen segundo que lleva por título *De las velas, y de la fuerza que hace el viento en ellas*. (Juan y Santacilia, 1771, Vol. II, pp. 186-208).

<sup>12</sup> Proposición 52 corolario 5 (Juan y Santacilia, 1771, p. 305).

<sup>13</sup> Reflejadas en capítulo 4 del libro V de la obra *Observaciones Astronómicas y Físicas hechas de orden de S.M. en los Reynos del Perú* (Juan y Santacilia y Ulloa, 1748).

comprueba que para que el barómetro baje una línea<sup>14</sup> hay que elevarse 86 pies, por lo tanto, la altura que hay que elevarse sobre el nivel del mar, para que el barómetro baje los 2,5 pies, que es la altura barométrica a dicho nivel, será:

$$D = 86 \text{ pies/ línea} \cdot 2,5 \text{ pies de Hg} \cdot 144 \text{ línea / pie} = 30.960 \text{ pies}$$

Establece que el peso específico del aire es de 140/318.888, luego el peso específico del agua de mar<sup>15</sup> m, se obtiene sustituyendo:

$$\frac{1}{4} \cdot m \cdot u \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot S \cdot \text{sen } \theta = \frac{\frac{1}{4} \cdot m \cdot u \cdot (30.960)^{\frac{1}{2}} \cdot 140}{318.888} \cdot S \cdot \text{sen } \theta \approx \frac{1}{20} \cdot m \cdot S \cdot u \cdot \text{sen } \theta$$

$$R = \frac{1}{20} \cdot m \cdot S$$

Posteriormente<sup>16</sup> toma 2/3 de este valor según los resultados de las experiencias realizadas:

$$R = \frac{1}{30} \cdot m \cdot a^2$$

Luego:

$$D = R \cdot u \cdot \text{sen } \theta = K \cdot u \cdot \text{sen } \theta$$

Por lo tanto, la resistencia es proporcional a la velocidad y al seno del ángulo de incidencia. Por lo tanto, como dice Jorge Juan en el prólogo del *Examen Marítimo*:

[...] pero muchas experiencias en pequeño, no tienen iguales resultas en lo grande extenso, porque en este caso se hacen más sensibles los efectos de los accidentes, y es lo que precisamente sucedía en las acciones del Navío, comparadas con las experiencias que hasta ahora se han practicado. Pera no tuba iguales resultas nuestra theórica, pues quando podíamos esperar mayores diferencias, por el aumento hallado de las resistencias, se encontró la más perfecta resulta que se podía aguardar. Con ella se halla que las Embarcaciones deben andar precisamente que andan, sease á Popa, como á viento largo y de bolina; pero lo que es más, que no solo andan algunas a viento largo casi tanto como el mismo viento, sino que algunas de ellas andan más que el propio viento; paradoxa que extrañarán; muchísimos: pero que sin embargo se verá demostrada. (Juan y Santacilia, 1771, pp. xxvi – xxvii)

<sup>14</sup> Un pie inglés (304,8 mm.) igual a 144 líneas (2,12 mm.).

<sup>15</sup> El valor de un pie inglés cubico de agua de mar es de 64·3/8 libras (Juan y Santacilia, 1771, Vol. II, p. 64).

<sup>16</sup> Descritas en el Escolio de la Proposición 36 del libro II (Juan y Santacilia, 1771, pp. 269-72).

Para continuar:

Hallada esta exacta conformidad de nuestra theórica de resistencias con la práctica, así en pequeñas superficies, como en las muy amplias de los Navíos, se trató también de aplicarla, para mayor verificación á otros dos casos diversos. (Juan y Santacilia, 1771, p. xxvii)

Estos casos que va a verificar son precisamente el vuelo de las cometas<sup>17</sup> y la máquina de Smeaton<sup>18</sup>.

### 3 EL MODELO DE LA COMETA SEGÚN JORGE JUAN

Jorge Juan en el apéndice primero de su *Examen Marítimo* aborda el estudio teórico del vuelo de una cometa. Para ello varía el modelo geométrico empleado previamente por Johann Albert Euler, como vimos en el apartado “La definición geométrica de la cometa” del capítulo 3, y el modelo físico de la teoría de impacto. Su objetivo es comprobar qué resultados son más acordes con la experiencia. Esta metodología le permite comprobar lo veraz de su modelo alternativo de la resistencia de los fluidos, ya que:

El medio de verificar la theórica en que cabe duda, es aplicarla á varias experiencias. De las mas comunes que se nos ofrecen a la vista diariamente, en asunto á la resistencia de los fluidos, es el vuelo de los Cometa que usan los Niños. O la fuerza del viento en ellos es en razon compuesta duplicada de su velocidad y seno del ángulo de incidencia, como generalmente creen todos los Autores modernos; o como la misma simple razon, según hemos expuesto. Dando una verdadera theórica de los Cometas se puede comprobar qual de los dos sistemas conviene con la práctica: y por consiguiente, qual es el verdadero. (Juan y Santacilia, 1771, p. 399)

Los cambios que hace al modelo geométrico de la cometa son los siguientes:

---

<sup>17</sup> Respecto si Jorge Juan realizó ensayos volando cometas, en el *Examen Marítimo* no se dice nada al respecto. Pero en una obra del almirante Julio F. Guillen Tato (1897-1972) publicada en 1936, que es un estudio sobre la vida y obra de Jorge Juan (Guillen, 1936), al referirse a las aportaciones de Jorge Juan en el astillero de Cádiz señala: “En Cádiz tuvo ocasión y tiempo para los nuevos estudios que le embargaban, y aplicose a experimentar, él mismo y una por una, todas las teorías y corolarios teorizantes. [...] Al efecto construyó modelos sólidos y de navíos, que remolcaba para comparar sus distintas resistencias, y hasta, para estudiar bien la acción del viento, experimentó con cometas.” (Guillen, 1936, p. 224-5). Sobre este hecho, Guillen Tato, al contrario que con otros datos citados en su libro, no da ninguna referencia documental, por lo que todo parece indicar que hace la suposición de que el estudio teórico de Jorge Juan sobre las cometas se debe alguna experiencia previa al volar cometas.

<sup>18</sup> El ingeniero inglés John Smeaton (1724-1792) realizó una serie de ensayos con un modelo experimental de máquinas hidráulicas, con el fin de hallar una serie de reglas que permitan construirlas de manera más eficaz. Jorge Juan compara los resultados con su nueva teoría en el Apéndice II de su *Examen marítimo* (Juan y Santacilia, 1771, pp. 425-8; Simón Calero, 1996, pp. 326-37; 2001, pp. 269-71).

- Dado que es irreal considerar a la cometa junto con el hilo un sólido rígido, el caso primero de *cerfs – volans* no hay que tenerlo en cuenta.
- La cola es un elemento estabilizador, no sustentador, que hace que se baje el centro de gravedad evitando el movimiento lateral. Suponer que la cola es rígida continuación de la varilla longitudinal, hace el mismo efecto que la cola funicular de lazos tradicional, y no aparta el modelo de la realidad. Por lo tanto, estudiar el tercer caso de *cerfs – volans*, para Jorge Juan, carece de sentido físico.
- Considerar el hilo como un sólido rígido no es muy adecuado, ya que un hilo es un sólido funicular que adquiere una determinada forma por la acción del viento y su propio peso, siendo la fuerza tangente en el punto de amarre.
- Atar la cometa a un solo punto del plano no es real, existe lo que se conoce como brida:

A mas de esto se sujetó en él á solo atar el hilo á un punto determinado del Cometa, lo que en la práctica tampoco tubiera jamas ningun buen efecto. De ordinario se atan al Cometa dos, tres, o quatro hilos, que reunidos á una distancia corta; sigue despues uno solo. Con esta disposición el Cometa queda seguro sin poderse mover ó girar sobre ninguno de los diámetros; sin ello, al menor accidente, fácil se descompone, y se precipita al suelo. (Juan y Santacilia, 1771, p. 400)

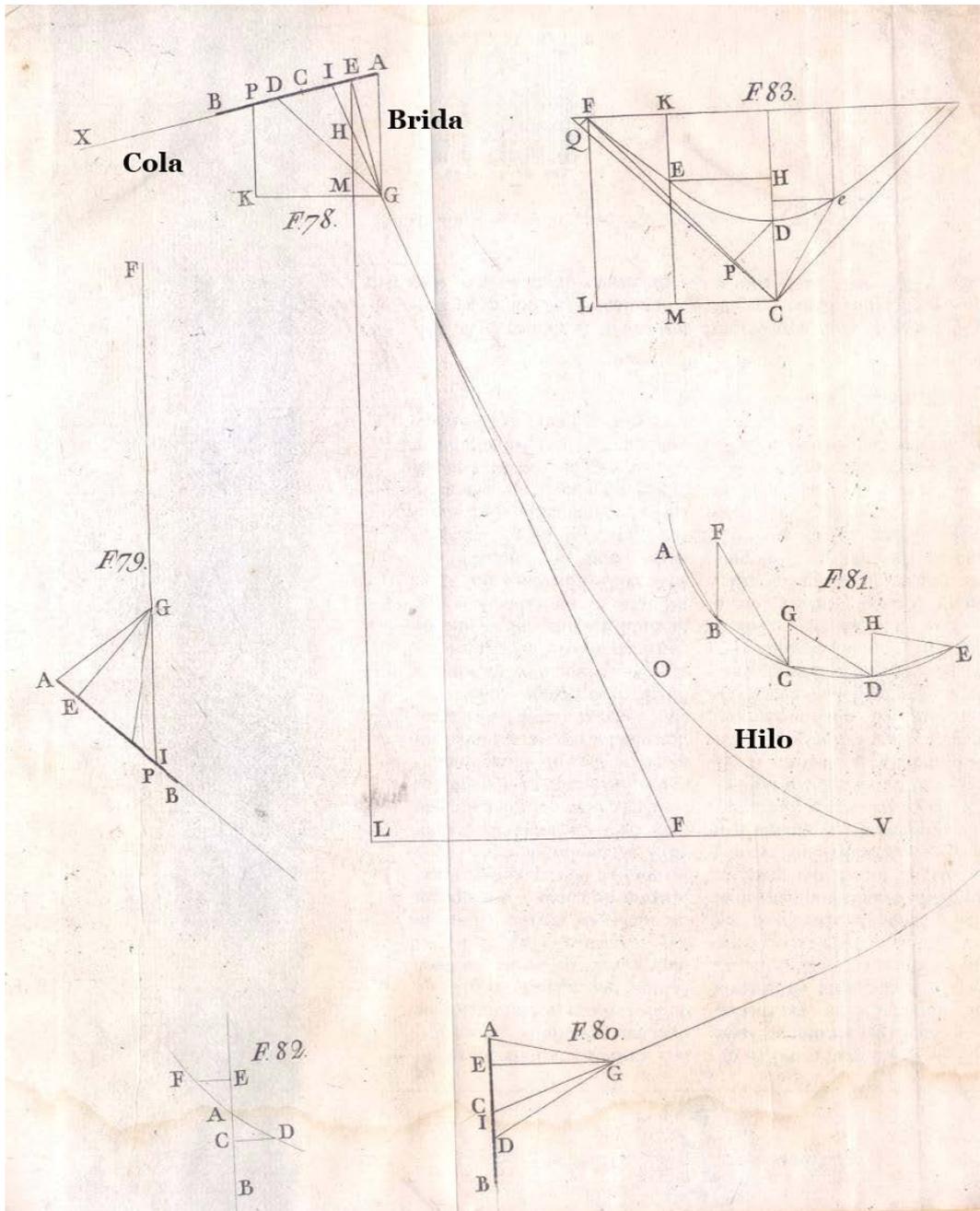
La razón de no considerar el cálculo del efecto del hilo como sólido funicular y la existencia de la brida en la memoria de J. A. Euler, según Jorge Juan, se debe a que “el cálculo viene bien embarazoso”, si se supone la hipótesis de que la fuerza del viento está en razón duplicada con la velocidad y del seno de incidencia, pero si se considera la teoría de la razón simple su cálculo es posible. Por lo tanto, el único modelo geométrico que considera es el segundo estudiado por el hijo de Euler pero con el hilo flexible y la existencia de la brida (Fig. 79).

Una vez definida la geometría del problema y la nueva ley física que debía aplicarse a la fuerza del viento, se inicia un desarrollo matemático puramente algebraico, ya que considera la cometa también volando en equilibrio estático. Su objetivo es hallar expresiones que permitan encontrar la posición de equilibrio de la cometa, dadas unas dimensiones de la máquina y una velocidad del viento con el fin de que se alcance la mayor altura posible. Luego, a modo de ejemplo o aplicación<sup>19</sup>, fija unas dimensiones determinadas a la cometa (Fig. 80), y calcula la velocidad del viento

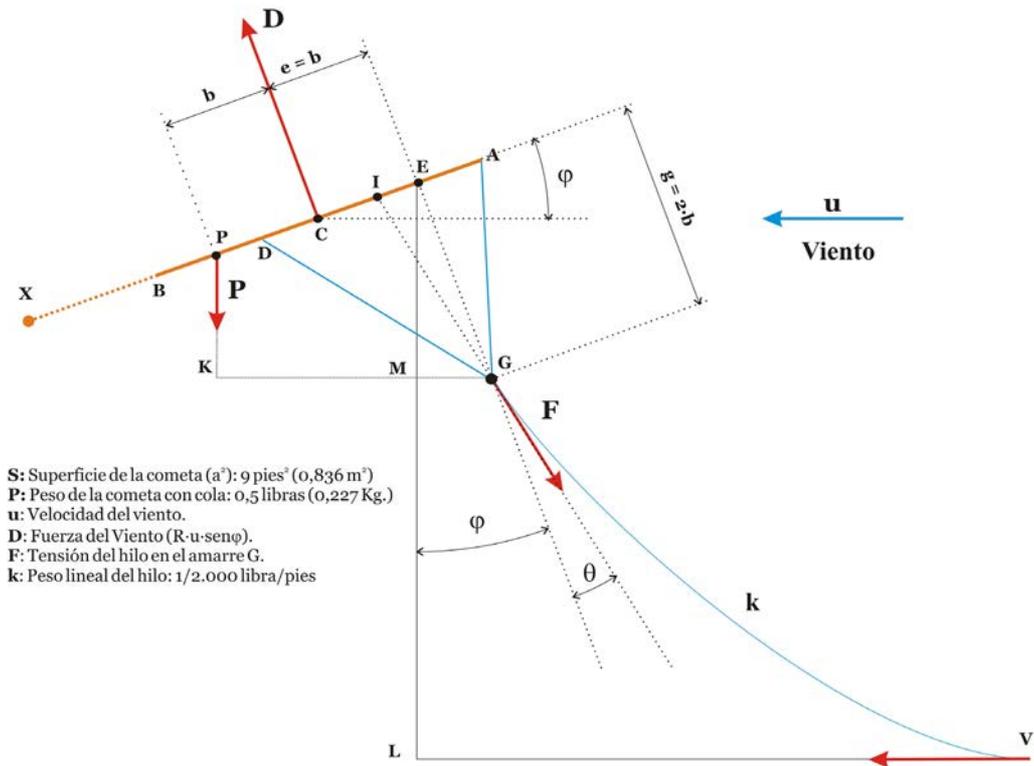
---

<sup>19</sup> Reduciendo las expresiones halladas a un caso fácil, que se desarrolla en (Juan y Santacilia, 1771, pp. 415-20).

que hace que la cometa empiece a volar, para después comparar el resultado obtenido con el que daría si la fuerza del viento es la que da la teoría de impacto.



**Fig. 79** Modelo geométrico de la cometa en Jorge Juan. Se ha señalado el hilo, la brida y la cola



**Fig. 80** Modelo geométrico de la cometa de Jorge Juan, en el que se han representado las fuerzas actuantes y el valor de las dimensiones de la aplicación práctica planteada entre los párrafos 47 a 59 del apéndice I del *Examen Marítimo*

Para hallar la posición de equilibrio de la cometa, halla los valores de los ángulos  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\phi+\theta$  tomando momentos respecto a G de la fuerza del viento y el peso de la cometa, es decir:

$$\begin{aligned}
 P \cdot (KM+MG) &= D \cdot CE \\
 P \cdot (b + e) \cdot \text{cos}\phi + P \cdot g \cdot \text{sen}\phi &= D \cdot e
 \end{aligned}$$

Para el caso particular de la aplicación, como  $e = b$  y  $g = 2b$ :

$$2 \cdot P \cdot \text{cos}\phi + 2 \cdot P \cdot \text{sen}\phi = D$$

Sustituyendo el valor de  $P = 0,5$  libras,  $a^2 = 81$  pies<sup>2</sup> y calculando D:

$$\left. \begin{aligned} D &= R \cdot u \cdot \text{sen}\varphi \\ R &= \frac{1}{30} \cdot m \cdot a^2 = \end{aligned} \right\} \Rightarrow D = \frac{1}{30} \cdot \underbrace{m}_{\substack{\text{Peso de} \\ \text{un pie cúbico} \\ \text{agua de mar} \\ 68 \cdot \frac{3}{8}}} \cdot \underbrace{a^2}_{81} \cdot u \cdot \text{sen}\varphi \approx 19 \cdot u \cdot \text{sen}\varphi$$

Luego:

$$\cos\varphi + \text{sen}\varphi = 19 \cdot u \cdot \text{sen}\varphi$$

Tras laboriosos cálculos llega a la expresión (Juan y Santacilia, 1771, p. 416):

$$\cos(\varphi + \theta) = \frac{(19 \cdot u - 1) \cdot (19 \cdot u + 1) - 1}{\sqrt{((19 \cdot u - 1)^2 + 1) \cdot ((19 \cdot u + 1)^2 + 1)}}$$

Para que la cometa empiece a volar se debe cumplir que el ángulo  $(\varphi + \theta) = 90^\circ$ , es decir, que  $\cos(\varphi + \theta) = 0$ :

$$\cos(\varphi + \theta) = 0 \Rightarrow (19 \cdot u - 1) \cdot (19 \cdot u + 1) - 1 = 0 \Rightarrow u = \frac{\sqrt{2}}{19} \text{ pies/segundo}$$

Es decir, unos 0,0278 m/s, que es una ligera brisa

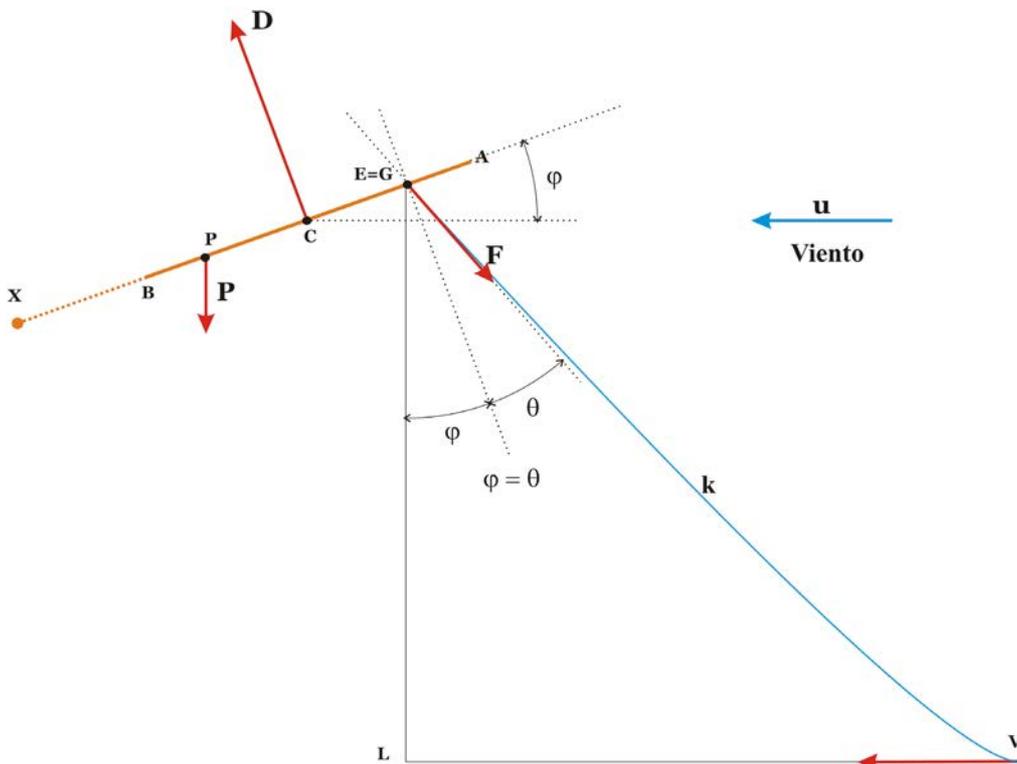


Fig. 81 Modelo geométrico de la cometa de Jorge Juan reducido al modelo segundo de J. A. Euler

A continuación considera la cometa atada en un solo punto del plano ( $g=0$ ) para reducir al segundo caso de la memoria de J. A. Euler (Fig. 81) y que la fuerza del viento es la que corresponde a la teoría de impacto:

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}^2 \cdot \text{sen}^2\varphi$$

Para hallar la posición de equilibrio de la cometa, calcula los valores de los ángulos  $\varphi$ ,  $\theta$  y  $\varphi+\theta$  tomando momentos respecto a E de la fuerza del viento y del peso de la cometa:

$$\mathbf{P} \cdot (\mathbf{b} + \mathbf{e}) \cdot \cos\varphi = \mathbf{D} \cdot \mathbf{e}$$

$$2 \cdot \mathbf{P} \cdot \cos\varphi = \mathbf{D} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{u}^2 \cdot \text{sen}^2\varphi$$

Llegando tras algunas operaciones a las expresiones (Juan y Santacilia, 1771, p. 421):

$$\begin{aligned} \cos\varphi &= -\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}^2} \pm \sqrt{1 + \frac{\mathbf{P}^2}{\mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{u}^4}} \\ \text{sen}\varphi &= \sqrt{-\frac{2 \cdot \mathbf{P}^2}{\mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{u}^4} \pm \frac{2 \cdot \mathbf{P}}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{\mathbf{P}^2}{\mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{u}^4}}} \\ \text{sen}(\varphi + \theta) &= \sqrt{\frac{8 \cdot \mathbf{P}}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}^2}} \cdot \sqrt{\left(-\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}^2} \pm \sqrt{1 + \frac{\mathbf{P}^2}{\mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{u}^4}}\right)^3} \\ \cos(\varphi + \theta) &= 1 + \frac{4 \cdot \mathbf{P}^2}{\mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{u}^4} \mp \frac{4 \cdot \mathbf{P}}{\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{\mathbf{P}^2}{\mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{u}^4}} \end{aligned}$$

Dada la complejidad de las ecuaciones supone que estudia los casos en que se cumple:

$$\mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{u}^4 = \mathbf{n}^2 - 1$$

Jorge Juan comete un error, pues el cambio que en verdad realiza es<sup>20</sup>:

$$\frac{\mathbf{r}^2 \cdot \mathbf{u}^4}{\mathbf{P}^2} = \mathbf{n}^2 - 1$$

<sup>20</sup> Este error que fue advertido por Pedro Levêque (1746-1814) en una nota a pié de página en la traducción al francés de la obra del *Examen Marítimo*, citado en (Simón Calero, 2001, p. 269).

Luego:

$$\begin{aligned}\operatorname{sen}(\varphi + \theta) &= \frac{2}{n+1} \sqrt{2 \cdot (n-1)} \\ \operatorname{cos}(\varphi + \theta) &= 1 - \frac{4}{n+1}\end{aligned}$$

La fuerza del viento valdrá:

$$r \cdot u^2 \cdot \operatorname{sen}^2 \varphi = 2 \cdot P \cdot \operatorname{cos} \varphi = \operatorname{cos} \varphi = -\frac{2 \cdot P^2}{r \cdot u^2} \pm 2 \cdot P \cdot \sqrt{1 + \frac{P^2}{r^2 \cdot u^4}} = 2 \cdot P \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}$$

Tras una serie de razonamientos (Juan y Santacilia, 1771, pp. 410-5) geométricos bastante laboriosos, llega a la conclusión que la altura que alcanza la cometa (LG en Fig. 8) es igual a la diferencia de tensiones entre los extremos del hilo dividido por el peso lineal del mismo (k). Para el modelo considerado y para un viento dado es:

$$LG = \frac{P}{k} - \frac{1}{k} \cdot \sqrt{(P - k \cdot h)^2 + \frac{8 \cdot P \cdot k \cdot h}{n+1}}$$

Donde h es la longitud del hilo. Para que la cometa empiece a despegar  $LG = 0$ , se debe cumplir:

$$\frac{P}{k} - \frac{1}{k} \cdot \sqrt{(P - k \cdot h)^2 + \frac{8 \cdot P \cdot k \cdot h}{n+1}} = 0 \Rightarrow n = \frac{6 \cdot P + k \cdot h}{2 \cdot P - k \cdot h}$$

Luego:

$$r^2 \cdot u^4 = n^2 - 1 = \left( \frac{6 \cdot P + k \cdot h}{2 \cdot P - k \cdot h} \right)^2 - 1 = \frac{16 \cdot P \cdot (2 \cdot P + k \cdot h)}{(2 \cdot P - k \cdot h)^2}$$

Este valor contiene el error en el cambio de variable, ya que el verdadero es:

$$\frac{r^2 \cdot u^4}{P^2} = \frac{16 \cdot P \cdot (2 \cdot P + k \cdot h)}{(2 \cdot P - k \cdot h)^2} \Rightarrow r^2 \cdot u^4 = \frac{16 \cdot P^3 \cdot (2 \cdot P + k \cdot h)}{(2 \cdot P - k \cdot h)^2}$$

Por lo tanto, el valor del viento necesario para que la cometa empiece a despegar es:

$$r^2 \cdot u^4 = \frac{16 \cdot P \cdot (2 \cdot P + k \cdot h)}{(2 \cdot P - k \cdot h)^2} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P = 0,5 \text{ libras} \\ k = \frac{1}{2.000} \text{ libras por pie lineal} \\ h = 1.000 \text{ pies} \end{array} \right\} \Rightarrow r^2 \cdot u^4 = 48$$

Halla el valor de  $r$ , que es la constante de la teoría de impacto, que para una cometa de  $a^2 = 9$  pies cuadrados de superficie le da un valor de  $r = 9/29^2$  (Juan y Santacilia, 1771, p. 423), así pues:

$$r^2 \cdot u^4 = 48 \Rightarrow u = \frac{29}{3} \cdot \sqrt[4]{48} = 25,44 \text{ pies/segundo}$$

Concluyendo:

Da  $u$  mayor que de 25 pies<sup>21</sup>, velocidad excesiva que quizás rasgara en perazos el Cometa; tan lexos está de que no pudiera elevarle sino hasta la horizontal del punto V. En el otro systema, este caso elevara al Cometa hasta ponerle sensiblemente vertical con el punto V. Basta esto para persuadirse de la falsedad de systema que supone la resistencia de los fluidos en razon compuesta duplicada de sus velocidades, y de los senos de los ángulos de incidencia. (Juan y Santacilia, 1771, pp. 424)

Luego su modelo se adapta mejor a los valores que se manejan en la práctica experimental. Hay que destacar que si bien el resultado dado según la teoría de J. A. Euler es *disparatado*, el de Jorge Juan tampoco es *muy real*, ya que las velocidades del viento necesarias para remontar el vuelo de la cometa según Euler es un viento apreciable (7,71 m/s), pero según Jorge Juan es una brisa ridícula (0,0278 m/s).

#### 4 TRANSCENDENCIA DEL MODELO DE LA COMETA DE JORGE JUAN

Se ha objetado que el uso de la cometa por parte de Jorge Juan como argumento para reafirmar su peculiar teoría sobre la resistencia de los fluidos es débil, por usar solamente valores estimativos (Simón Calero, 2001, p. 269). Esto es cierto, pero hay que recordar que no fue el único argumento propuesto a lo largo del *Examen Marítimo*, donde aparecen más ejemplos sobre las diferencias entre los modelos teóricos y la práctica experimental, sobre todo los referentes a la maniobra de los navíos. En cualquier caso, el de la cometa es probablemente el argumento más popular y cercano<sup>22</sup>,

<sup>21</sup> 7,71 metros por segundo (27,76 Km./h). Por un error en los cálculos debería haber dado  $u = 18$  pies por segundo. (5,55 m/s = 18,98 Km./h). A pesar de ello sus conclusiones siguen siendo ciertas.

<sup>22</sup> Recordemos, por ejemplo, su aparición (marginal, eso sí) en la polémica sobre la ciencia española (García y García, 1970). En 1866, el político y científico José Echegaray (1832-1916), pronuncia su discurso de ingreso a la Academia de Ciencias con el título *Historia de las matemáticas puras en nuestra*

aunque ni este ni los demás obtuvieron el éxito deseado. La cometa, por tanto, no encontró tampoco a través de Jorge Juan su consagración como objeto científico.

---

*España.* Al referirse a Jorge Juan y a Antonio de Ulloa, les acusa de no haber contribuido a las matemáticas puras. Pues bien, entre las reacciones al discurso, recordemos la del periodista Antonio Sánchez Pérez (1838-1912), quien en su artículo *Un discurso*, recopilado posteriormente en su libro *Actualidades de Antaño* (1895), reivindica a Jorge Juan frente a Echegaray. Afirma allí que Jorge Juan debe ser considerado un geómetra, ya que no sólo enunció una nueva teoría sobre los fluidos sino “para crear el rigor de su teoría, *crea* otra que, si bien carece de importancia práctica, la tiene muy grande para los que aprecian la ciencia por la ciencia: esta es la teoría de los voladores o cometas.” (Sánchez, 1895, p. 103). Es decir, si matemáticas puras son las carentes de aplicación práctica, la teoría de Jorge Juan sobre la cometa, según nuestro periodista, debiera contar como contribución a ella.



## 2 OTROS USOS DE LAS COMETAS

---

### 1 INTRODUCCIÓN

A consecuencia de la explotación científica y tecnológica de la cometa por parte de la meteorología y la aeronáutica, examinada en los capítulos 4 y 5, surgieron otros usos de las cometas por así decir parasitarios de aquellos. Presentamos una revisión de algunos de ellos en este segundo anexo, pues, como tales, no contribuyeron al auge o caída de la cometa como objeto científico estudiado en esta Tesis, aunque son incomprensibles sin estos.

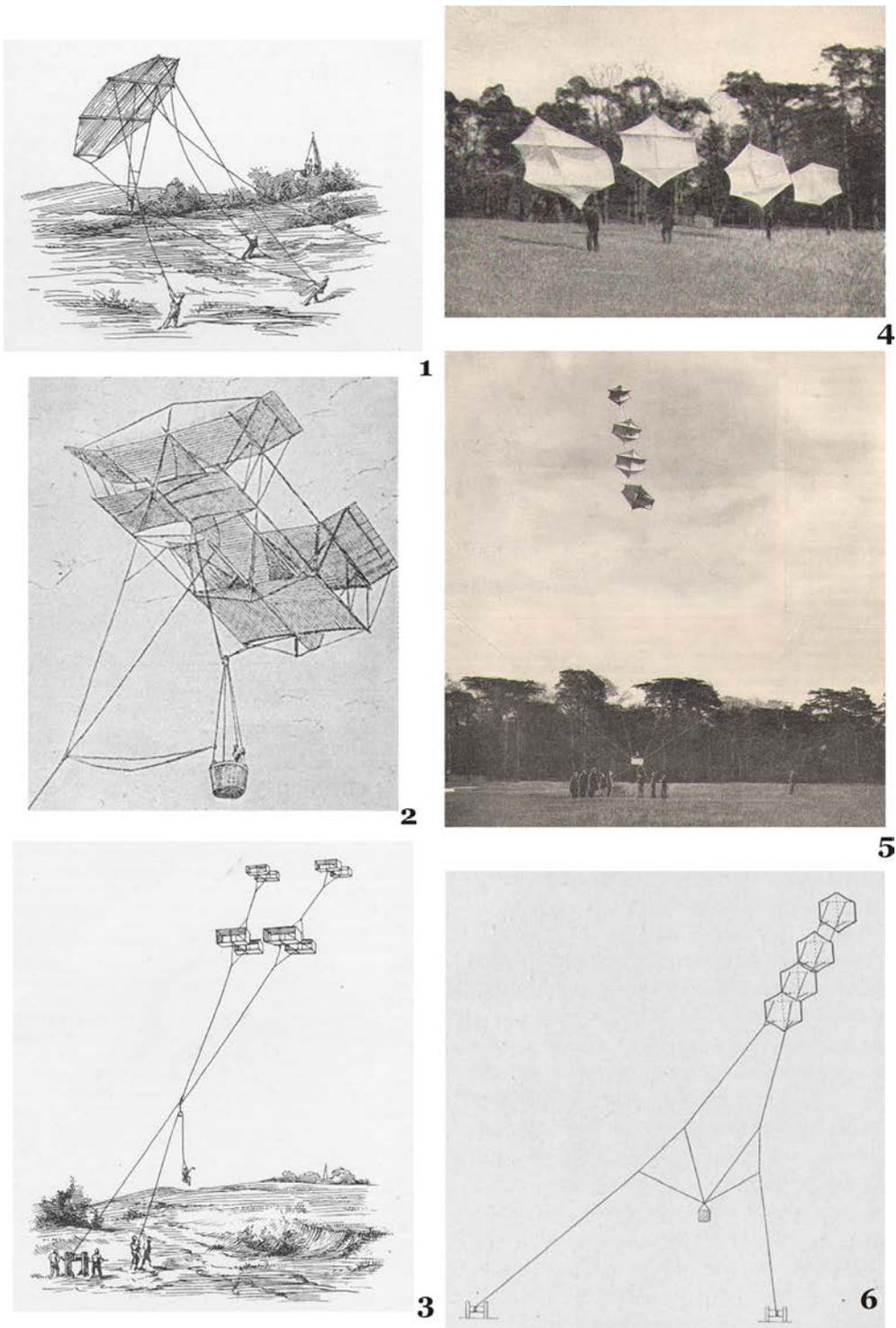
En primer lugar, hablaremos de las cometas tripuladas, sistemas de cometas empleados para elevar personas a finales del siglo XIX y principios del XX. Esta aplicación fue considerada por ejércitos de diferentes países, por su utilidad como alternativa a los globos con el fin de elevar observadores en los campos de batalla. Pero los usos militares de la cometa no se detuvieron ahí pues, hasta la Segunda Guerra Mundial, sirvieron también para elevar antenas de radio, hacer señales o realizar prácticas de tiro.

Una segunda aplicación que examinaremos después es la fotografía aérea, para las que tanto militares como civiles se sirvieron de cometas a principios del XX. A continuación nos detendremos en las actividades que realizaban las sociedades de aficionados a las cometas a finales del siglo XIX y principios del XX. Para terminar este anexo, se describirán algunos los sistemas de cometas empleados en el pasado para el salvamento marítimo.

### 2 COMETAS TRIPULADAS

#### 2.1 *SISTEMAS DE ELEVACIÓN DE PERSONAS CON COMETAS*

Volar en una cometa, es decir, tripular una cometa como si fuera una aeronave se había intentado ya en la antigua China (Needham, 1965, pp. 568-602) y también en Japón (Pelham, 1976, pp. 11-2). En Occidente hay algunos intentos anecdóticos (Hart, 1982, pp. 114-20), pero sólo gracias a los nuevos diseños desarrollados durante el siglo XIX se pudo intentar volar en una cometa de modo sistemático.



**Fig. 82** Cometa de Maillot 1886 (1). Sistema de Lamson (2). Ascensión con el sistema de Wise 1896 (3). Lanzamiento de un tren de cometas *Levitor* (4). Ascensión del capitán Badem-Powell (5). Esquema del sistema de Baden-Powell (6)

En el año 1886, el francés Maillot realiza una de las primeras experiencias conocidas al elevar una carga, suspendida de una gran cometa octogonal, cuyo control

se realiza desde el suelo con ayuda de tres hilos. Repitió el experimento ante los miembros de la *Société Française de Navigation Aérienne*, izando en esta ocasión un saco de arena de 68 Kg. a una altura de 10 m (Fig. 82.1) Animado por el éxito, tiene la intención de ascender con su cometa, pero es disuadido por los miembros de la *Société*, por considerar no está suficientemente probado el sistema para arriesgar la vida de un hombre (Houard, 1912, pp. 8-13).

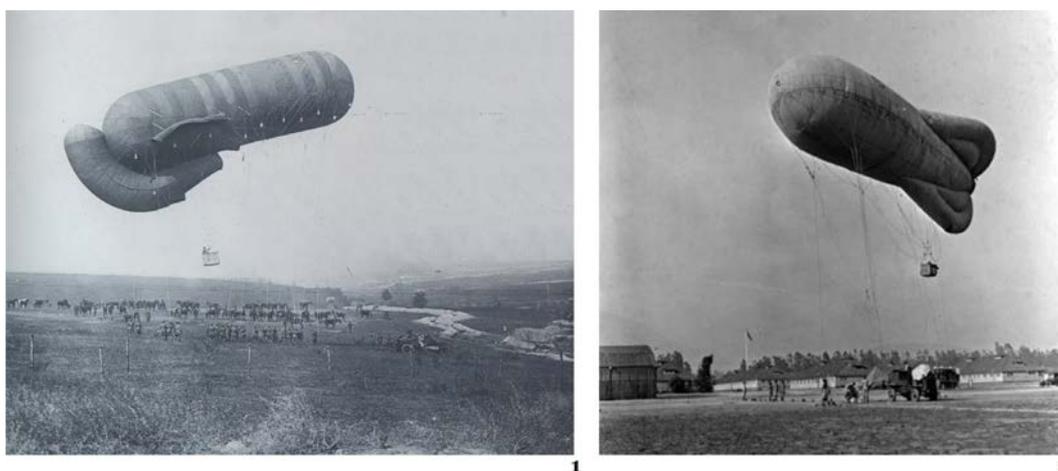
El capitán inglés Baden Fletcher Smyth Baden-Powell (1860-1937), hermano del fundador de los *boy-scouts* y un destacado aeronauta, a pesar de conocer los trabajos de Hargrave sobre las cometas celulares, centra sus investigaciones en un sistema con grandes cometa hexagonales, de hasta 11 metros, denominándolas *Levitor* (Baden-Powell, 1899). El 27 de julio de 1894, en *Pirbright Camp* (Inglaterra), se eleva con un tren de estas cometas (Fig. 82.4), volando con dos hilos paralelos que le confieren una gran estabilidad (Fig. 82.5-6). En 1895 demuestra su sistema a la *British Association*, elevándose él mismo, así como a otras personas, hasta 30 m. de altura (Houard, 1912, pp. 14-20).

En 1896, el teniente del ejército americano Hugh D. Wise realiza una serie de pruebas con un tren de tres cometas celulares (Wise, 1897) en las que eleva un maniquí con ayuda de una polea sujeta a la cuerda de las cometa, pero una ráfaga de viento precipita al conjunto contra el suelo. Para aumentar la seguridad, Wise opta por emplear dos trenes independientes de dos cometas (una piloto y otra elevadora de mayor tamaño). Cada cuerda portadora se ata al punto de fijación de una polea, por donde pasa la cuerda con un lazo, en el que se sienta el piloto, que era elevado tirando de la cuerda (Fig. 82.3).

En todos los sistemas descritos hasta ahora, el piloto se suspende de la cuerda de la cometa, muy por debajo de la misma. Fue el norteamericano Charles H. Lamson, quien logra volar prácticamente dentro de una cometa. Diseña una cometa celular Hargrave modificada (Fig. 82.2). En la parte posterior existe una pieza móvil cuyo control permite al piloto variar el ángulo de incidencia de la cometa. En una barquilla suspendida debajo de la cometa, se coloca el piloto. Desplazando su peso lateralmente controla la estabilidad. Tras una serie de experimentos con maniqués en junio de 1897, logro elevarse con esta cometa a una altura de 15 m (Houard, 1912, pp. 23-6).

## 2.2 COMETAS EN APLICACIONES MILITARES

Las pruebas realizadas por medio de globos libres a principios del siglo XIX pusieron de manifiesto las ventajas de un punto de observación aérea desde la que seguir los movimientos del enemigo y guiar los disparos de la artillería. Durante el último tercio del XIX y principios del XX empiezan a crearse los Servicios de Aerostación Militar en los ejércitos de algunos países como Inglaterra, Francia o Rusia (Montoto, 1993, pp. 49-110).

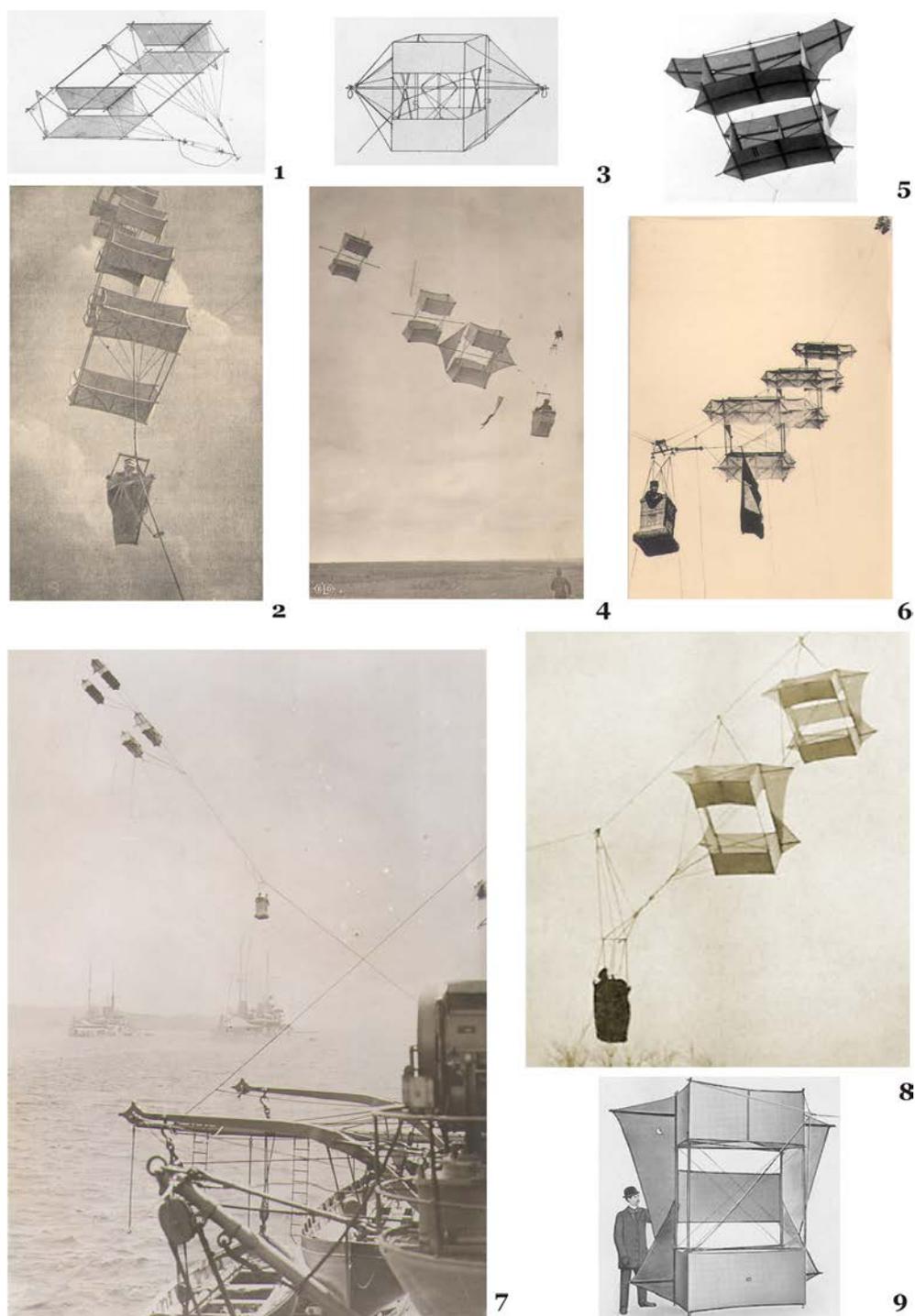


**Fig. 83** Modelo alemán de globo-cometa *Parseval* (1). Modelo francés de globo-cometa *Caquot B* (2)

Estos servicios desarrollan técnicas y materiales adecuados (Fig. 83) tomando el globo como sistema principal de observación<sup>1</sup>. Pero también se diseñan y ensayan sistemas con cometas. Por ejemplo, el del teniente Schreiber (Fig. 84.1-2), adoptado por la marina rusa en 1903; el del capitán de artillería del ejército francés Madiot en 1909, (Fig. 84.3-4); o el del ingeniero del ejército francés J. Th. Saconney<sup>2</sup> en 1910 (Fig. 84.5-6-7). Como fuente para el análisis de estos sistemas disponemos de varias monografías o memorias en los que describen los elementos y las cometas empleadas para la observación (Romain, 1912), así como estudios rigurosos sobre la aerodinámica de su vuelo, como el realizado por el mismo Saconney (1909) y por el también ingeniero militar francés Bois (1906).

<sup>1</sup> Se pueden ver las fichas técnicas de los globos y sistemas auxiliares en (Lázaro y Pérez, 1995, pp. 107-66).

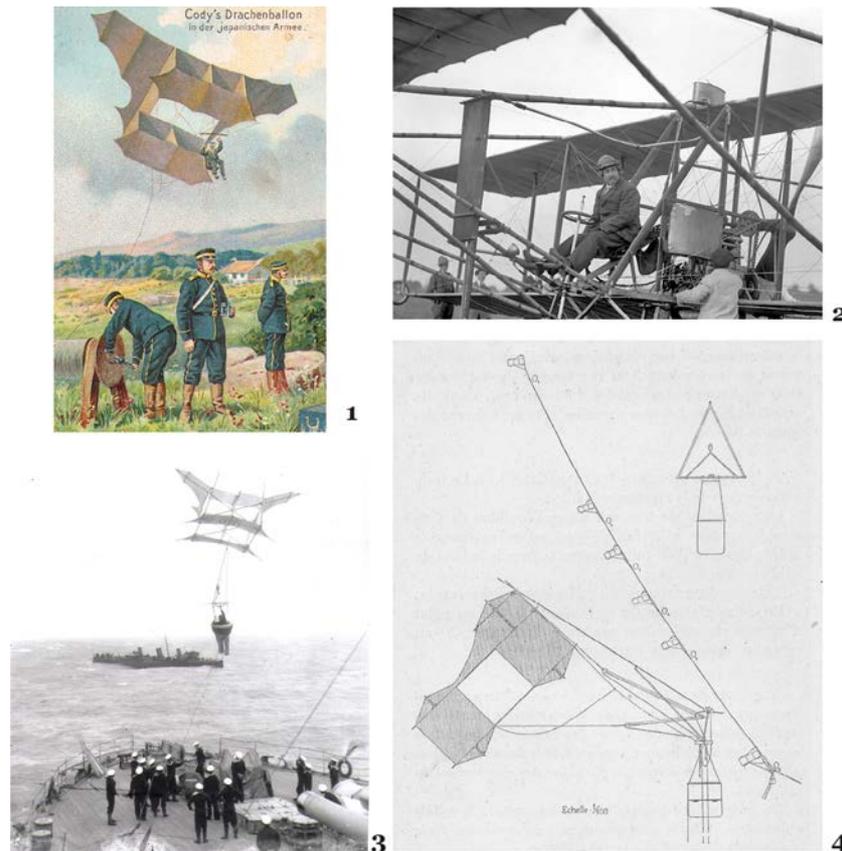
<sup>2</sup> Este sistema fue observado por dos agregados militares españoles los coroneles Francisco Echagüe y Juan García Benítez durante la Primera Guerra Mundial, según: “Al comienzo de la guerra se emplearon bastantes cometas y aún siguen prestando algún servicio, pero jamás las hemos visto; acompañamos sin embargo, algunas fotografías que nos han facilitado y que se refieren a estos aparatos”; a continuación se reproducen unas fotos del sistema de Saconney (Echagüe y García, 1918; Houard, 1913).



**Fig. 84** Cometa (1) y sistema (2) de Schreiber (1903). Cometa (3) y sistema (4) de Madiot (1909). Cometa (5) y sistema (6) de Saconney (1910). (7) Elevación del sistema de Saconney en el crucero de guerra francés *Edgard Guiniet* el 8 de septiembre de 1911. Sistema (8) y cometa (9) comercializada en 1911 por la casa francesa Aug. C. Gomes & C°

Entre ellos destaca el sistema ideado por el americano Samuel Franklin Cody (1861-1913) y empleado por el Servicio de Aerostación británico y la Marina del mismo

país (Cody, 1903; Lee, 1965; Jenkins, 2000). Cody nace en la ciudad norteamericana de Birdville (Texas). En su infancia y juventud trabaja como vaquero, cazador de búfalos y buscador de oro. En 1888 se une a un *Circo del Salvaje Oeste* hasta que se traslada a Inglaterra en el año 1890, donde funda el suyo propio. Aprovecha el gran parecido de su apellido con el legendario William Frederic Cody *Buffalo Bill* (1845-1917), para adoptar su aspecto y dar a su espectáculo un aire más auténtico.



**Fig. 85** Cromo alemán representando la cometa de Cody (1). Cody a los mandos de un avión (2). Sistema de Cody en un barco de la marina inglesa (3). El *man-lifting system* de Cody (4)

A principios del siglo XX empieza a interesarse por las cometas, cuyo resultado es la patente en 1901 de su cometa *warkite* o *Bat*. Esta consiste en dos celdas rectangulares tipo Hargrave provistas de alas angulares (Fig. 85.1). En el año 1903, el Ministerio de la Guerra británico se interesa por el sistema que Cody denomina *man-lifting system*. Este método consistía (Fig. 85.4) en elevar una *cometa piloto*, a la que se une una serie de *cometas elevadoras*, en un tren de hasta seis de ellas, dependiendo de las condiciones del viento. La última, denominada *portadora*, es la más grande y dispone de una barquilla, en la que se instala al observador con su equipo.

Entre los años 1903 a 1905, es utilizado en algunos barcos de la Marina Británica (Fig. 85.3). Por fin, en el año 1906, lo adopta el ejército inglés como equipamiento auxiliar de sus compañías de aerostación. A Cody se le otorga el puesto de Oficial Instructor Jefe de cometas en *Farnborough* (Walker, 1971).

Cody continúa sus trabajos aeronáuticos construyendo aeroplanos más convencionales (Fig. 85.2) y dirigibles. El 16 de Mayo de 1908 vuela por primera vez en un aeroplano, lo que supuso el primer vuelo motorizado de un avión en Inglaterra. En 1913 muere en un accidente, al estrellarse un hidroavión que pilotaba.

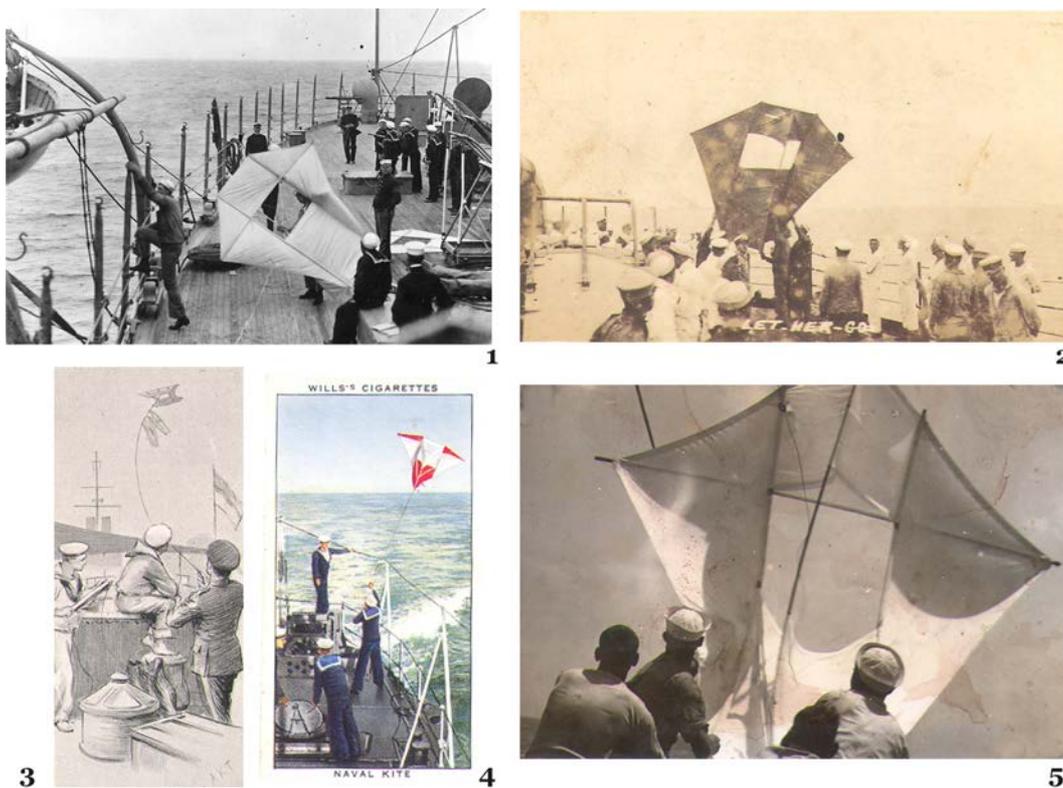


**Fig. 86** Elevación de la antena de Marconi en 1901 (1). Cometa tipo Coyne utilizada como antena en los años veinte del siglo XX (2). Elevación de una *Gibson Girl* (3). Equipamiento completo (4). Instrucciones de montaje de la cometa antena (5). Forma de conectar el emisor (6)

La aparición de la aviación militar hizo que las cometas quedaran obsoletas, al igual que los sistemas de globos. A pesar de ello, en 1917 el ingeniero civil francés

Joseph Louis Leclercq (1864-1931) propone emplear cometas arrastradas por buques con el fin de elevar observadores para la detección de submarinos (Leclercq, 1917; 1918). Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, los submarinos alemanes también emplean cometas con el mismo fin, siguiendo el diseño *Focke Achgelis FA330*<sup>3</sup>.

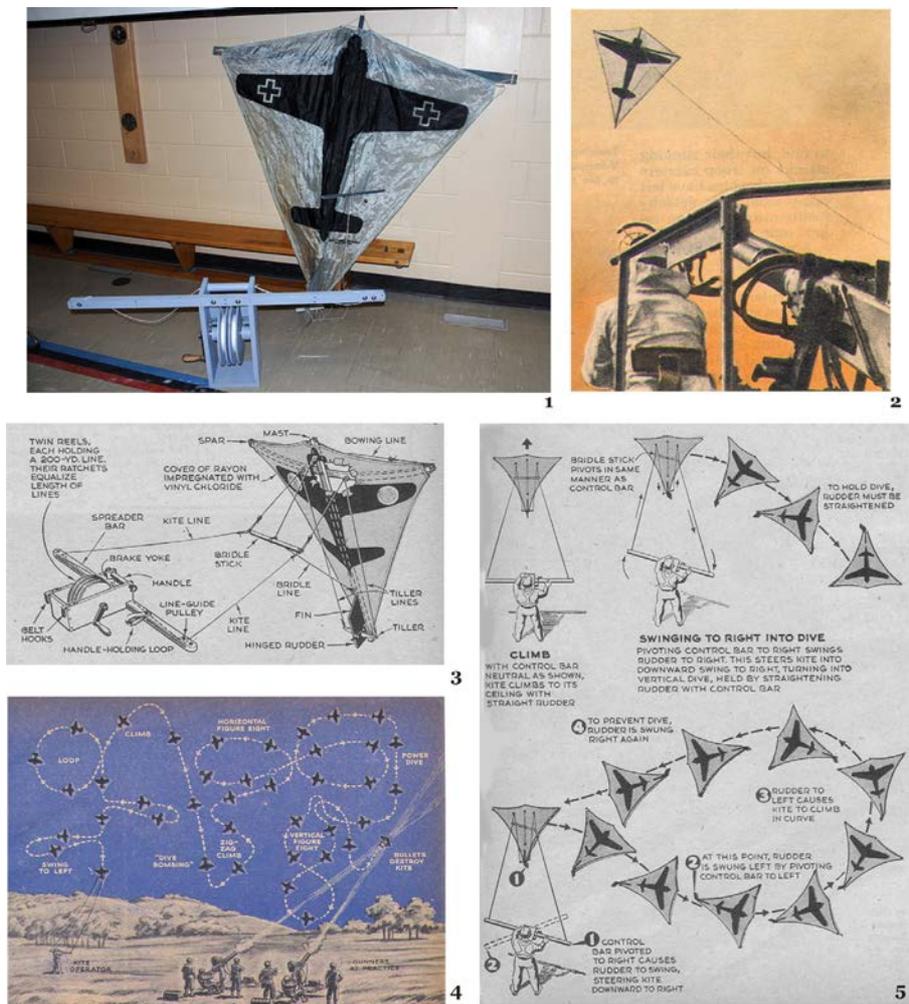
La cometa ha sido usada por los ejércitos para otros fines, tales como elevar antenas en las emisoras de socorro, blanco de tiro y barrera antiaérea. El ingeniero italiano Guglielmo Marconi ya empleó una cometa para elevar una antena (Fig. 86.1) en la primera transmisión de radio transatlántica (McGrath, 1902). Durante la Segunda Guerra Mundial, una cometa celular se incluye en el equipamiento básico de supervivencia de los botes salvavidas de los aviones para elevar su antena. Se conocían por el nombre de *Gibson Girls* (Fig. 86.3-4-5-6)



**Fig. 87** Elevación de una cometa en el buque de la armada estadounidense *USS Maryland* en 1916 (1). Elevación en el *USS Florida* (2). Cometa de Cody utilizada por la armada británica (1903) (3). Izado de una *Naval Kite* en un cromó de los años veinte del siglo XX (4). Elevación en el *USS Pillsbury* en 1925 (5)

<sup>3</sup> Véase el apartado 7 “Cometas de un solo hilo” en la Introducción.

Las primeras cometas-blanco empleadas a principios del siglo XX por la marina inglesa y estadounidense son del tipo Conyne<sup>4</sup> (Fig. 87). En 1942, el oficial de la marina americano Paul Edward Garber (1899-1992), desarrolla una cometa (Garber, 1944) para ser utilizada como blanco móvil en el adiestramiento de los artilleros antiaéreos (Grahame, 1945). Bautizada como *Navy Target Kite* (Fig. 88), es una cometa acrobática que se controlaba con dos hilos desde el suelo. Sobre la vela está pintada una silueta de un *Zero* japonés o un *Focke-Wulf 190* alemán que, volando a 60 m. sobre el azul del cielo, simula ser un avión.

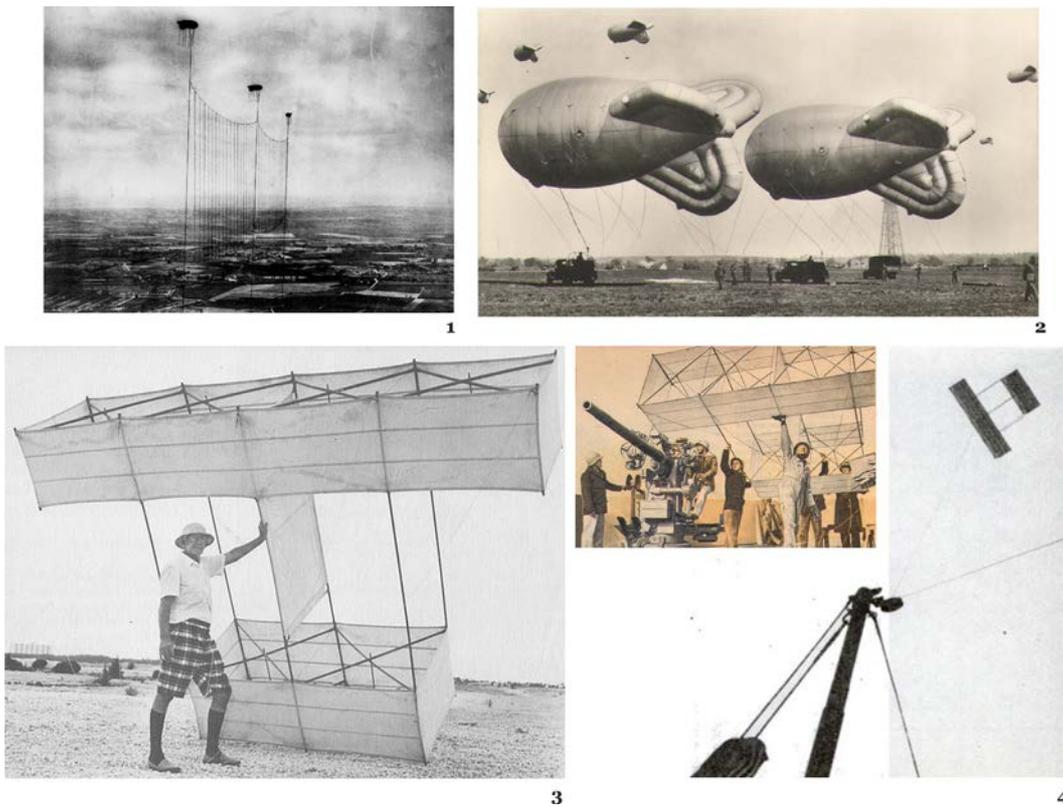


**Fig. 88** USS Navy target kite (1). Fotografía de la *target kite* aparecida en la revista *Popular Mechanic*. Dibujos de Stewart Rouse del uso de la *target kite* en el artículo de *Popular Science* 1945 (2). Mecanismos de control por parte del piloto (3). Operación de la cometa durante el ejercicio de tiro (4). Maniobras básicas (5)

La defensa antiaérea con los denominados globos barrera (Fig. 89.1-2) estuvo muy extendida en los años de la Primera y Segunda Guerra Mundial (Shock, 1995).

<sup>4</sup> Véase el apartado 3 de “Cometas de un solo hilo” en la Introducción.

Anclados al suelo por medio de un cable, tenían como objetivo obstaculizar los ataques de los bombarderos a baja cota. Esta simple estructura comportaba tres importantes beneficios. Por un lado, forzaba a los bombarderos a atacar desde una altura mayor, restándoles puntería. Por otro, aumentaba la eficacia de las defensas antiaéreas terrestres, limitando la dirección y altura de vuelo de los aviones enemigos. El cable de anclaje representaba, además, un riesgo real y psicológico para los pilotos (Hillson, 1989).



**Fig. 89** Barrera de globos y cables sobre el cielo de Londres (1917-1918) (1). Globo barrera durante la Segunda Guerra Mundial (2). H. C. Sauls con su cometa (3). Maniobras de despegue de una cometa barrera en el Atlántico, *Popular Science Magazine* (1944) (4)

Pero no sólo se emplearon globos para confeccionar barreras antiaéreas. En 1943, el norteamericano Harry C. Sauls, de la *War Shipping Administration* (EEUU) ideó una cometa que podía ser empleada en la protección de los convoyes de suministros entre Estados Unidos e Inglaterra. Era del tipo de caja doble, muy estable, con un velo central, y de 6 metros de envergadura (Yolen, 1968, pp.82-4; Pelham, 1976, pp. 78-9; Hart, 1982, p. 164). La cometa es arrastrada por los barcos anclada por 600 metros de cable de acero, capaz de cortar las alas de los aviones que chocasen con él (Fig. 89.3-4).

Existen otros usos militares de las cometas menos importantes, como la fotografía aérea (que veremos en el apartado siguiente), las señales entre los buques de guerra o la elevación de reflectores de señales de radar. Pero, poco a poco, la cometa es sustituida por el aeroplano en todos estos fines.

Finalicemos esta sección con unas palabras sobre el uso militar de la cometa en España, ligado al Servicio de Aerostación Militar español. Creado en el año 1894 (Vives, 1909), hasta su transformación en el Servicio de Aeronáutica Militar en 1913, es el estamento militar encargado de estudiar y valorar los distintos sistemas de elevación de observadores<sup>5</sup>. Los indicios disponibles referentes al uso de cometas por parte del ejército español son escasos. Tan sólo se dispone de unas pocas fuentes secundarias, como las referencias vagas a experimentos realizados con cometas por parte de militares, con el fin de probar prototipos de aviones. Así por ejemplo, en los experimentos llevados a cabo por el Capitán Canellas y Francisco de Paula Gómez en Pinar de Antequera de Valladolid en 1909 y 1910, con el fin de diseñar un aeroplano

Para ello se construyó infinidad de ellas [cometas], unas monoplanas, otras biplanas, triplanas, etc. y dentro de cada una de estas introducía variaciones, consiguiendo así, después de algunos meses adoptar un tipo monoplano.

Convencido de las buenas condiciones de estabilidad y sustentación de su monoplano, construyo un modelo de mayores dimensiones, con el que tiene realizadas infinidad de experiencias en unos terrenos galantemente cedidos para ello por el Sr. Conde de la Oliva de Gaitán, deportista. (Gómez, 1910, p. 131-2)

No más abundantes son las noticias sobre el uso de cometas como blanco de tiro y ascensiones:

En los años 1917 y 1918 se hicieron en el Parque de Aerostación de Guadalajara interesantes ensayos con trenes de cometas de las mismas características que las citadas anteriormente<sup>6</sup>. Estos trenes de cometas sirvieron al principio para practicar el tiro real contra aviones (en aquel tiempo) las secciones de las Escuelas de Tiro de Infantería y Caballería, en los pueblos de Villaviciosa de Odón y Valdemoro. Se desplazaban

---

<sup>5</sup> Por medio del Real Decreto de 28 de Febrero de 1913, y su subsiguiente Reglamento de 16 de Abril, se crea el Servicio de Aeronáutica Militar, que sustituye al Servicio de Aerostación Militar. Este nuevo servicio enmarcado dentro de la Sección de Ingenieros del Ejército, se divide en dos ramas: la Aerostación, que comprenderá “todo lo referente a observatorios aéreos, cautivos, ya sean más ligeros que el aire (globos) o más pesados (cometas), a los globos esféricos libres y a los dirigibles”, y la Aviación, que comprende “todos los medios de locomoción aérea por aparatos más pesados que el aire”. Por lo tanto, comprendía todos los sistemas de observación existentes en la época. Es de destacar que en el desarrollo del reglamento, en el apartado de Aerostación, se dice: “Cuando se organice el servicio de observación por medio de cometas, se crearán secciones especiales que, por de pronto, podrán formar parte de alguna de las unidades existentes; pero que, si tomarán algún desarrollo, deberán constituir una nueva Unidad con el número de Secciones que se acordará, dotándola del material necesario”. Esto puede indicar que, aunque se conocían los sistemas de elevación con cometas, no se había tomado una decisión sobre su uso a la fecha de publicación del Reglamento reproducido en Montoto (1993, pp. 485-99).

<sup>6</sup> Se refiere a las cometas de Sacconey.

elevándolas a remolque de camiones ligeros, que por su velocidad creaban el viento relativo necesario para la sustentación de ellas, y servían al mismo tiempo para practicar el tiro como si fueran aviones en marcha, compensando la escasa velocidad con la diferencia de tamaño existente entre la cometa y un avión.

Se hicieron también ensayos con distintos tipos y superficies para elevar observadores. La aparición de los globos *Caquot* que admitían gran velocidad de viento en buenas condiciones de seguridad y observación, fue la causa de que quedaran olvidadas. (Martínez y Barrera, 1934, pp. 80-1)

Por lo tanto, en España también la cometa fue rápidamente desplazada por los globos y los aviones, más eficaces en los campos de batalla.

### 3 FOTOGRAFÍA AÉREA CON COMETAS (KAP)

La fotografía aérea con ayuda de cometas o *KAP*<sup>7</sup> está estrechamente ligada al desarrollo de la fotografía convencional en el siglo XIX. Si bien es verdad que la primera foto desde el aire se realiza con ayuda de un globo –el 23 de Octubre de 1858, por el francés Gaspard Felix Tournachon *Nadar* (1820-1910) (Beaufort & Dusariez, 1995, p. 13) –, pronto se descubrirían las ventajas de las cometas, pues su mayor estabilidad ante cualquier condición meteorológica permite obtener mejores fotografías que con globos (Fig. 90.1).

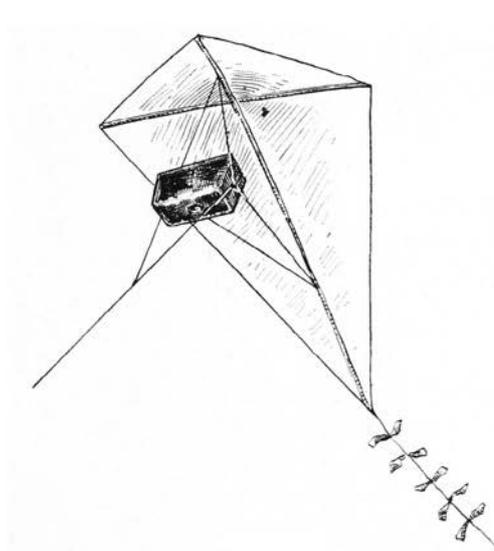
El francés Arthur Batut (1846-1918) concibe la idea de usar una cometa para fotografía aérea. Emplea una cometa plana en la que fija la cámara (Fig. 90.2) con ayuda de un soporte formado por dos piezas triangulares. La cámara, que está construida de madera y cartón, alberga placas fotográficas de 13 x 18 cm. El obturador es de tipo guillotina, que se activa con ayuda de una goma elástica, que se disparaba gracias al consumo de una mecha. Con ayuda de un dispositivo conectado a un barómetro registra la altura a que ha sido tomada la fotografía, quedando impresa en la misma (Tissandier, 1889). Batut publica en 1890, el libro *La Photographie Aérienne par Cerf-Volant*, donde describe su sistema (Batut, 1890; Beaufort & Dusariez, 1995, pp. 101-42). Otro dispositivo similar lo emplea el francés M. E. Wenz (Wenz, 1897; Batut, 1897). La diferencia con el de Batut es que la cámara está sujeta a la brida de la cometa (Fig. 90.4-5).

---

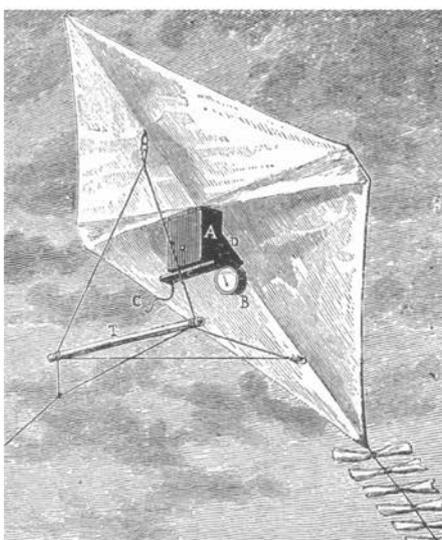
<sup>7</sup> Acrónimo en inglés de *Kite Aerial Photography* (Fotografía aérea con cometas).



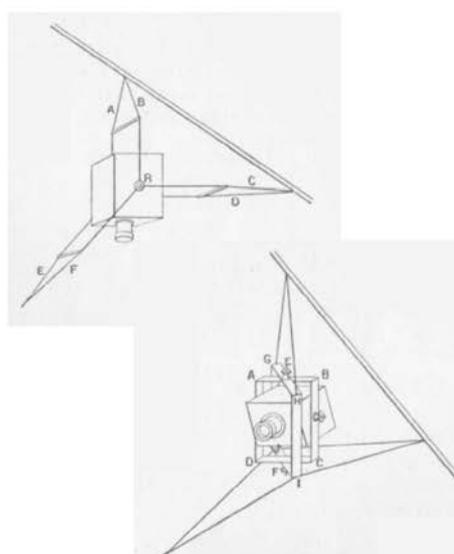
1



4



2



5

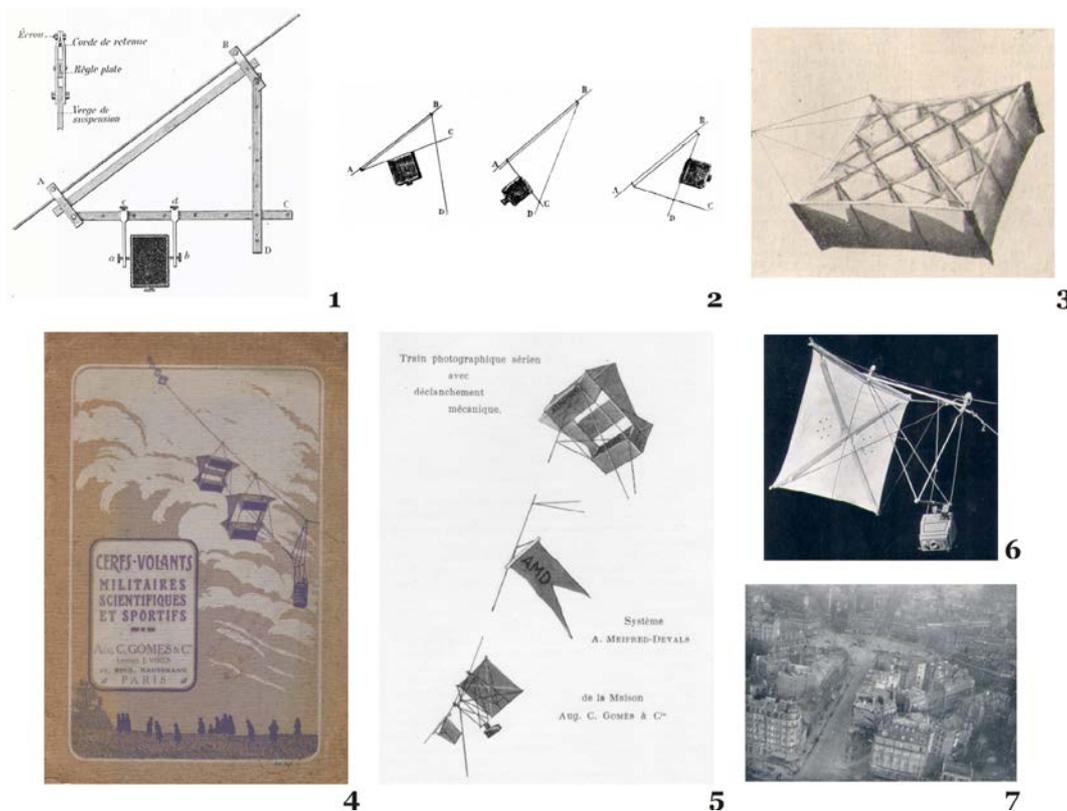


3



6

**Fig. 90** *Nadar élevant la Photographie à la hauteur de l'Art*, litografía de Honoré Daumier, aparecida en *Le Boulevard*, el 25 de mayo de 1863 (1). Sistema de Batut (1890) (2). Fotografía aérea de la ciudad de Labruguiere (Francia) tomada por Batut el 29 de marzo de 1889 a 60 metros (3). Sistema de Wenz (1897) (4). Colocación de la cámara en la brida de la cometa en el sistema de Wenz (5). Fotografía aérea de la ciudad de Sables-d'Olonnes tomada con el sistema de Wenz (6)

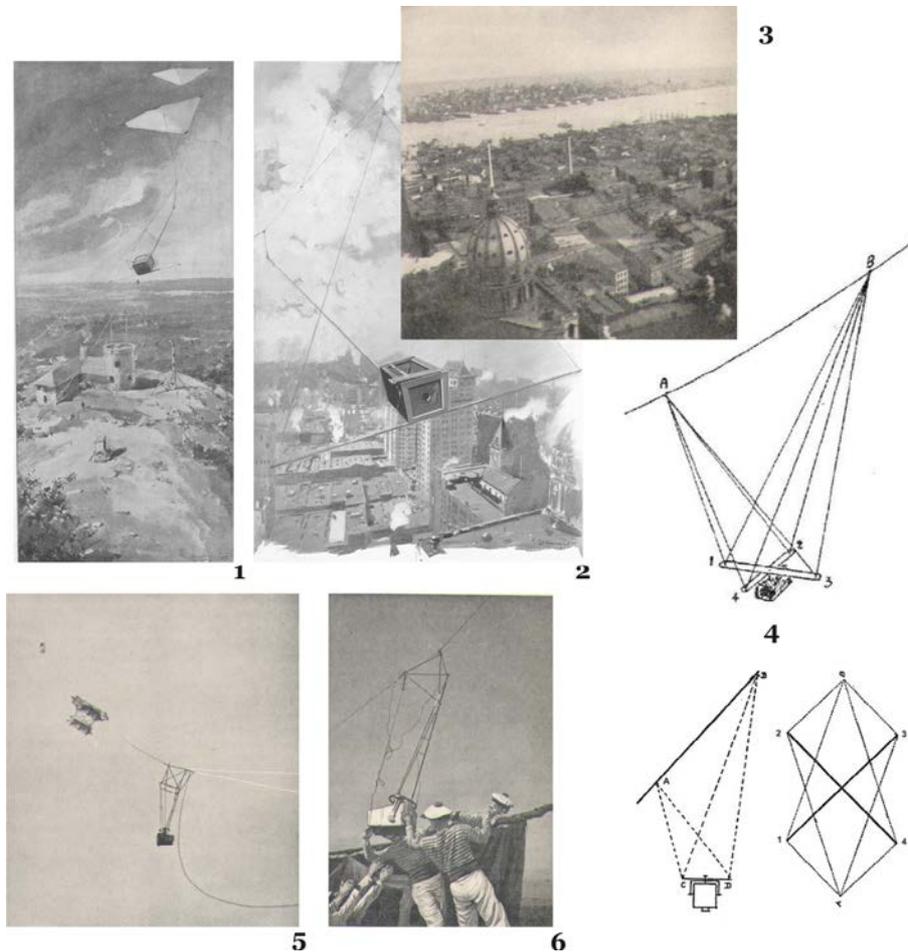


**Fig. 91** Sistema de fotografía con cometas descrito por Lecornu en *Le Cerf-Volant* (1910) (1). Modos de colocación de la cámara con el sistema de Lecornu (2). Cometa multicelular de Lecornu (3). Catálogo de la casa *Aug. C. Gomes & C<sup>o</sup>* (4). Sistema Gomes de fotografía (5). Dispositivo de sujeción y disparo en el sistema Gomes (6). Fotografía aérea de la *place Péreire* de París tomada con el sistema Gomes el 11 de abril de 1911 (7)

El ingeniero francés Joseph Lecornu, en su libro *Les Cerf-Volants*, describe los sistemas de fotografía con cometas de Batut y de Wenz para después proponer su sistema, en el que la cámara está suspendida del hilo de la cometa (Fig. 91.1) mediante una estructura, que permite orientar la cámara en el ángulo que se desee (Fig. 91.2) dentro de unos límites (Lecornu, 1910, pp. 165-99). Para elevar el conjunto emplea un diseño propio de cometa multicelular (Fig. 91.3) (Lecornu, 1910, pp. 74-88). Otro sistema es fabricado por la empresa francesa *Aug. C. Gomes & C<sup>o</sup>* en 1910, que comercializa a través de un catálogo (Fig. 91.4). Dentro de esta publicación se describe las partes en que consta el sistema, denominado *L'Aerophoto* (Fig. 91.5), que está compuesto por las siguientes partes, una cometa celular desmontable y fácil de transportar, por cuyo hilo, con ayuda de una vela (Fig. 91.6), se eleva un soporte donde se coloca la cámara fotográfica. Un *mensajero*<sup>8</sup> sube por la cuerda con el fin de activar

<sup>8</sup> Un mensajero es un sistema empleado para subir objetos por el hilo de una cometa, con ayuda del viento, consta de un cuerpo y de una vela. El cuerpo, que transporta un objeto enganchado a él, es

el obturador de la cámara. Todo el conjunto se recupera con ayuda de una pequeña cuerda, por lo que no hace falta bajar la cometa principal, para rearmar la cámara y cambiar la placa fotográfica.



**Fig. 92** Dibujo de un tren de cometas de Eddy transportando una cámara fotográfica *McClure's Magazine* (1896) (1). Dibujo del detalle del sistema de suspensión de Eddy *Century Illustrated Monthly Magazine* (1897) (2). Fotografía aérea de Nueva York tomada por Eddy en 1896 (3). Sistema de Picavet (1912) (4). Sistema de fotografía aérea con una tren de cometas de Cody (5). Elevación de la suspensión de la cámara desde el buque francés *Desaix* en la rada de Mogador (Marruecos) en 1909 (6)

En un artículo aparecido en la revista *Le Cerf-Volant* en 1912, escrito por el francés Pierre Picavet (1892-1973) (Picavet, 1912), se describe un sistema para suspender la cámara por medio de un soporte en forma de X, que se sujeta al hilo de la cometa con ayuda de una estructura funicular (Fig. 92.4). Un sistema similar fue empleado por el americano Willian Eddy en 1895, quién usando su cometa (Fig. 92.2),

---

impulsado por la vela y asciende por el hilo. Al llegar arriba, tropieza con un tope que hace que se dispare un mecanismo que pliega la vela y libera el objeto. Éste cae, y el mensajero con la vela plegada, desciende por la cuerda. En otros casos, es otro mensajero, el que ascendiendo tras el primero, choca con el mismo y dispara el mecanismo (Lecornu, 1910, pp. 131-40).

logra sacar fotografías aéreas desde 400 m. de altura (Eddy, 1897, p. 88; Moffett, 1896).<sup>9</sup>

La edad de oro del KAP abarca un periodo comprendido entre los años 1900 y 1915, con los sistemas que hemos comentado y el uso de cometas celulares, sobre todo en aplicaciones militares<sup>10</sup>. A partir de la Primera Guerra Mundial, las cometas para hacer fotografías son abandonadas por la aparición de los globos y los aviones.

#### 4 SOCIEDADES DE AFICIONADOS Y VUELOS DE COMETAS

La existencia de una serie de publicaciones editadas en Francia tales como *Revue du Cerf-Volant* impresa por la *Ligue Française du Cerf-Volant* entre los años 1912 y 1914, o la revista *Le Cerf-volant* que empieza a publicarse en 1909, pone de manifiesto la existencia, no sólo en Francia sino también en otros países<sup>11</sup>, de una serie de asociaciones de aficionados dedicadas a los usos de las cometas en actividades tales como la fotografía aérea, la experimentación con nuevos modelos o la simple divulgación de estos objetos voladores.



**Fig. 93** Portada de la revista *Le Cerf-volant* septiembre 1910 (1). Cartel del *Grand Concours International de Cerf Volants Scientifiques et Militaires* de Spa (Belgica) 1912 (2)

<sup>9</sup> El norteamericano Gilbert Totten Woglom describe el sistema y la cometa de Eddy, con el nombre de *parakites* (Woglom, 1896; 1897).

<sup>10</sup> El ingeniero militar francés Saconney propuso emplear la fotografía aérea para realizar levantamientos topográficos (Saconney, 1913, Paris, pp. 75-137).

<sup>11</sup> En estas publicaciones se describen actividades no sólo en Francia sino en otros países europeos como Alemania, Bélgica o Inglaterra.

En España, la cometa entra en este contexto a través de las asociaciones aeronáuticas fundadas en Cataluña a principios del siglo XX (Canudas, 1983, pp. 17 – 27). En concreto, la constituida en Barcelona con el nombre de *Liga Española de la Cometa*. Su actividad se puede rastrear por las noticias publicadas en revistas francesas dedicadas a la construcción de cometas, tales como las mencionadas anteriormente, y por su participación en encuentros internacionales organizados por asociaciones similares europeas. Por ejemplo El *Grand Concours International de Cerf Volants Scientifiques et Militaires de Spa* que se celebra, en esta ciudad belga, entre el 18 y 25 de agosto de 1912 con la participación de sociedades dedicadas al vuelo de cometas de Francia, Bélgica, Inglaterra y España<sup>12</sup>. O su participación en un concurso de vuelo de cometas en la montaña del Tibidabo el 7 de mayo de 1911 en Barcelona<sup>13</sup>:

Primer concurso español de cometas:

A la Sociedad Aeronáutica española cabe la satisfacción de haber organizado el primer concurso español de cometas (cerf-volants) que tuvo lugar el 7 del actual en la cumbre del Tibidabo.

El viento, que soplaba con intermitencia, no era nada favorable para las cometas sin cola, especialmente para las de gran tamaño que no pudimos admirar, y por ese motivo dejaron de elevarse las del “Drago Club”, de Francia, y del “Club Nacional de la Gran Bretaña”, consiguiéndolo solo ocho de las diez y ocho que estaban inscritas para las pruebas de altura, estabilidad, facilidad de elevación y peso útil elevado.

Después de haber deliberado los Señores Comisarios, presididos por D. Pablo de Olano, Vicepresidente de la Sociedad, determinaron el resultado del concurso con arreglo a la siguiente clasificación:

Primer premio: 25 pesetas, medalla de oro y diploma honorífico: Sr. Juandó, con su cometa celular.

Segundo premio: Medalla de Plata y diploma honorífico: Sr. Perola, con su cometa plano.

Tercer premio: Medalla de cobre y diploma honorífico. Sr. Guillen, con su cometa multicelular.

Premio de la revista *Cerf-Volant*, de París al que elevase más peso útil por m<sup>2</sup>, Sr. Guillen con su cometa Coynine.

Premio de la revista *Aeronautics Magazine*, de los Estados Unidos al que emplease menos tiempo en el lanzamiento: Sr. Juandó, con su cometa celular.

Al felicitar a la Sociedad organizadora por su iniciativa dando a conocer en España la evolución que ha sufrido el antiguo juguete convirtiéndose en aparato científico y de variadas aplicaciones, deseamos que el éxito de su ensayo les sirva de estímulo y planteamiento de otros ulteriores concursos.<sup>14</sup>

Además, otras asociaciones no exclusivamente dedicadas a las cometas realizaron actividades relacionadas con las mismas, así, la *Asociación de Locomoción Aérea*,

---

<sup>12</sup> Según se puede leer en el número de agosto de 1912 de la revista *L'aviation Industrielle & Comerciale* publicada de la sociedad *Avion* de Bruselas.

<sup>13</sup> La noticia tuvo un seguimiento en el periódico *La Vanguardia* de los días 29 de abril, 4, 6, 7, 9 y 10 de mayo de 1911.

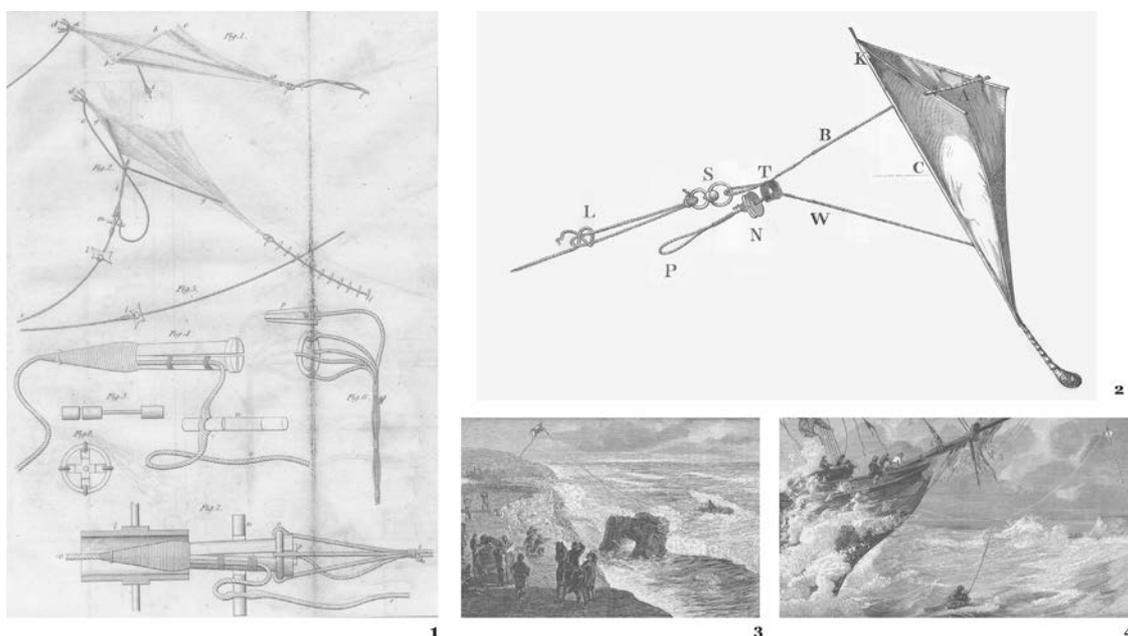
<sup>14</sup> Noticia aparecida en el número 386 de la revista *Aviación* editada en Barcelona en 1911. También aparece en una carta publicada por José María Guillen en la revista *Le Cerf-Volant* de junio de 1911.

fundada en 1908 que organizó una exposición de cometas y aeroplanos militares en un local del Paseo de Gracia de Barcelona entre los meses de marzo y abril de 1910<sup>15</sup>. O la *Juventud Aviadora Española* que inició sus actividades con un concurso de cometas celulares en Vallvidrera (Canudas, 1983, p. 17).

Estas asociaciones de aficionados asumen el interés por las cometas que, bajo la denominación de científicas, no son otras que las empleadas en meteorología, en usos militares o en fotografía aérea. La cometa en este contexto no es un juego de niños, es objeto de importancia similar a la que le concedía la sociedad de principios del siglo XX a un aeroplano o a un globo aerostático. Prueba de esto son el éxito de las exhibiciones populares de vuelo de estos artefactos que aparecen en los periódicos de la época (González-Granda, 1994a; 1994b).

La desaparición del interés por estos objetos por parte de estas asociaciones va ligado al desarrollo del aeroplano, que hizo que las cometas fueran vistas como objetos obsoletos y carentes de interés, volviendo a su condición de juego infantil.

## 5 COMETAS PARA SALVAMENTO MARÍTIMO



**Fig. 94** Cometa de salvamento de Dansey (1822) (1). Cometa de salvamento de Nares (1861) (2). Grabados del libro *Seamanship* que muestran el uso de la cometa de Nares (3) (4)

<sup>15</sup> Según aparece en el número 3 de marzo de 1910 de la *Revista de Locomoción Aérea*, boletín de la Asociación y en el periódico *La Vanguardia* del día 22 de febrero de 1910.

Durante el siglo XIX, una de las múltiples aplicaciones que tienen las cometas es la de salvamento marítimo. Puesto que la mayoría de los naufragios ocurren cerca de la costa, se puede emplear una cometa para tender un cabo entre el barco y la costa y así rescatar a los náufragos. El primer dispositivo práctico conocido se debe al capitán de artillería inglés C. C. Dansey. Está formado por una cometa (Fig. 94.1) que transporta un rezón<sup>16</sup> que se dirige hacia tierra desde el barco, de tal forma que al llegar a la costa se hace caer, enganchándose rápidamente al suelo (Dansey 1823). Este aparato es probado de manera satisfactoria varias veces, llegando a ganar la *Gold Vulcan Medal* de la *Society of arts, manufactures, and commerce*.

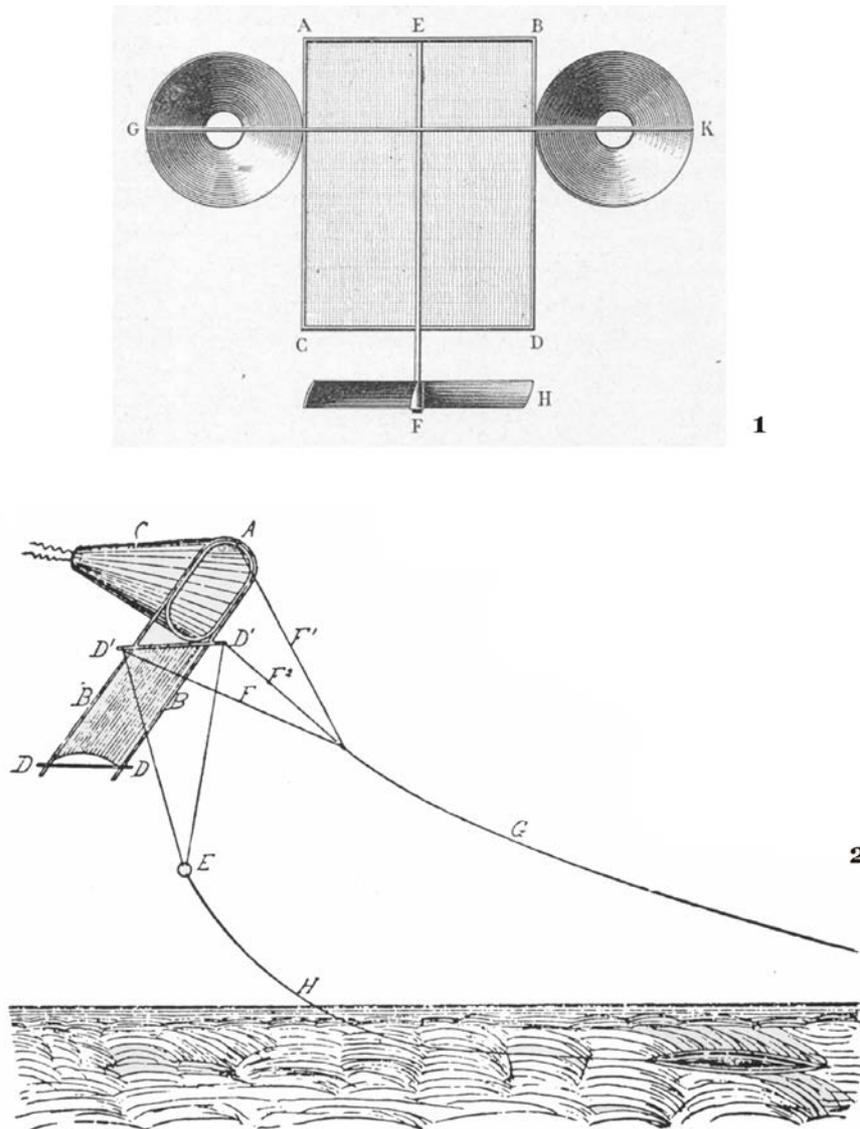
Posteriormente el almirante inglés Sir George S. Nares (1831-1915), en su obra *Seamanship* (1861), describe otro sistema de salvamento (Fig. 94.2) que, al igual que Dansey, usa una cometa que se hace volar hacia la costa transportando un cabo con un ancla (Nares, 1882, pp. 276-9). Al llegar a tierra se hace descender por medio del siguiente dispositivo especial (Fig. 94.3-4). A la cometa se le coloca un segundo hilo que se emplea para controlar el vuelo. Este pasaba a través de un anillo (T) (Fig. 94.2), que es la unión de la brida con el hilo principal. Si el viento es favorable hacia la costa, el hilo de control se engancha en la parte inferior de la cometa (P), estirando éste cuando sobrevuela la costa, para romper el equilibrio y precipitarla al suelo. Si el viento es oblicuo, entonces el hilo se engancha en la esquina de la cometa. Manipulando dicho hilo durante el vuelo se guía hacia tierra, y si se estira bruscamente en ese momento la línea principal, la cometa cae al suelo.

En el año 1887, el francés C. Jobert, describe en un artículo publicado en la revista francesa *L'Aéronaute*, una cometa (Fig. 95.2) usada para transportar un cabo de salvamento (Jobert, 1887). Formada por un cono en la parte superior y una vela plana en la inferior. Dependiendo de las condiciones meteorológicas, las bridas se ajustan con un determinado ángulo de ataque. Esto hace que la cometa vuele a una altura considerable sobre la superficie del agua (unos 40 m para un ángulo de 30°). Permitiendo que un hilo (H) arrastre, horizontalmente, una boya con un cabo. El vuelo es muy estable con vientos fuertes, y para localizar esta cometa en la oscuridad o con niebla, en la parte de atrás del cono, dos piezas metálicas vibran con el viento, produciendo una señal de

---

<sup>16</sup> Ancla pequeña, de cuatro uñas y sin cepo, que sirve para embarcaciones menores.

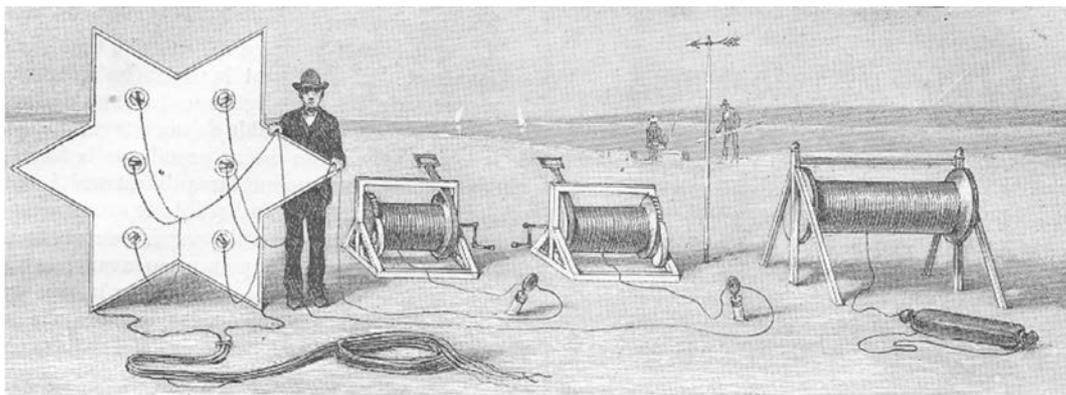
socorro. Este tipo de cometa es muy similar a la diseñada por el ingeniero francés Biot<sup>17</sup> (Fig. 95.1), que presenta el 8 de julio de 1880 a la *Société française de Navigation aérienne*<sup>18</sup>. Otro sistema es el inventado por el americano John Woodbridge Davis, quien en el año 1894, idea una cometa dirigible (Fig. 96) por medio de dos hilos, con el fin de transportar un cabo de salvamento, desde un barco hasta la playa en caso de naufragio (Davis, 1894).



**Fig. 95** Cometa de Biot (1). Grabado del sistema de salvamento de Jobert (2)

<sup>17</sup> No confundir con el físico, astrónomo y matemático francés Jean-Baptiste Biot (1774-1862), quien en 1804, construyó un globo y ascendió, junto con el también físico francés Joseph Gay-Lussac (1778-1850), hasta una altura de cinco mil metros.

<sup>18</sup> Según aparece acta de la reunión publicada en el número de la revista *L'Aéronaute* de noviembre de 1880, pp. 272-4. Existe una descripción más detallada en Lecornu (1910, pp. 62-3).



1



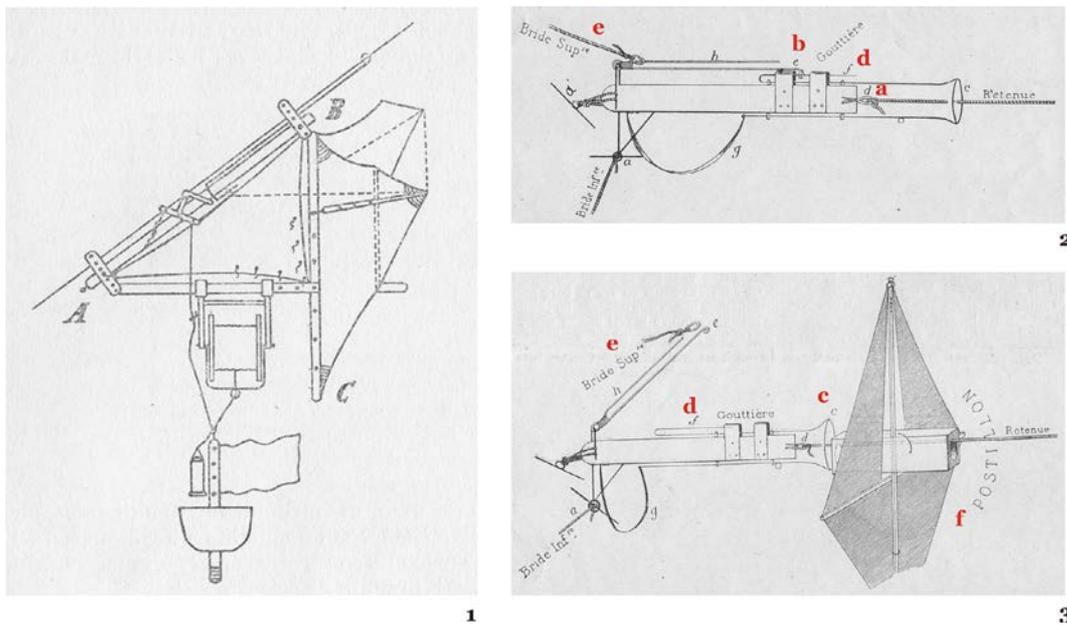
2



3

**Fig. 96** Cometa de salvamento de Woodbridge. Elementos del dispositivo (1). Grabados de los usos de la cometa en salvamento marítimo (2) (3)

En la obra *Le Cerf-Volant de Sauvetage*, publicada en 1913, se describe un sistema de salvamento con cometas que aprovecha el soporte ideado por Lecornu en su sistema de fotografía aérea (Poujoula, 1913, pp. 21-31). El dispositivo asciende por el hilo de la cometa con ayuda de una vela (Fig. 97.1), y sujeto al mismo se coloca un carrete de cordel con una boya en su extremo. Sobre el hilo se sitúa un tope de forma que aproximadamente este encima del naufragio. Cuando el soporte con la boya choca con este tope, dispara un mecanismo que hace descender la boya junto con la cuerda de un carrete. La recuperación de la boya permite a los naufragos, hacerse con la cuerda de la cometa y utilizarla como cabo de salvamento. Otro sistema similar es el ideado por el comandante francés Brossard de Corbigny (Anónimo, 1910; Poujoula, 1913, p. 11). En este caso un pestillo disparador libera la brida de la cometa, obligando a aterrizar la misma en tierra desde un barco naufragado, y así rescatar el buque desde la costa (Fig. 97.2-3).



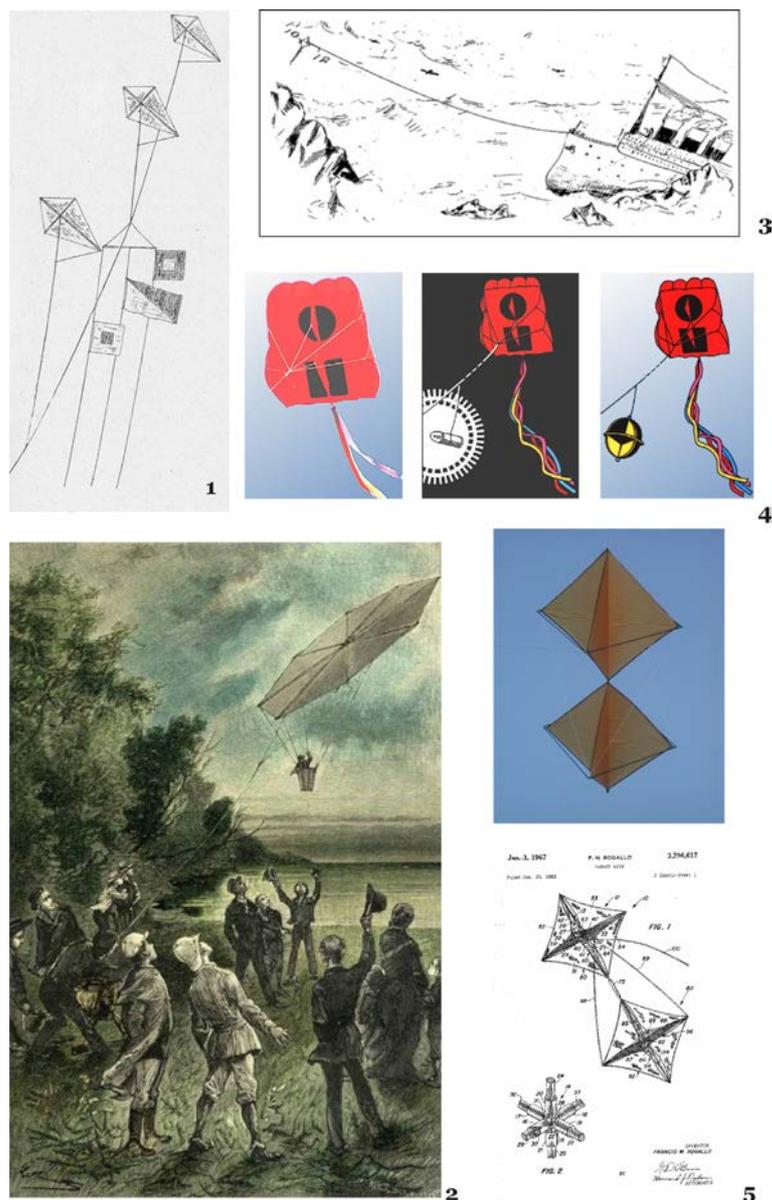
**Fig. 97** Sistema de salvamento sobre el soporte de Lecornu (1). Sistema de Brossard de Corbigny (2) (3): La cuerda de la cometa se ataba en el punto (a), mientras que la brida superior (e) de la misma, se hacía en el gancho (b). Cuando la cometa sobrevolaba la costa, se enviaba un mensajero provisto de vela (f), el cual disparaba el gancho (d) al chocar con (c), soltando la brida (e) y, por lo tanto, la cometa, se desestabilizaba y caía al suelo

Se idean otros sistemas (Lecornu, 1910, pp. 259-70), pero todos se basan en los mismos principios, aprovechar una cometa para lanzar, ya sea desde un barco naufragado, desde tierra u otro barco, un rescate un cabo de rescate.

También las cometas se emplean para elevar banderas de señales (Fig. 98.1), e incluso la misma cometa como señal, este uso tiene su referencia más antigua en oriente. Así, en el libro de relatos chinos *Tu I Chih* (Cosas extrañas y únicas), fechado en el siglo VII u VIII d. C., se puede leer:

In the Thai-Chhing reign-period (+547 to +550) of Liang Wu Ti, Hou Ching rebelled, and besieged Thai-chhêng (Nanking), isolating it from loyal forces far and near [...] decided to use many kites flying in the sky to communicate knowledge of the emergency to the army leader at a distance. The officers of Hou Ching told him that there was magic afoot, or that messages were being sent and ordered archers to shoot at the kites. (Needham, 1965, p. 577)

Otro uso es el empleado por el general chino Han Hsin, quién en el año 169 a. C., utiliza una cometa con el fin de calcular la distancia, en línea recta, a la que se encuentra del palacio de su enemigo, para terminar un túnel que está construyendo (Hart, 1982, p. 25).



**Fig. 98** Utilización de un tren de cometas como poste de señales según un grabado de la obra *Le Cerf-Volant* de Lecornu (1910) (1). Grabado de la cometa de la novela *Dos años de vacaciones* de Verne (1888) (2). Utilización de una cometa de señales en un naufragio (3). Cometa moderna de salvamento (4). Cometa reflector de radar de Rogallo (1967) (5)

Construir una cometa para hacer una señal, y su posterior uso como cometa para elevar a un observador, es lo que hacen los protagonistas de la novela *Dos años de vacaciones*, escrita en 1888 por el escritor francés Jules Verne (1828-1905). La cometa descrita en la novela es de tipo octagonal (Fig. 98.2), similar a la empleada por Maillot<sup>19</sup> en el año 1886, del que Verne hace referencia<sup>20</sup>.

<sup>19</sup> Véase *infra* el apartado “Sistemas de elevación de personas con cometas”.

<sup>20</sup> Briant, uno de los jóvenes protagonistas de la novela, dice haber leído en un periódico inglés que una mujer tuvo la audacia de volar con una cometa. Por lo tanto, propone construir una para observar la isla.

En la actualidad se comercializan cometas para ser usadas como señal de socorro en el mar de día o elevando luces por la noche (Fig. 98.4). Francis Rogallo, aparte de su ala flexible<sup>21</sup>, patenta una cometa (Fig. 98.5) para ser utilizada como reflector de radar<sup>22</sup>. En fin, múltiples han sido los otros usos de las cometas, que como en otras ocasiones han pasado al olvido, regresando siempre a su uso original, un objeto lúdico asociado a la diversión infantil.

---

Verne coloca una nota a pie de página: “El proyecto de Briant iba a realizarse en Francia. Pocos años después, una cometa de 24 pies de ancho por 27 de largo, de forma octogonal y cuyo peso era de 68 kilos de armazón y 45 de cola y cuerda, o sea 113 kilogramos en total, levantó un saco de más de 70 kilos (Verne, 2008, nota p. 316).

<sup>21</sup> Véase el apartado 4 “Cometas de un solo hilo” en la Introducción.

<sup>22</sup> Dispositivo que se coloca en pequeñas embarcaciones, sobre todo de vela, con el fin de que se reflejen de manera más eficaz las señales de radar emitidas por otros barcos y así hacerse más visibles, sobre todo de noche o con niebla.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- AAVV (2000), Edición digital *L'Encyclopedie de Diderot et D'Alembert* Redon, París.
- Abbe, Cleveland (1896), "The Franklin kite club", *Monthly Weather Review*, XXIV, p. 416.
- Abbe, Cleveland (1897), "The development of the kite by european scientists", *Monthly Weather Review*, February, pp. 58-61.
- Ackeret, Jakob (1957), "Vorrede" En: Speiser, Andreas; Pasquier, Louis Gustave du ; Trost, Ernst & Blanc, Charles (eds.) *Leonhardi Euleri opera omnia vol. 15 serie 2*, Lausana, Societatis Scientiarum Naturalium Helveticae, pp. VII– LX.
- Albiñana, Josep (1914), "El observatorio de Zugspitze y el estudio de las altas regiones de la atmósfera", *Ibérica*, II, (48), pp. 344-349.
- Anderson, John D. (1997), *A history of aerodynamics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Anderson, John D. (2002), *The airplane. A history of its technology*, Reston (VA), American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Anduaga, Aitor (2000), *La aerología o el estudio de las altas capas de la atmósfera en España en el primer tercio del siglo XX*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente.
- Anónimo (1847), "Experiments made at the Kew Observatory on a new kite-apparatus for meteorological observations, or other purposes", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, XXXI, (207), pp. 191-192.
- Anónimo (1897), "Kites at the Chicago conference", *Monthly Weather Review*, July, pp. 310-314.
- Anónimo (1910), "Le cerf –volant porte-amarres et ses usages à bord", *Le Cerf-volant* (16), pp. 52-56.
- Archibald, E. Douglas (1884), "An account of some preliminary experiments with Biram's anemometers attached to kite strings or wifes", *Nature*, 31, (786), p. 66.
- Assmann, Richard (1915), *Das Königlich preussische aeronautische observatorium*, Lindenberg, Braunschweig, F. Vieweg & Sohn.
- Baden-Powell, B. F. S. (1899), "The war kite. Story of the evolution of a kite that will lift a man", *McClure's Magazine*, April, pp. 544-548.
- Bails, Benito (1780), *Elementos de matemática. Tomo V hidrodinámica*, Madrid, Joachin Ibarra, Impresor de Cámara de SM y de la Real Academia.
- Baker, W.J. (1970), *A history of the marconi company*, Londres, Methuen & Co Ltd.
- Balsley, Ben B.; Jensen, Michael L. & Frehlich, Rod G. (1998), "The use of state-of-the-art kites for profiling the lower atmosphere", *Boundary-Layer-Meteorology*, (87), pp. 1-25.
- Balsley, Ben B.; Williams, J. B., Tyrrell, G.W. & Balsley, C. L. (1992), "Atmospheric research using kites: here we go again!" *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, (73), pp. 17–29.
- Barona, Josep Lluís; Moscoso, Javier y Pimentel, Juan (2003), "Introducción". En: Barona, Josep Lluís; Moscoso, Javier y Pimentel, Juan (eds.) (2003), *La Ilustración y las ciencias. Para una historia de la objetividad*, Valencia, Universitat de València, pp. 9-17.
- Barton, Garry & Dietrich, Stefan (2009), *This ingenious and singular apparatus. Fishing kites of the Indo-Pacific*. Heidelberg, Völkerkundemuseum vPST.
- Batut, Arthur (1890), *La photographie aérienne par cerf-volant*, Paris Gauthier-Villars et fils.

- Batut, Arthur (1897), “Photographie aérienne par cerf-volant”, *La Nature*, Janvier, (1231), pp. 69-70.
- Bayard, F. Campbell (1899), “The Government Meteorological Organizations in various parts of the world”, *Quarterly Journal of the Royal meteorological Society*, 35, (10), pp. 69 – 132.
- Beaufort, Geoffroy de & Dusariez, Michel (1995), *Aerial photographs taken from a kite. Yesterday and today*. KAPWA Foundation Publishing.
- Beccaria, Giambattista (1776), *A treatise upon artificial electricity*, London, J. Nourse.
- Bell, Alexander Graham (1903), “The tetrahedral principle in kite structure”, *National Geographic Magazine*, 14, (6), pp. 219 – 251.
- Bensaude-Vicent, Bernadette & Blondel, Christine (eds.) (2008), *Science and spectacle in the European enlightenment*, Hampshire, Ashgate Publishing Limited.
- Berger, Gérard & Amar, Sonia Ait (2009), “The noteworthy involvement of Jacques de Romas in the experiments on the electric nature of lightning”, *Journal of Electrostatics*, 67, (2–3), pp. 531–535.
- Bertholon, Pierre (1787), *De l'électricité des météores*, Paris.
- Bertucci, Paola (2008), “Domestic spectacles: electrical instruments between”. En: Bensaude-Vicent, Bernadette & Blondel, Christine (eds.), *Science and spectacle in the European enlightenment*, Hampshire, Ashgate Publishing Limited, pp. 75-87.
- Bird, Alexander (2002), *Thomas Kuhn*, Madrid, Tecnos.
- Bjerknes, Vilhelm (1904), “Das problem von der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik” (The problem of weather prediction, considered from the viewpoints of mechanics and physics), *Meteor. Zeitschrift*, (21), pp. 1-7 (translated and edited by Volken Esther; Brönnimann, Stefan (2009) *Meteor. Zeitschrift*, (18), pp. 663–667.
- Blair, William R. (1909), “The exploration of the upper air by means of kites and balloons”, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 48, (191), pp. 8-33.
- Blanc, Charles & Haller, Pierre de (1979), “Preface” En: Habicht, Walter; Trost, Ernst & Blanc, Charles (eds.), *Leonhardi Euleri opera omnia, vol. 16 serie 2*, Berna, Societatis Scientiarum Naturalium Helveticae, pp. VII–XVII.
- Block, Symour Stanton (2004), *Genius of kites, flights and voting right*, Jefferson NC, McFarland & Company, Inc Publishers.
- Bois, Théophile (1906), *Le cerf-volants et l'eus applications militaires*, París, Nancy: Berger-Laurealt et Cie.
- Boltzmann, Ludwig (1894), “Sobre viajes en aeronaves”. En: Sánchez Guillen, Joaquín (2009), *L. E. Boltzmann. El científico que se adelantó a su tiempo, el hombre que vivió intensamente*, Zaragoza, Prensas Universitarias de Zaragoza, pp. 106-14.
- Brenni, Paolo (2009), “Prometheus’ tools. Instruments and apparatus used in atmospheric electricity research and experiments” en: Heering, Peter; Hochade, Olivier & Rhees, David J. (ed.) *Playing with fire. Histories of the lightning rod*, Philadelphia, American Philosophical Society, pp. 230-255.
- Breukels, J. (2010), *An engineering methodology for kite design*, Tesis doctoral, Technische Universiteit Delft, [en línea] disponible en: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Acdece38a-1f13-47cc-b277-ed64fdda7cdf/> [consultado 5/12/2012].
- Brisson, Mathurin Jacques (1796-1802), *Diccionario universal de física escrito en francés por M. Brisson. Traducido al castellano, y aumentado con nuevos*

- descubrimientos posteriores a su publicación por los doctores D.C.C. y D. F. X.C. (10 vol.), Madrid, Imprenta de Don Benito Cano.*
- Bussey, Gordon (2000), *Marconi's Atlantic leap*. Cambridge (Inglaterra), Cambridge University Press.
- Canguilhem, Georges (1983), "El objeto de la historia de la ciencia", traducido y editado por Moro Abadía, Oscar (2009) *Empiria*, (18), pp. 199-210.
- Canudas, Josep (1983), *História de l'aviació catalana (1908 – 1936)*, Barcelona, Ediciones de la Margrana.
- Cavallo, Tiberius (1782), *A complete treatise on electricity*, Londres.
- Cayley, George (1809a) (1809b) (1810), "On aerial navigation. Part I", *A Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts*, (24), "On Aerial Navigation. Part II", *A Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts*, (24), "On aerial navigation. Part III", *A Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts*, (25), En: Gibbs-Smith, Charles Harvard (1962), *Sir George Cayley's aeronautics 1796 – 1855*, Londres, H.M. Stationery Off., pp. 213-244.
- Chang, Hasok (2004), *Inventing temperature. Measurement and scientific progress*, Nueva York, Oxford University Press.
- Chanute, Octave (1894/1997), *Progress in flying machines*, Nueva York, Dover Publications.
- Chanute, Octave (1897), "Recent experiments in gliding flight". En: Means, James (ed.) *Aeronautical Annual 3*, Nueva York, pp. 30-53.
- Cody, Samuel Franklin (1903), "The kite that lifts a man", *Pearson's Magazine*, XVI, (8), pp. 106-113.
- Cohen, I. Bernard (1990), *Benjamin Franklin's science*, Cambridge MA. Harvard University Press.
- Colladon, Jean-Daniel (1887), "Expériences sur les cerf-volant", *La Nature*, 15, (757), pp. 97-98.
- Corleto, Carmelo di (1942), *Los sondeos de la atmósfera con meteorógrafos, Utilizando Aeroplanos*. Buenos Aires, El Ateneo.
- Crewe, Maurice (1994), "The first meteorological research flight", *Weather* (49), pp. 61-65.
- Da Cunha, A. (1901), "L'Observatoire météorologique de Trappes. Cerf-volant et ballons sondes", *La Nature*, 1º semestre, pp. 179-182.
- Dalmedico, Amy Dahan (2001), "History and epistemology of models: meteorology (1946-1963) as a case study", *Archive for History of Exact Sciences*, 55, (5), pp. 395-422.
- Dansey, C. C. (1823), "Mode of communicating with vessels stranded on a lee-shore," *Transactions of the Society instituted at London for the encouragement of arts, manufactures, and commerce*, 41, pp. 182-189.
- Daston, Lorraine (2012), *Breve historia de la atención científica*, México, La cifra Editorial.
- Daston, Lorraine (Ed.) (2000), *Biographies of scientific objects*, Chicago, University Chicago Press.
- Davis, J. W. (1894), "Some experiments with kites", *Aeronautics*, 1, (11), pp. 153-156.
- Dawson, Ross Hughan (2011), *Kite turning*, Tesis de master, Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda), [en línea] disponible en: <http://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/5475> [consultado 5/12/2012].
- De Groot, S.G.C. (2010), *Modelling the dynamics of an arc-shaped kite for control law design. Design of a rigid body model for real-time simulation using a multi-body reference*, Tesis de master, Technische Universiteit Delft, [en línea] disponible en:

- Derry, T. K. & Willians, Trevor I. (1977), *Historia de la tecnología Vol. 1*, Madrid, Siglo XXI.
- Dines, William Henry & Shaw, William Napier (1909), *The free atmosphere in the region of the British Isles*, Londres, Darling & Son.
- Echagüe, Francisco y García Benítez, Juan (1918), “La aerostación en el ejército francés”, *La guerra y su preparación*, IV (6), pp. 519-542.
- Eddington, Arthur S. (1930), *The nature of the physical world*, Londres, Cambridge University Press, London.
- Eddy, William Abner (1894), “Method of construction of the [Eddy tailless] kite”, *Scientific American*, sept 15, pp. 169-170.
- Eddy, William Abner (1897), “Photographing from kites”, *The Century Illustrated Monthly Magazine*, 54, (1), pp. 86-92.
- Eddy, William Abner (1898), A record of same kite experiments. *Monthly Weather Review XXVI*, Oct., (10), pp. 450-452.
- Eden, Maxwell (1989), *Kiteworks. Explorations in kite building & flying*, Nueva York, Sterling Publishing Co.
- Eden, Maxwell (2002), *The magnificent book of kites*, Nueva York, Sterling Publishing Co.
- Eneström, Gustaf (1913), Die Schriften Eulers chronologisch nach den Jahren geordnet, in denen sie verfasst worden sind. Berlin, *Jahresber. Dtsch. Math.-Ver.* [en línea] disponible en: <http://www.math.dartmouth.edu/~euler/index/enestrom.html> [consultado 11/10/2012].
- Espy, James Pollard (1841), *The philosophy of storms*, Boston.
- Estalella, José (1918), *Ciencia recreativa enigmas y problemas. Observaciones y experimentos, trabajos de habilidad y paciencia*, Barcelona, Gustavo Gili.
- Euler, Johann Albert (1754), *Enodatio quaestionis quomodo vis aquae aliusve fluidi cum maximo lucro ad molas circum agendas aliave opera perficienda impendi possit, auctore Jo. Alberto Euler...* Göttingen.
- Euler, Johann Albert (1758), “Des cerfs – volans”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences et Belles Lettres, année MDCCLVI*, pp. 322-364.
- Euler, Johann Albert (1765), Von der Bewegung ebener Flächen, wenn sie vom Winde getrieben werden, *Abhandlungen der Churbaierischen Akademie der Wissenschaften*, 3, (2), pp. 3-45.
- Euler, Leonhard (1746), *Scientia navalis*, San Petersburgo.
- Euler, Leonhard (1755a), “Principes généraux de l’état d’équilibre des fluides”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences et Belles Lettres*, XI, Berlin.
- Euler, Leonhard (1755b), “Principes généraux du mouvement des fluides”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences et Belles Lettres*, XI, Berlin.
- Euler, Leonhard (1755c), “Continuation des recherches sur la théorie de mouvement des fluides”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences et Belles Lettres*, XI, Berlin.
- Euler, Leonhard (1758), “Recherches plus exactes sur l’effet des moulins à vent”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences et Belles Lettres, année MDCCLVI*, pp. 165-234.
- Fara, Patricia (2002), *An entertainment for angels. Electricity in the enlightenment*, Cambridge, Icon Books.

- Feldman, Theodore S. (1990), "Late enlightenment meteorology". En: Frangsmyr, Tore; Heilbron, John L. & Rider, Robin E. (eds.) *The quantifying spirit in the eighteenth century*, Berkeley, University of California Press, pp. 144-179.
- Fergusson, S. P. (1904), "Kites and instruments employed in the exploration of the air", *Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College*, 43 Pt. III, Apéndice D, pp. 231-235.
- Fernández, Luis Miguel (2006), *Tecnología, espectáculo, literatura. Dispositivos ópticos en las letras españolas de los siglos XVIII y XIX*, Santiago de Compostela, Servicio de publicaciones de la Universidad de Santiago de Compostela.
- Ferreiro, Larrie D. (2007), *Ship and science. The birth of naval architecture in the scientific revolution 1600-1800*, Cambridge (MAT), MIT Press.
- Fontseré, Eduard (1918), Los globos pilotos en aerología, *Iberica*, X, (253), pp. 317-320.
- Fragio, Alberto (2007), *De Davos a Cerisy-La-Salle: la epistemología histórica en el contexto europeo*, Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, [en línea] disponible en: [http://digital.csic.es/bitstream/10261/11055/1/Tesis\\_Alberto\\_Fragio.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/11055/1/Tesis_Alberto_Fragio.pdf) [consultado 5/12/2012].
- Franklin, Benjamin (1753), "A letter of Benjamin Franklin, Esq; to Mr. Peter Collinson, F.R.S. concerning an electrical Kite". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, ILVII, pp. 565-567.
- Franklin, Benjamin (1769), *Experiments and observations on electricity, made at Philadelphia in America*, Fourth Edition, London.
- Friedman, Robert Marc (1989), *Vilhelm Bjerknes and the construction of a modern meteorology*, New York, Cornell University Press.
- Galbis, José (1915), "Algo de aerología", *Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, Congreso de Madrid*, Tomo III Sección 2ª, Astronomía y Física del Globo, Madrid, Imprenta de Eduardo Arias, pp. 1-51.
- Gallot, Philippe (1989), *Fighter kites*, Nueva York, St. Martin's Press.
- Ganot, Adolphe (1898), *Tratado elemental de física experimental y aplicada. Traducido por D. Eduardo Sánchez Pardo*, Madrid, Librería Editorial de Bailly – Bailliere e Hijos.
- Garber, Paul (1944), *U.S. navy target kites*. Washington, [en línea] disponible en: <http://robroy.dyndns.info/targetkites/navykite/navykite.html> [consultado el 10/11/2012].
- García Camarero, Ernesto y García Camarero, Enrique (ed.) (1970), *La polémica de la ciencia española*, Madrid, Alianza Editorial.
- García de Lomas, Juan (1915), "Trabajos meteorológicos en Tenerife", *Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, Congreso de Madrid*, Tomo III, Sección 2ª, Astronomía y Física del Globo. Madrid, Imprenta de Eduardo Arias, pp. 53-74.
- García de Pedraza, Lorenzo y Giménez de la Cuadra, José Mario (1985), *Notas para la historia de la meteorología en España*, Madrid, Sección de publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología.
- Gehler, Johann Samuel Traugott (Ed.) (1825-1845), *Physikalisches Wörterbuch. Zweiter Band C und D*, Leipzig, bei E. B. Schwickert.
- Gibbs-Smith, Charles Harvard (1960), *The aeroplane: an historical survey*, Londres, H.M. Stationery Off.
- Gibbs-Smith, Charles Harvard (1962), *Sir George Cayley's aeronautics 1796 – 1855*, Londres, H.M. Stationery Off.
- Gibbs-Smith, Charles Harvard (1966), *The invention of the aeroplane*, Londres, Faber.

- Gil Olcina, Antonio y Olcina Cantos, Jorge (1999), *Climatología básica*, Barcelona, Editorial Ariel.
- Gómez, Francisco de Paula (1910), *ABC de la aeroplaneación*, Madrid, Editorial Bailly Bailliere.
- González Tascón, Ignacio (1992), *Fábricas hidráulicas españolas*, Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (CEHOPU).
- González-Granda Aguadé, Rafael (1994a), *Crónicas aeronáuticas. Tomo I. "Desde Dédalo hasta el Aeroplano"*, Madrid, IHCA.
- González-Granda Aguadé, Rafael (1994b), *Crónicas aeronáuticas. Tomo II. "Del Aeroplano de los Wright a los Europeos"*, Madrid, IHCA.
- Grahame, Arthur (1945), "Target kite imitates plane's flight", *Popular Science*, May, pp. 65-67.
- Gramelsberger, Gabriele & Feichter, Johann (2011), "Modeelling the climate system: an overview", en: Gramelsberger, Gabriele & Feichter, Johann (eds.), *Climate Change and Policy. The Calculability of Climate Change and the Challenge of Uncertainty*, Berlin Heidelberg, Springer, pp. 9-90.
- Griffiths, John F. (1977), "A chronology of items of meteorological interest", *Bulletin American meteorological Society*, 58, (10), pp. 1058-1067.
- Guijarro Mora, Víctor (2001a), "La enseñanza de la física experimental en la Europa del siglo XVIII", *Éndoxa*, (14), pp. 111-136.
- Guijarro Mora, Víctor (2001b), "Petrus van Musschenbroek y la física experimental del siglo XVIII", *Asclepio*, LIII, (2), pp. 191-212.
- Guijarro, Víctor (2005), "El barómetro y los proyectos meteorológicos de la ilustración: El caso español", *Éndoxa: Series Filosóficas*, (19), pp. 159-190.
- Guillen Tato, Julio F. (1936), *Los tenientes de navío Jorge Juan y Santacilia y Antonio Ulloa y de La Torre-Guidal y la medición del meridiano*, Madrid, Galo Sáez, pp. 224-225.
- Guyot, Edme Gilles (1799), *Nouvelles récréations physiques et mathématiques*, Paris, Librairie rue Saint-André-des-Arc.
- Hackmann, Willem D. (2009), "The lightning rod: a case study of eighteenth century model experiments". En: Heering, Peter; Hochade, Olivier & Rhees, David J. (ed.) *Playing with fire. Histories of the lightning rod*, Philadelphia, American Philosophical Society, pp. 209-229.
- Hallion, Richard P. (2003), *Taking flight*, Nueva York, Oxford University Press.
- Hanson, Carl (2001), *View from a kite: kite aerial photography*, Dorrance Pub Co. [<http://dorrance.stores.yahoo.net/index.html>].
- Hargrave, Lawrence (1893a), "Flying-machine motors and cellular kites", *Journal of the Royal Society of New South Wales*, XXVII, pp. 75-81.
- Hargrave, Lawrence (1893b), "Cellular kites", *Engineering* Oct 27 (56), pp. 523-524.
- Hargrave, Lawrence (1895), "Paper on aeronautical work", *Journal of the Royal Society of New South Wales*, XXIX, pp. 40-47.
- Hargrave, Lawrence (1896), "On the cellular kite", *Journal of the Royal Society of New South Wales*, XXX, pp. 144-147.
- Hargrave, Lawrence (1897), "The possibility of soaring in a horizontal wind", *Journal of the Royal Society of New South Wales* XXXI, pp. 207-213.
- Hargrave, Lawrence (1898), "Soaring machines", *Journal of the Royal Society of New South Wales*, XXXII, pp. 209-222.
- Hart, Clive (1969), "Mediaeval kites and windsocks", *The Aeronautical Journal*, 73, (708), pp. 1019-1026.

- Hart, Clive (1972), *The dream of flight. Aeronautics from classical times to the renaissance*, Nueva York, Winchester Press.
- Hart, Clive (1982), *Kites an historical survey*, Nueva York, Paul P. Appel Publisher.
- Heering, Peter (2009), "Styles of experimentation and the attempts to establish the lighting rod in pre-revolutionary Paris". En: Heering, Peter; Hochade, Olivier & Rhees, David J. (ed.), *Playing with fire. Histories of the lightning rod*, Philadelphia, American Philosophical Society, pp. 121-143.
- Heering, Peter; Hochade, Olivier & Rhees, David J. (ed.) (2009), *Playing with fire. Histories of the lightning rod*, Philadelphia, American Philosophical Society.
- Heilbron, John L. (1999), *Electricity in the 17<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> centuries*, Mineola (N.Y.) Dover Publications Inc.
- Henry, Alfred J. (1910), "A weather bureau kite. How it is constructed", *Scientific American Supplement*, (1826), pp. 428-429.
- Herrera, Emilio (1911), "Las exploraciones atmosféricas en España", *Boletín de la Sociedad Astronómica de Barcelona*, II, (9), p. 177.
- Herring, Augustus M. (1897), "Recent advances toward a solution of the problem of the century". En: Means, James (ed.) *Aeronautical Annual 3*, Nueva York, pp. 54-74.
- Hesíodo (1986), *Teogonía, trabajos y días, escudo, certamen. Introducción, traducción y notas de Adelaida y M<sup>a</sup> Ángeles Martínez Sánchez*, Madrid: Alianza Editorial.
- Hidalgo Cámara, Encarna (1993), "Tendiendo puentes entre la teoría y la práctica científica: el péndulo balístico (Robins, 1742; Hutton, 1775)", *Éndoxa*, (2), pp. 237-281.
- Hillson, Franklin J. (1989), "Barrage balloons for low-level air defense", *Air & Space Power Journal*, III, (2), [en línea], disponible en: <http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/apj/apj89/sum89/hillson.html> [consultado 10/07/2012].
- Houard, Georges (1912), *Les ascensions en cerfs-volants*, Paris, Librairie Aéronautique.
- Ito, Toshio; Komura, Hirotosugu (1983), *Kites. The science and the wonder*, Tokio, Japan Publications, Inc.
- Jenkins, Garry (2000), *Coronel Cody and the flying cathedral*, Nueva York, Picador USA.
- Jobert, Claude (1887), "Un cerf-volant porte-amarre à cone", *L'Aéronaute*, 20, (3), pp. 43-46.
- Juan y Santacilia, Jorge (1771), *Examen marítimo o tratado de mecánica tomo I y II*. Madrid.
- Juan y Santacilia, Jorge y Ulloa, Antonio (1748), *Observaciones astronómicas y físicas hechas de orden de S.M. en los reynos del Perú*, Madrid, Imprenta de Juan de Zuñiga.
- Juglà y Font, Antoni (1788), *Memoria sobre la construcción y utilidad de los pararrayos, leída a la Real Academia de Ciencias Naturales y Artes de Barcelona en las Juntas Literarias de 10 de enero y 14 de marzo de 1787*, Barcelona, Suriá y Burgada.
- Junco y Reyes, Francisco del (1915), "La exploración científica de la alta atmósfera", *Ibérica*, III, (73), p. 334.
- Kármán, Theodore von (1954), *Aerodinámica. Temas seleccionados a la luz de su desarrollo histórico*, Madrid, INTAET.
- Kirby, Richard Shelton (1990), *Engineering in history*, Nueva York, Dover.
- Kircher, Athanasius (1646), *Ars magna lucis et umbrae*, Roma.
- Kircher, Athanasius (1650), *Musurgia universalis vol. 2*, Romae.

- Kleinschmidt, Ernst (ed.) (1935), *Handbuch der meteorologischen Instrumente*, Berlín, Verlag von Julius Springer.
- Kuhn, Thomas (1983), *La tensión esencial*, Madrid, Fondo de Cultura Económica.
- Kuhn, Thomas (2006), *La estructura de las revoluciones científicas. Traducción e introducción de Carlos Solís*, Méjico, Fondo de Cultura Económica.
- Laguzzi, Alessandro (1992), “Carlo Barletti e le ‘Encyclopédies’”, *Rivista Trimestrale dell’Istituto Gramsci*, (4), pp. 1-30.
- Lasso de la Vega, Jorge (1835), *Las ciencias enseñadas por medio de juegos o teorías científicas...*, Cádiz, Feros.
- Latour, Bruno (2001), “La historicidad de las cosas ¿Dónde estaban los microbios antes de Pasteur?”. En: Latour, Bruno, *La esperanza de Pandora*, Barcelona, Gedisa Editorial, pp. 174-207.
- Lázaro Ávila, Carlos y Pérez Heras, Angel (1995), *La aerostación militar en España*, Madrid, Ministerio de Defensa.
- Lecornu, Joseph (1910), *Les cerfs-volants*, Paris, Librairie Vuibert.
- Lecornu, Joseph (1917), *De l’emploi des trains de cerfs-volants montés pour la surveillance des mers et la recherche des sous-marins*, París, Librairie Vuibert.
- Lecornu, Joseph (1918), *Sous-marins et cerfs – volants. Réponse aux objections*, Paris, Librairie Vuibert.
- Lee, Arthur Gould (1965), *The flying cathedral* Londres, Methuen & Co. Ltd.
- Lezaun Iturralde, Mikel (2003), “Predicciones del tiempo y matemáticas”, *Sigma*, (23), pp. 145-166.
- Lilienthal, Otto (1889/2001), *Birdflight as the basis of aviation*, Hummelstown, Markowski International Publishers.
- Lilienthal, Otto (1896), “Practical experiments for development of human flight”. En: Means, James (ed.) *Aeronautical Annual 2*, Nueva York, pp.7-22.
- Lorente, José M<sup>a</sup> (1927a), “Crónica de un viaje de estudios (1<sup>a</sup> parte)”, *Anales de la Sociedad de Meteorología*, I, (5), pp. 144-149.
- Lorente, José M<sup>a</sup> (1927b), “Crónica de un viaje de estudios (2<sup>a</sup> parte)”, *Anales de la Sociedad de Meteorología*, I, (6), pp. 172-173.
- Lorente, José M<sup>a</sup> (1928), “Crónica de un viaje de estudios (3<sup>a</sup> parte)”, *Anales de la Sociedad de Meteorología*, II, (1), pp. 16-22.
- Lynn, Michael R. (2010), *The sublime invention: ballooning in Europe, 1783–1820*, Londres, Pickering & Chatto Ltd.
- Martínez Sanz, F. y Barrera, A. (1934), *Aerostación y elementos auxiliares*, Toledo, Colección Bibliográfica Militar.
- Marvin, Charles F. (1895), “A weather bureau kite”, *Monthly Weather Review*, November, pp. 418-420.
- Marvin, Charles F. (1896), *Kite experiments at the weather bureau*, Washington, U.S. Weather Bureau.
- Marvin, Charles F. (1897), *The mechanics an equilibrium of kites*, Washington, U.S. Weather Bureau.
- Marvin, Charles F. (1898), *Instructions for aerial observers*, Washington, U.S. Weather Bureau, instrument division.
- McAdie, Alexander George (1891), “Franklin’s kite experiment”, *The American Meteorological Journal*, Julio, pp. 97-108.
- McAdie, Alexander George (1897), “Franklin’s kite experiment with modern apparatus”, *Popular Science Monthly*, Oct.,( 51), pp. 739-747.
- McAdie, Alexander George (1916), “Aerography, the science of the structure of the atmosphere”, *Geographical Review*, 1, (4), pp. 266-273.

- McAdie, Alexander George (1917), *The principles of aerography*, Londres, Goerge G. Harrap & Company, Ltd.
- McGrath, P. T. (1902), "Authoritative accout of Marconi's work in wareless telegraphy", *Century Magazine*, LXIII, March, pp. 769-82.
- Meteorological Office (1961), *Handbook of meteorological instruments. Part II: instruments for upper air observations*, Londres, Her Majesty's Stationery Office.
- Meucci, Sandra (2010), *Antonio and the electric scream: The man who invented the telephone*, Boston, Brander Books.
- Middleton, W. E. Knowles (1969), *Invention of the meteorological instruments*, Baltimore, The Johns Hopkins Press.
- Milham, Willis Isbister (1912), *Meteorology*, Nueva York, The MaCmillan Company.
- Moffett, Cleveland (1896), "Scientific kite flying", *McClure's Magazine*, 6, (4), pp. 379-392.
- Montoto y de Simón, Jaime de (1993), *Precursores*, Madrid, IHCA.
- Moscoso, Javier (2001), "Biographies of scientific objects", *Daimon*, (24), pp. 151-152.
- Moscoso, Javier (2005), *Ciencia y técnica en la Enciclopedia. Diderot y D'Alembert*, Madrid, Nívola.
- Mottelay, Paul Fleury (1922), *Bibliographical history of electricity and magnetism*, Londres, Charles Griffin And Company Limited.
- Müller, Roland, (2009), "The notion of a model: A historical overview". En: Meijers, Anthonie (Ed.), *Philosophy of technology and engineering science. Handbook of the philosophy of science volume 9*, Amsterdam Elsevier, pp. 637-64.
- Musschenbroek, Petro van (1762), *Introductio ad philosophiam naturalem tomus I*, Lugduni Batavorum, Apud Sam. Et Joh. Luchtmans.
- Nabeker, Frederik (1995), *Calculating the Weather. Meteorology in the 20th century*, San Diego, Academic Press.
- Nares, George S. (1882), *Seamanship*, Portsmouth, Griffin & Co.
- Needham, Joseph (1965), *Science and civilisation in China, vol. 4, Pt. 2*, Cambridge, pp. 568-602.
- Newton, Isaac (1987), *Principios matemáticos de la filosofía natural. Edición de 1726. Traducción E. Rada*, Madrid. Alianza Editorial.
- Nollet, Jean-Antoine (1746), *Essai sur l'électricité des corps*, París, Guerin.
- Nowarra, Heinz J. (1990), *German helicopters (1928-1945)*, West Chester, PA, Schiffer Military History.
- OACI (2006), *Convenio sobre aviación civil internacional-licencias al personal. 1. definiciones y reglamento general relativo al otorgamiento de licencias. Punto 1.1.-Definiciones. Anexo 1*, Montreal, OACI Document Sales Unit.
- Olivotto, Cristina (2007), "The spectacle of science aloft", *Journal of Science Communication*, 6, (2), pp. 1-7.
- Ordóñez, Javier, Navarro, Víctor y Sánchez Ron, José Manuel (2004), *Historia de la ciencia*, Madrid, Espasa Calpe.
- Ory Ajamil, Fernando de (1995), "Las primeras investigaciones meteorológicas en el pico del Teide. El observatorio meteorológico especial de Izaña". En: *Calendario meteorológico 1995*, Madrid, Instituto Nacional de Meteorología, pp. 249-260.
- Ory Ajamil, Fernando de, (2007), *El observatorio atmosférico de Izaña en Tenerife (1909-1984): Historia y vida de una institución científica española*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente.

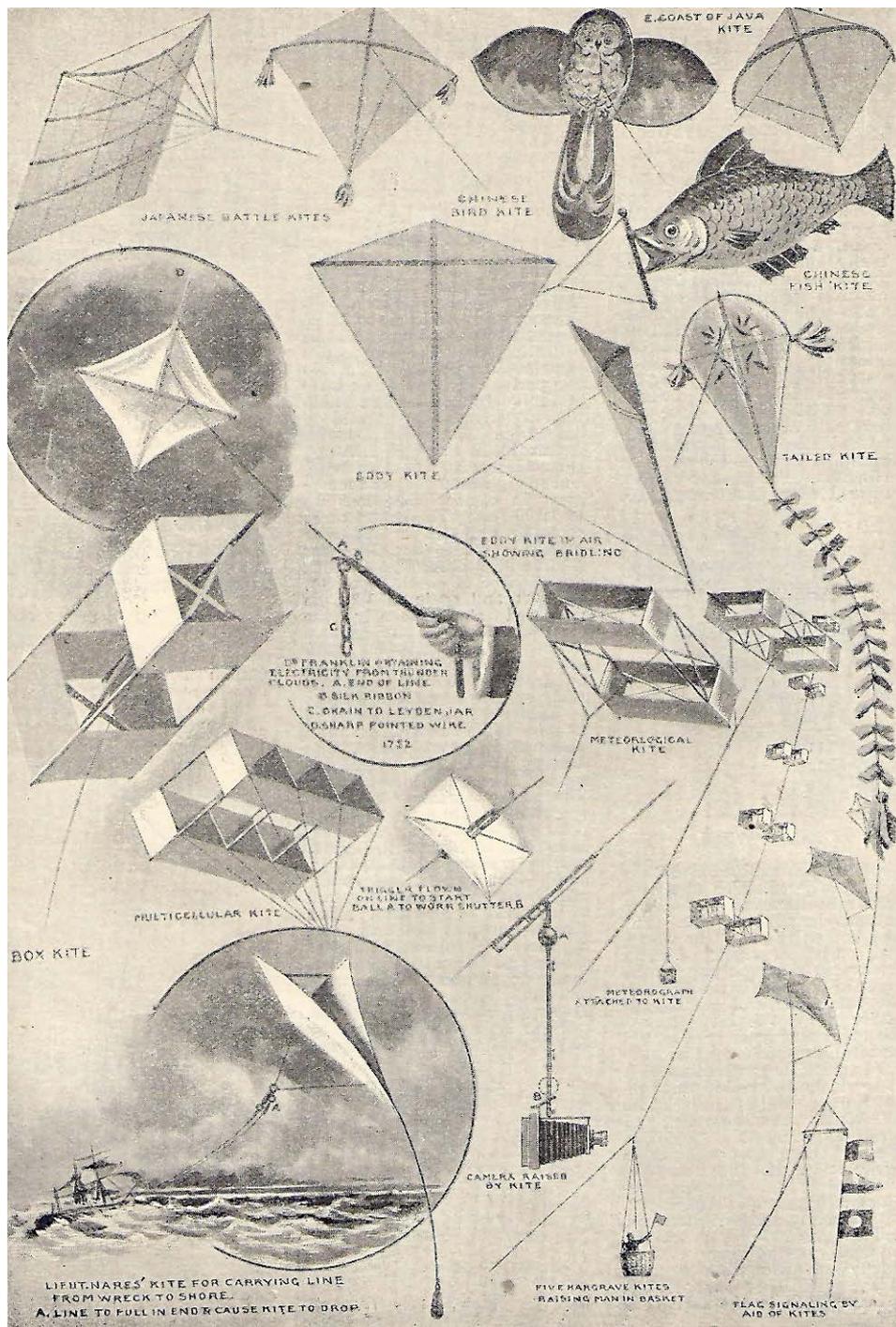
- Ozanam, Jacques (1778), *Récréations mathématiques et physiques, qui contiennent les problèmes et les questions les plus remarquables et le plus propre à piquer la curiosité, tant des mathématiques que de la physique ; le tout traité d'une manière à la portée des locteurs qui ont seulement quelques connoissances légères de ces sciences*. 4 vol., Paris, pp. 240 – 245 y Pl. 6 Physique.
- Ozanam, Jacques (1844), *Recreations in science and natural philosophy. Dr. Hutton's translation of Montucla's edition of Ozanam. New edition revised and corrected, with numerous additions, By Edward Riddle, Master of the Mathematical School Hospital, Greenwich. Illustrated by upwards of hundred woodcuts*. 1 volúmen, Londres, pp. V – VIII.
- Pablo, Jordi (1981), “Imaginación y ciencia”. En: Tissandier, Gaston, *Recreaciones científicas. Edición facsímile de la de 1887*, Barcelona, Editorial Alta Fulla, pp. VII – XIII.
- Palomares Casado, Manuel (1988), *Aspectos humanos y sociales en meteorología y climatología*, Madrid, INM.
- Palomares Casado, Manuel (1991), “Historia de la meteorología antigua y medieval”, *Aeroplano*, (9), pp. 153-158.
- Paris, John Ayrton (1853), *Philosophy in sport*, Londres, John Murray.
- Parkin, J. H. (1964), *Bell and Baldwin*, Toronto, University of Toronto Press.
- Patterssen, Sverre (1951), *Introducción a la meteorología*, Buenos Aires, Espasa Calpe.
- Pelham, David (1976), *Kites*, Londres, Penguin Books.
- Perelman, Yakov Isidorovich (1975), *Física recreativa*, Moscú, Editorial Mir.
- Phillips, Horatio F. (1885), “Experiments with currents of air”, *Engineering*, (40), pp. 160 – 161.
- Picavet, Pierre L. (1912), “Suspension pendulare ellíptique”, *Le Cerf-Volant*, Novembre, pp. 238-240.
- Pita, Pio y Lorente, José M<sup>a</sup> (1942), *Meteorología aeronáutica*, Madrid, Saeta.
- Pocock, George (1827), *Aeropleustic art*, Londres.
- Poujoula, R. (1913), *Le cerf-volant de sauvetage*, París, Librairie aéronautique.
- Real Academia Española (1729), *Diccionario de la lengua castellana, en que se explica el verdadero sentido de las voces, su naturaleza y calidad, con las frases o modos de hablar, los proverbios o refranes, y otras cosas convenientes al uso de la lengua [...]*. Tomo segundo. Que contiene la letra C, Madrid, Imprenta de Francisco del Hierro.
- Reynold, Terry S. (1983), *Stronger than a hundred men, A history of the vertical waterwheel*, Maryland, Jonh Hopkins University Press.
- Rider, Robín E. (1990), “El experimento como espectáculo”. En: Ordoñez, Javier y Elena, Alberto (eds.), *La ciencia y su público: perspectivas históricas*, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp. 113-146.
- Riesgo, Juan Manuel (1992), *El autogiro de Juan de La Cierva: inventores murcianos, pabellón de Murcia: 20 abril-12 octubre, Exposición Universal, Sevilla 1992*, Murcia, Empresa Pública Regional Murcia Cultural.
- Riskin, Jessica (2008), “Amusing physics”. En: Bensaude-Vicent, Bernadette & Blondel, Christine (eds.), *Science and spectacle in the european enlightenment*, Hampshire, Ashgate Publishing Limited, pp. 43-63.
- Roche, John J. (1998), *The mathematics of measurement. A critical history*, Londres, The Athlone Press.
- Rojas Rubio, Francisco de Paula (1919a), *Aplicación de las cometas a la meteorología*, Madrid, Imprenta Memorial de Ingenieros.
- Rojas Rubio, Francisco de Paula (1919b), *Aerología: sondas aéreas*, Madrid, Stampa.

- Romain, C. (1912), *Les cerf-volants observatoires*, París, Nancy: Berger-Laurealt.
- Romas, Jacques de (1755), “Mémoire, où après avoir donné un moyen aisé pour élever fort haut, & à peu de frais, un corps E'lectrisable isolé, ou rapporte des observations frappantes, qui prouvent que plus le corps isolé est élevé au-dessus de la terre, plus le feu de l'E'lectricité est abondant”, *Mémoires de mathématique et de physique, présentés à l'Académie royale des sciences par divers sçavans, et lus dans ses assemblées, 1750-1786, vol. 2*, Paris, pp. 393-407.
- Romas, Jacques de (1757), “Lettre écrite à M. l'Abbé Nollet par M. De Romás”, *Mémoires de mathématique et de physique, présentés à l'Académie royale des sciences par divers sçavans, et lus dans ses assemblées 1750-1786 Vol 4*, Paris, pp. 514-517.
- Romas, Jacques de (1776), *Mémorire, sur les moyens de se garantir de la foudre dans les maisons*, Bordeaux.
- Rotch, A. Lawrence (1900), *Sounding the ocean of air*, Nueva York, E & J. B. Young & Co.
- Roughley, Theodore Cleveland (1937), *The aeronautical work of Lawrence Hargreve*, Sydney, David Harold Paisley, Government Printer.
- Rouse, Hunter & Ince, Simon (1957), *History of hydraulics*, Nueva York, Dover Publication Inc.
- Saconney, Jacques-Théodore (1909), *Cerf-volant militaires*, París, Nancy, Berger-Laurealt et Cie.
- Saconney, Jacques-Théodore (1913), *Métrophotographie*, París.
- Sanchez Pérez, Antonio (1895), *Actualidades de antaño*, Madrid, Perlado, Páez y Compañía.
- Sánchez, Gonzalo (2006), “Dynamics and control of single-line kites”, *The Aeronautical Journal*, (110), pp. 615-621.
- Scamehorn, Howard L. (2000), *Balloons to jets: a century of aeronautics in Illinois, 1855-1955*, Chicago, Southern Illinois University.
- Schiffer, Michel Brian (2003), *Draw the lighting down. Bengamin Franklin and electrical technology in the age of enlightenment*, Berkeley, University of California Press.
- Schwenter, Daniel (1636), *Delicia physic-mathematicae*, pt. I, Nürnberg.
- Sellés, Manuel (1999), “Jean Charles Borda (1733-1799): La física exacta en la Francia del siglo XVIII”, *Revista Española de Física*, 12 (2), pp. 50-55.
- Shaw, W. Hudson & Ruhen, Olaf (1977), *Lawrence Hargrave: explorer, inventor and aviation experimenter*, Stanmore, Cassell Australia.
- Shaw, William Napier (1926), *Manual of meteorology, vol. I: meteorology in history*. Cambridge, Cambrige University Press.
- Shea, William R. (2003), *Designing experiments & games of chance: the unconventional science of Blaise Pascal*, Canton (MA), Watson Publishing International.
- Shock, James R. (1995), *The U.S. army barrage balloon program*, Bennington VT, Merriam Press.
- Short, Simine (2011), *Locomotive to aeromotive: Octave Chanute and the transportation revolution*, Chicago, University of Illinois Press.
- Simón Calero, Julián (1996), *La génesis de la mecánica de los fluidos*, Madrid, UNED.
- Simón Calero, Julián (2001), “La mecánica de fluidos en Jorge Juan”, *Asclepio*, 53 (2), pp. 230-236.

- Simón Calero, Julián (2005), “Construcciones, ingenierías y teóricas en la construcción naval”. En: Silva Suarez (ed.), *Técnica e ingeniería en España (II) El siglo de las luces*, Zaragoza, Prensas Universitarias de Zaragoza, pp. 555-604.
- Simón Calero, Julián (2010), “La mecánica de los fluidos en el examen marítimo”. En: Torroja Menéndez, Jaime; Martínez Shaw, Carlos; Belizón Rodríguez, Fernando; Sánchez Carrión, José María; Fernández González, Francisco; Simón Calero, Julián y Sanjurjo Jul, José Manuel, *Jorge Juan y Santacilia*, Madrid, Real Academia de Ingeniería, pp. 197-247.
- Simon Castel, Josep (2007), “Comunicando la física en la Europa del siglo XIX: El manual de Ganot y los oficios del libro” En: Herran, Néstor, Simon, Josep, Guillem-Llobat, Ximo, Lanuza-Navarro, Tayra, Ruiz Castell, Pedro y Navarro, Jaume (Coords.) *Synergia: Jóvenes investigadores en historia de la ciencia*. Madrid, CSIC, pp. 29-48.
- Smeaton, John (1759), “An experimental enquiry concerning the natural powers of water and wind to turn mills, and other machines depending on a circular motion”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 51, Londres.
- Starrett, Susan G. (2009), “Similarity and dimensional analysis”. En: Meijers, Anthonie (Ed.), *Philosophy of technology and engineering science. Handbook of the philosophy of science, volume 9*, Amsterdam Elsevier, pp. 799-823.
- Sttodard, W. O. (1880), “Sim vedder's kite”, *Harper's Young People*, I (25), pp. 329-323, [en línea] disponible en: [http://www.gutenberg.org/files/28790/28790-h/28790-h.htm#SIM\\_VEDDERS\\_KITE](http://www.gutenberg.org/files/28790/28790-h/28790-h.htm#SIM_VEDDERS_KITE) [consultado 5/12/2012].
- Suay Belenguer, Juan Miguel (2008), “Los molinos y las cometas de mr. Euler le fils. Modelos matemáticos para las máquinas hidráulicas en el siglo XVIII”, *Quaderns d'Història de l'Enginyeria*, IX, (21), pp. 118-121.
- Sutton, Geoffrey V. (1995), *Science for a polite society. Gender, culture, and the demonstration of enlightenment*, Oxford, Westview Press.
- Teisserenc de Bort, Leon (1898), “Les cerfs-volants météorologiques en France”, *La Nature*, 1º semestre, pp. 35-36.
- Thorpe, Alan J., Volkert, Hans & Ziemianski, Michal (2003), “The Bjerknes' circulation theorem. A historical perspective”, *Bulletin American Meteorological Society*, April, pp. 471-80.
- Tissandier, Gaston (1889), “La photographie en cerf-volant”, *La Nature*, (825) 25 Mars, pp. 257-258.
- Tissandier, Gaston (1981), *Recreaciones científicas, facsímile de la edición de 1887*, Barcelona, Alta Fulla.
- Tit, Tom (1981), *La ciencia divertida, facsímile de la edición de 1890*, Barcelona, José J. de Olañeta Editor.
- Truesdell, Clifford Ambrose (1954), “Rational fluid mechanics (1787-1765)”. En: Speiser, Andreas; Pasquier, Louis Gustave du; Brandt, Heinrich; Trost, Ernst & Blanc, Charles (eds.), *Leonhardi Euleri opera omnia vol. 13 serie 2*, pp. IX-CXXV.
- Tucker, Tom (2003), *Bolt of fate. Benjamin Franklin and his electric kite hoax*, Nueva York, PublicAffairs.
- Turner, Gerard L'E. (1987), “Scientific toys”, *The British Journal for the History of Science*, 20, (4), pp. 377-398.
- Urteaga, Luis (1997), *Ideas medioambientales en el siglo XVIII*, Madrid, Akal.
- Van Riet, C.M. (2012), *The kite: a symbol in nineteenth-century literature*, Tesis de master, Universidad de Utrecht, [en línea] disponible en: <http://igitur->

archive.library.uu.nl/student-theses/2012-0820-200502/RMAThesis\_CMvanRiet.pdf [consultado 5/12/2012].

- Vázquez y Morales, Josep (1747), *Ensayo sobre la electricidad de los cuerpos. Escrito en idioma francés por el Mons. El Abate Nollet de la Academia Real de las ciencias de París y de la Régia Sociedad de Londres. Traducido al castellano por D. Joseph Vazquez y Morales. Añadida la Historia de la Electricidad*, Madrid, Imprenta del Mercurio.
- Veau-Delaunay, Claude (1809), *Manuel de l'électricité*, Paris.
- Veciana, Stella (2004), *Research arts: la intersección arte, ciencia y tecnología como campo de conocimiento y de acción*, Tesis doctoral, Universidad de Barcelona, [en línea] disponible en: [http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/80850/SVS\\_TESIS.pdf](http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/80850/SVS_TESIS.pdf) [consultado 5/12/2012].
- Verne, Jules (2008), *Dos años de vacaciones*, Barcelona, RBA Coleccionables, S.A.
- Vincenti, Walter G. (1990), *What engineers know and how they know it. Analytical studies from aeronautical history*, Baltimore, John Hopkins University Press.
- Vives Vich, Pedro (1909), "Aerostación militar", *Memorial de Ingenieros del Ejército*, (64), pp. 205-223.
- Vives Vich, Pedro (1912), *Necrológica del capitán de ingenieros D. Antonio Gordejuela y Causilla*, Madrid, Imprenta del Memorial de Ingenieros del Ejército.
- Walker, Percy B. (1971), *Early aviation at Farnborough. Balloons, kites and airships*, Londres, Macdonald & Co. (Publishers).
- Wegener, Peter P. (1997), *What makes airplane fly? History, science, and applications of aerodynamics*, Nueva York, Springer – Verlag.
- Wenz, M. Emile (1897), *Sur la photographie aerienn par cerf-volant*, Paris, S. F. P. éditeur.
- Whitnah, Donald R. (1961), *A history of the United States weather bureau*, Urbana, University of Illinois Press.
- Williams, Trevor I. (1982), *Historia de la tecnología. Volumen 5*, Madrid, siglo XIX.
- Wilson, P. (1826), "Biographical account of Alexander Wilson", *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, X, pp. 284-287.
- Wise, H. D. (1897), "Experiments with kites", *The Century Illustrated Monthly Magazine*, 54, (1), pp. 78-86.
- Woglom, Gilbert Totten (1896), *Parakites. A treatise on the making and flying of tailless kites for scientific purposes and for recreation*, Nueva York, G. P. Putnam's sons.
- Woglom, Gilbrt Totten (1897), "Unusual uses of photography. Aerial photography", *Scribner's Magazine*, XXII (65), pp. 617-625.
- Wright, Chris (1998), *Kite flight. Theory and practice*, Londres, Middlesex University Press.
- Wright, Orville (1953), *How we invented the airplane. An illustrated history. Edited, with an introduction and commentary by Fred C. Kelly*, Nueva York, Dover Publications, Inc.
- Yolen, Jane (1968), *World on a string. The story of kites*, Cleveland, World Publishing Company.
- Young, Thomas (1807), *Lectures on natural philosophy and mechanical arts*, Londres.
- Zwart, Sjoerd D. (2009), "Scale modelling in engineering: Fraude's case". En: Meijers, Anthonie (Ed.), *Philosophy of technology and engineering science. Handbook of the philosophy of science, volume 9*, Amsterdam Elsevier, pp. 759-98.



**Fig. 99** Usos de las cometas en una enciclopedia de principios del siglo XX