

Kinesiología y biomecánica de la actividad física y el deporte: concepto y revisión histórica

M. Izquierdo y R. Arteaga

Objetivos

1. Definir el concepto de biomecánica y kinesiológica
2. Conocer los objetivos de la biomecánica de la actividad física y el deporte
3. Conocer la evolución histórica de la biomecánica

Resumen

En los últimos años el avance en el conocimiento respecto al cuerpo humano ha sido rápido y una razón importante para dicho avance ha sido la colaboración entre cuatro ramas de la ciencia: la Medicina, la Biología, la Física y la Ingeniería. Estas disciplinas son amplias y abarcan personal dedicado a un amplio espectro de actividades. Aun existiendo analogías y diferencias entre ellas, no hay duda de que la cooperación entre ellas ha dado resultados excelentes, como para aquellas personas que han recibido muchos años más de vida útil gracias a la ayuda de prótesis e intervenciones quirúrgicas adecuadas. No obstante, en la intersección de las cuatro hay un denominador común: la necesidad de realizar operaciones y obtener medidas precisas, mediante la instrumentación apropiada, con el fin de adquirir un mejor conocimiento de los organismos vivos y, como caso más importante, del ser humano. En el término «Biomecánica» coexisten dos elementos, el biológico y el mecánico, aspectos que se encuentran en la mayoría de las definiciones de esta palabra. La Biomecánica puede definirse como el estudio de los fenómenos biológicos a través de los métodos de la Mecánica. Esto implica que tiene como objetivo el estudio de las fuerzas externas e internas (cinética) y de los movimientos asociados que afectan al ser humano y a los animales (cinemática). En un intento de fijar la realidad científica del desarrollo mecánico y/o biológico dentro del contexto sociocultural en el cual emergieron ambas disciplinas, analizaremos los factores históricos que consideramos importantes en la evolución de la Biomecánica, a través de los siglos, y destacaremos en cada uno de ellos las figuras más relevantes. La Biomecánica del movimiento humano se ha desarrollado en los últimos 90 años, mientras que la Biomecánica deportiva ha tenido un mayor impacto durante las tres últimas décadas.

INTRODUCCIÓN

Papiros egipcios que tratan de forma correcta sobre técnicas quirúrgicas, y presuponen una familiarización con la estructura del organismo, datan ya de unos 2.000 años a.C. Sin embargo, constituye una paradoja el hecho de que, hasta tiempos recientes, el hombre conociera muy poco acerca de su propio organismo. Tan sólo en el curso de, aproximadamente, los últimos 80 años se ha conseguido descubrir las funciones de muchos órganos y describir los mecanismos y la estructura de funcionamiento de infinidad de movimientos del ser humano.

En los últimos años el avance en el conocimiento respecto al cuerpo humano ha sido rápido y una razón importante para dicho avance ha sido la colaboración entre cuatro ramas de la ciencia: la Medicina, la Biología, la Física y la Ingeniería. Estas disciplinas son amplias y abarcan personal dedicado a un amplio espectro de actividades. Aun existiendo analogías y diferencias entre ellas, no hay duda de que la cooperación entre ellas ha dado resultados excelentes, tanto desde el punto de vista de la optimización y mejora del rendimiento deportivo como para aquellas personas de edad avanzada que han recibido muchos años más de vida útil gracias a los estudios de investigación sobre la mejora de la capacidad funcional del sistema neuromuscular o para aquellas otras donde la ayuda de prótesis e intervenciones quirúrgicas adecuadas ha favorecido una vida diaria completamente independiente. No obstante en la intersección de las cuatro hay un denominador común: la necesidad de realizar operaciones y obtener medidas precisas, mediante la instrumentación apropiada, con el fin de adquirir un mejor conocimiento de los organismos vivos y, como caso más importante, del ser humano.

Disciplinas como la Biomecánica y la Biofísica han surgido de forma natural durante este siglo. Aunque a través de muchas controversias, es evidente que el papel de la Física es cada vez más necesario dentro de la Biología, la Medicina y, por tanto, en la actividad física y el deporte, donde toma especial relevancia la mecánica.

Se puede considerar que fue en la década de los 60 cuando se tomó conciencia de las múltiples ventajas de que físicos e ingenieros trabajen con médicos, biólogos y profesionales de la educación física. Prácticamente todas las asociaciones de físicos e ingenieros reconocieron dicha necesidad, formando grupos como el *ASME Biomechanical and Human Factors Division* o el *Physics and Engineering in Medicine and Biology*. Las agrupaciones en torno a la Biomecánica y a la Biomecánica deportiva empezaron a fraguarse en la década de los 70 con la *International Society of Biomechanics* (Pensilvania, 1972) y en la década de los 80 con la *International Society of Biomechanics in Sports* (San Diego, California, 1982).

CINESIOLOGÍA Y BIOMECÁNICA

En la actualidad, la Biomecánica es una ciencia de gran auge en la que concurren profesionales de muy diversos ámbitos debido a su pluridisciplinariedad. Así, participan, entre otros, físicos, biólogos, médicos, ingenieros, entrenadores, licenciados en Educación Física, motricistas, ergónomos e informáticos. Por esta razón es importante que en las investigaciones biomecánicas participen, en equipo, personas de diferentes áreas de conocimiento.

Nuestra imperecedera curiosidad por conocer el funcionamiento biológico del ser humano y el de otras especies data de tiempos muy remo-

tos, desde que el hombre indaga y hace intentos científicos por conocer aspectos específicos de la vida. Estudios muy antiguos intentaban profundizar en el conocimiento de la función de órganos como pulmón, corazón, sistema nervioso central y periférico, músculos y articulaciones. Una disciplina que surgió de esta exploración fue la mecánica de los seres vivos, una ciencia que hoy llamamos «Biomecánica».

La Biomecánica es una disciplina que utiliza los principios y métodos de la mecánica para el estudio de los seres vivos, teniendo en cuenta sus peculiaridades. La mecánica (derivado del término griego *mekhniké*), que etimológicamente significa inventar, ingenio, es la parte de la Física que estudia el movimiento de los cuerpos en sí mismo, describiéndolo y, por otro lado, refiriéndolo a sus causas (las fuerzas). También estudia la falta de movimiento (equilibrio), relacionándolo con las fuerzas que lo provocan. Esto implica que tiene como objetivo el estudio de las fuerzas externas e internas (cinética) y, los movimientos asociados que afectan al ser humano y a los animales (cinemática).

La definición de Biomecánica no ha alcanzado un consenso. Algunos autores proponen una definición amplia, mientras que otros lo hacen de una forma más restringida. Entre las más completas cabe destacar la que realizó la UNESCO (*International Council for Sports and Physical Education*) en 1971:

«Es la mecánica de los sistemas vivos. Comprende el conocimiento del papel que desempeñan las fuerzas mecánicas que producen los movimientos, su soporte anatómico, iniciación neuronal, control integrado, percepción, así como su diseño central».

O la que más recientemente realizó el Instituto de Biomecánica de Valencia (1992):

(De bio- y mecánica):

«Conjunto de conocimientos interdisciplinares generados a partir de utilizar, con el apoyo de otras ciencias biomédicas, los conocimientos de la mecánica y distintas tecnologías en: primero, el estudio del comportamiento de los sistemas biológicos y, en particular, del cuerpo humano; segundo, en resolver los problemas que le provocan las distintas condiciones a las que puede verse sometido».

La Biomecánica suele dividirse de la misma forma que lo hace la mecánica (Fig. 1.1).

La parte de la Biomecánica que describe los movimientos se denomina «Cinemática». La cinemática sitúa espacialmente los cuerpos, mediante coordenadas y ángulos, y detalla sus movimientos basándose en los términos de desplazamientos (recorridos), velocidades y aceleraciones.

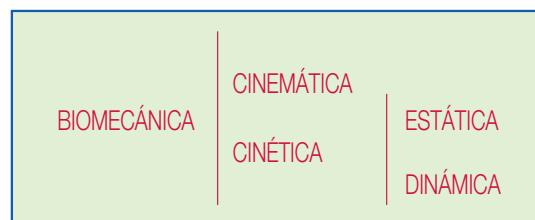


Figura 1.1. División de la Biomecánica.

Cuando el movimiento, o la falta de éste, se relacionan con las fuerzas que lo provocan, se habla, en forma genérica, de «cinética». Dentro de ésta, al estudio de las fuerzas que provocan el movimiento se le denomina «dinámica» y al estudio de las fuerzas que determinan que los cuerpos se mantengan en equilibrio, «estática».

La cinemática describe, por ejemplo, las técnicas deportivas o las diferentes habilidades y destrezas que puede ejecutar el hombre. La cinética estudia, por ejemplo, las fuerzas implicadas en la marcha, en la carrera, al subir escaleras, en un golpeo de fútbol o en un lanzamiento a canasta de baloncesto o las fuerzas que se ejercen sobre un pedal de bicicleta en diferentes fases del ciclo de pedaleo. La estática estudia, por ejemplo, cómo logra el windsurferista mantenerse sobre la tabla, el escalador sobre unas pequeñas presas, o un niño sobre una barra de equilibrio.

En el término Biomecánica coexisten dos elementos, el biológico y el mecánico, aspectos que se encuentran en la mayoría de las definiciones de esta palabra. De esta manera, se han acuñado muchos términos para definir una cierta área, como biocinemática, biodinámica, bioestática, biomateriales o biofluidos. Debido a la proliferación de estas denominaciones y a la imprecisión de las fronteras que limitan dichos campos, es práctica corriente en la actualidad emplear terminologías genéricas. Así, en congresos, libros o revistas, con el nombre genérico de biomecánica se tratan problemas de reología de la sangre, microcirculación, operación de los alvéolos pulmonares, prótesis, movimiento humano y mundo del deporte, que ciertamente podrían tener una denominación más concreta.

El estudio del movimiento humano se puede abarcar desde muchos puntos de vista: *psicológico, filosófico, sociológico, biológico, físico y anatómico*. Tradicionalmente, el estudio concerniente a las bases biológicas y mecánicas del movimiento humano se conoce como «cinesio-logía». Abarca fundamentalmente los cuerpos de conocimiento de la anatomía, fisiología y mecánica. En la mayor parte de los planes de estudio de las facultades de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, tanto nacionales como fuera de nuestro país, aparece como materia troncal. Sin embargo, la Biomecánica del movimiento humano no es un área reservada para los profesionales de la actividad física y el deporte. El conocimiento de la Biomecánica se utiliza en diferentes disciplinas, entre las que se puede mencionar la Biología, Ergonomía, Ingeniería, Fisiología y Medicina. En otros ámbitos un gran número de profesionales, como ingenieros, cirujanos ortopédicos o cardiólogos, también realizan aplicaciones prácticas fundamentadas en la Biomecánica. Por ejemplo, en el área de la Ingeniería en el tratamiento de señales se pueden registrar y analizar las señales provenientes de la activación de las unidades motoras. Con esto se puede llegar a comprender cómo se comporta el sistema neuromuscular cuando se entrena o cuando se somete a un proceso de fatiga. El conocimiento que se obtiene puede ser de gran utilidad para conocer los mecanismos que subyacen en las adaptaciones neuromusculares al entrenamiento. Por último, un profesor o un entrenador necesita conocer las características físicas del cuerpo humano y los principios mecánicos que gobiernan los movimientos con el propósito de orientar en la optimización del rendimiento humano o prevenir lesiones relacionadas con una práctica mecánicamente no del todo correcta.

Básicamente, en Biomecánica se pueden realizar tres tipos de estudios (Yeadon y Challis, 1994). Hay estudios descriptivos, que aportan información sobre lo que está sucediendo en la ejecución del movimien-

to. Este tipo de estudios son los primeros que se realizan cuando se quiere estudiar un tipo de movimiento nuevo y no se conoce su estructura. Por otro lado están los estudios experimentales, que se realizan para identificar las relaciones entre algunas de las variables del movimiento. En estos estudios se plantea una pregunta y los resultados de la experiencia se utilizan para verificar la hipótesis de investigación planteada. El tercer tipo de estudios que se pueden realizar en Biomecánica son los llamados «teóricos o de modelización». En estos estudios la información que se obtiene se utiliza para desarrollar un modelo predictivo, generalmente un modelo matemático o un conjunto de ecuaciones basadas, por ejemplo, en las leyes de Newton. Los componentes de las ecuaciones son factores mecánicos (masas, fuerzas, desplazamientos y aceleraciones) que se producen durante la ejecución del movimiento y se utilizan valores iniciales reales obtenidos de los estudios descriptivos. Una vez que estos modelos teóricos se han refinado y validado, se pueden utilizar para estudios de simulación en ordenadores de diferentes tipos de movimientos, en los que se cambian diferentes variables y se puede ver cómo afectan al resultado.

BIOMECÁNICA DE LA ACTIVIDAD FÍSICA Y EL DEPORTE

Como hemos señalado anteriormente, la Biomecánica del movimiento humano es aquella disciplina que utiliza los medios de la mecánica para el estudio del movimiento humano. Sin embargo, este cuerpo de conocimientos es lo suficientemente amplio para distinguir varias subdisciplinas. Obviamente, los campos no están nítidamente definidos y en muchas ocasiones están interrelacionados. Aun así, podemos distinguir:

• Biomecánica médica

Abarca una amplia gama de posibilidades; actualmente existe un gran auge, como en casi todo lo relacionado con la Medicina. Ejemplos de ella pueden ser:

- *Biomecánica aplicada a la Traumatología.* Los principios mecánicos se utilizan para el estudio de las causas de las lesiones. Se estudian, por ejemplo, las cargas máximas que pueden soportar huesos, tendones y ligamentos para no rebasar los límites de tolerancia permitidos.
- *Biomecánica aplicada a la Rehabilitación.* Estudia aquellos ejercicios que tienen un carácter rehabilitador, teniendo en cuenta la dirección de las fuerzas, así como los momentos generados en torno a las articulaciones.
- *Biomecánica aplicada a la Fisiología.* Aborda, por ejemplo, el estudio de la mecánica de los fluidos, así como la relación de la inervación muscular en cuanto a la coordinación de movimientos y las implicaciones de los procesos fisiológicos del cuerpo sobre las habilidades motoras. Dentro del campo de la actividad física cobra especial relevancia la Ergometría, la cual mide el esfuerzo biológicamente normado y medido físicamente permitiendo una metodología de medición mucho más exacta y comparable para el análisis de las funciones de esfuerzo del cuerpo.
- *Biomecánica ortopédica.* Está dedicada a la implantación y adaptación de prótesis. Por ello intervienen médicos, ingenieros o físicos.

• Biomecánica ocupacional

En el mundo del trabajo, la biomecánica humana también encuentra una faceta dentro de lo que conocemos como «ergonomía», la cual tiene por objeto la adaptación y mejora de las condiciones de trabajo al hombre, tanto en su aspecto físico como psíquico y social. Es en el primero donde se pueden utilizar los conocimientos de la Biomecánica con la finalidad de aumentar el rendimiento y evitar fatigas y lesiones en el trabajo industrial, aunque cada vez son más numerosos los estudios que inciden en el trabajo doméstico, en tareas tales como barrer, fregar o sentarse. Esto permite a los fabricantes diseñar utensilios que resulten cada vez más cómodos para los usuarios.

• Biomecánica de la actividad física y deportiva

Esta subdisciplina de la Biomecánica se ocupa de la mecánica implicada en actividades humanas tan cotidianas como andar, correr o saltar. En muchas ocasiones, detrás de una actividad deportiva hay algunos aspectos mecánicos que explican algunas situaciones deportivas, tales como calcular el ángulo adecuado en un lanzamiento de peso para un deportista determinado o para que su alcance sea máximo o calcular el «desarrollo» que debe emplear un ciclista según la carretera sea horizontal o inclinada o dependiendo de que el viento sople en contra del sentido de avance. En otras ocasiones, el conocimiento de estos aspectos mecánicos proporciona una base científica y en muchas ocasiones demuestra cómo pueden obtenerse ventajas en el análisis de técnicas deportivas, en los implementos utilizados y/o los objetos que el deportista golpea o lanza, etcétera.

La investigación biomecánica se dirige a varias áreas del movimiento humano y del movimiento animal, como:

- Mecánica del movimiento humano.
- Funcionamiento de los músculos, tendones, ligamentos, cartílagos y huesos.
- Carga y sobrecarga de estructuras específicas de sistemas vivos.
- Factores influyentes en el desarrollo.

En la actualidad, el campo de aplicación de la Biomecánica de la actividad física y el deporte se realiza tanto en atletas como en no atletas, en capacitados y discapacitados y en temas que abarcan a sujetos desde la niñez hasta la senectud.

Dentro de la Biomecánica deportiva pueden establecerse diferentes objetivos (Aguado, 1993) en relación con el propio deportista, con el medio (sea terrestre, acuático o aéreo) y con el material deportivo (zapa-

tillas, raquetas, bicicletas, piraguas o balones), como se expone en la figura 1.2.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA BIOMECÁNICA

Como hemos dicho anteriormente, la Biomecánica del movimiento humano se ha desarrollado en el último siglo y medio, mientras que la Biomecánica deportiva ha tenido un mayor impacto durante las tres últimas décadas. En un intento de fijar la realidad científica, el desarrollo mecánico y/o biológico dentro del contexto sociocultural en el cual emergieron ambas disciplinas, analizaremos los factores históricos que consideramos importantes en la evolución de la Biomecánica, a través de los siglos, y destacaremos en cada uno de ellos las figuras más relevantes. Pasada la mitad del siglo XX entra en escena la Biomecánica de la actividad física y el deporte o Biomecánica de las técnicas deportivas.

Las etapas históricas han sido arbitrariamente divididas en períodos que para el desarrollo de la Biomecánica tienen importancia específica, desde nuestro punto de vista, aunque debemos señalar que no están bien definidos y hay algunos solapamientos entre ellos. La historia de la Biomecánica que se presenta a continuación incluye no sólo a aquellos pensadores y científicos que han contribuido específicamente al desarrollo de la biomecánica deportiva, sino también a todos aquellos que de, alguna manera, han contribuido al desarrollo del pensamiento científico y, en definitiva, al desarrollo de lo que hoy conocemos como «Biomecánica». Los períodos podrían ser los siguientes:

Antigüedad	650-200 a.C.
Edad Media	200*-1450 d.C.
Renacimiento italiano	1450-1600 d.C.
Revolución científica	1600-1730 d.C.
Ilustración	1730-1800 d.C.
Siglo de la Marcha	1800-1900 d.C.
Siglo xx	1900 d.C.

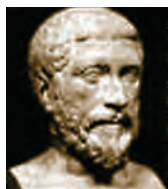
* Ver Galeno 129-200 d.C.)

ANTIGÜEDAD

La historia de la ciencia puede iniciarse en el mundo de los griegos, quienes fueron capaces de desarrollar los elementos básicos de Matemáticas, Astronomía, Mecánica, Física, Geografía y Medicina. En esta época destacamos a las siguientes personalidades:

En relación con el deportista	En relación con el medio	En relación con el material deportivo
<ul style="list-style-type: none"> • Describir las técnicas deportivas • Ofrecer nuevos aparatos y metodologías de registro • Corregir defectos en las técnicas y ayudar en el entrenamiento • Evitar las lesiones aconsejando sobre cómo ejecutar las técnicas deportivas de forma segura • Proponer técnicas más eficaces 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar las fuerzas de resistencia • Optimizar la propulsión en diferentes medios • Estudiar las fuerzas de acción-reacción y sustentación para optimizar el rendimiento deportivo • Definir la eficacia en diferentes técnicas deportivas en función de las fuerzas de reacción en el suelo • Estudiar las fuerzas de reacción del suelo en relación con las lesiones deportivas 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir el peso del material deportivo sin detrimento de otras características • Aumentar en algunos casos la rigidez, flexibilidad o elasticidad del material • Aumentar la durabilidad del material • Conseguir materiales más seguros • Conseguir materiales que permitan lograr mejores marcas

Figura 1.2. Objetivos de la biomecánica deportiva en relación con el deportista, con el medio y con el material deportivo (modificado de Aguado X. Eficacia y técnica deportiva: análisis del movimiento humano. Barcelona: Inde Publicaciones, 1993).



PITÁGORAS (alrededor de 582 a.C.). Nació en un período emergente de la filosofía. Formó una hermandad basada en sus ideas filosóficas y matemáticas, que incluían a mujeres y hombres viviendo juntos en una atmósfera comunal. Sus discípulos fueron divididos en dos grupos jerárquicos: los científicos y los oyentes. A los científicos se les permitía preguntar acerca de las cuestiones maestras y postular sus propias ideas, mientras que los oyentes eran confinados a estudiar.

Él decía que todas las cosas tienen forma, todas las cosas son forma y todas las formas pueden definirse por números. Experimentando con estas formas y cosas, probablemente surgió el Teorema de Pitágoras:

$$c_1^2 + c_2^2 = h^2$$

HIPÓCRATES (460-370 a.C.). Basó su observación en percepciones sensoriales. Hipócrates fue consciente de las limitaciones de su época; esperaba que futuras generaciones cuestionaran y mejoraran su trabajo. Su creencia en el principio de causalidad confirma su compromiso de formar una ciencia racional: «El azar no existe; cada cosa que ocurre es por una razón».

El siglo IV a.C. representó la época dorada de la ciencia griega, con dos principales exponentes, Platón y Aristóteles. En este tiempo la política y la ética desplazaban a la ciencia natural como medio de alcanzar la verdad y el conocimiento. Sin embargo, la desintegración de la civilización griega durante el siglo IV a.C. marcó las enseñanzas de ambos. Un siglo de guerra constante y de corrupción política desmoralizó a la población. El materialismo imperante torció la filosofía del culto personal de mente y cuerpo. Quizás por ello, el pueblo deseaba ver a los gladiadores batiéndose en duelo, en un ambiente de inestabilidad y violencia.

PLATÓN (427-347 a.C.). Creía que el mundo de los sentidos era una sombra ilusoria de la realidad. «Las ideas son la única realidad y el conocimiento de la verdad no puede conocerse a través del estudio de la Naturaleza». «La búsqueda de la verdad requiere contemplación, no acción». Su universo estaba sujeto a los poderes del divino creador. Las estrellas y los planetas eran entidades espirituales, cuyos movimientos y naturaleza se derivaban de estos poderes.



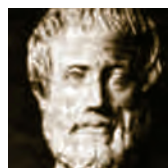
ARISTÓTELES (384-322 a.C.). El padre de Aristóteles, Nichomachos, sirvió como físico a Amyntas II de Macedonia, el abuelo de Alejandro Magno. Aristóteles estudió en Atenas y pasó varios años en la academia como discípulo de Platón. Su curiosidad intelectual le llevó a cuestionarse la filosofía platónica. El foro de sus enseñanzas fue el Liceo o Jardín de Aristóteles; uno de sus famosos discípulos fue el joven Alejandro Magno. Aristóteles creía que el propósito de la ciencia era explicar la Naturaleza y que las Matemáticas proporcionaban un buen modelo para una ciencia bien organizada.

Al contrario que Platón, pensaba que los sentidos revelaban la realidad y que las ideas eran meras abstracciones hacia conceptos mentales. Aristóteles pensaba que la abstracción era superior a la labor mecánica. Por consiguiente, sus métodos de observación no incluían la verificación o experimentación. El universo de Aristóteles consistía en cuatro elementos observables: fuego, aire, agua y tierra. Los elementos se ordenaban en esferas concéntricas, siendo la tierra la esfera central, seguida del agua,

el aire y el fuego. Detrás de éstas estaban las esferas de los planetas, las estrellas y la nada. La luna dividía la zona terrestre y la zona celestial, donde los movimientos eran diferenciados. Así, los movimientos naturales, como la caída libre, eran en línea recta, mientras que los movimientos de los cuerpos celestes eran circulares y estaban más allá de las leyes terrestres naturales. Aristóteles pensaba que todo movimiento tenía un proponente. Todo lo que se movía era movido por otra cosa. El motor debía estar dentro del móvil o estar en contacto con él. La acción a distancia era inconcebible. Creía que el corazón era la fuente de la inteligencia humana y que el movimiento muscular era debido al paso de la respiración por todo el cuerpo a través del corazón. Su tratado acerca de los *Movimientos de los animales*, basado en la observación, describía el movimiento y la locomoción en los primeros tiempos. El texto proporcionaba el primer análisis científico de la marcha y el primer análisis geométrico de la acción muscular. Comparaciones mecánicas ilustraban un profundo conocimiento de huesos y músculos. Explicaba las fuerzas de reacción del suelo de la siguiente forma: justo cuando el impulsador empuja, el empujador es impulsado.

Las conquistas de Alejandro Magno dieron origen a la Era Helenística y Alejandría fue el centro para la especialización científica. El Museo de Alejandría tenía un observatorio y laboratorios de Anatomía y Fisiología que proporcionaban un auténtico refugio para los investigadores.

HERÓFILOS (alrededor de 300 a.C.). Inició la base de la Anatomía moderna creando un sistemático acercamiento a la disección: identificando numerosos órganos. Fue el primero en distinguir entre tendón y nervio, atribuyendo la sensibilidad al nervio. También distinguió entre arteria y vena, estableciendo que las arterias eran seis veces más gruesas que las venas y que las arterias contenían sangre y no aire, como pensaba Aristóteles. Además rechazó la creencia de este último de que la inteligencia residía en el corazón, atribuyéndosela al cerebro. Erasistratis, un discípulo suyo, fue el primero en describir el músculo como órgano de contracción.



ARQUÍMEDES (287-212 a.C.). Era el hijo de un astrónomo que apoyó su precoz interés por las Matemáticas y la Astronomía. Su fama se debió a sus inventos, que incluían armas mecánicas como las catapultas, ingeniosos ganchos y espejos cóncavos para asaltar y quemar a los merodeadores barcos romanos. Usando sus poleas y palancas compuestas, llegó a afirmar que sería capaz de mover la Tierra si le daban un punto de apoyo. Demostró cómo encontrar el centro de gravedad de un paralelogramo, un triángulo, un trapecio y un segmento parabólico. Su tratado sobre *Cuerpos flotando* describía el principio del desplazamiento del agua, que se dice que descubrió mientras se bañaba. El movimiento ocupaba las investigaciones de Arquímedes en el sentido de cómo mover un peso dado con una fuerza dada. Arquímedes formó la base de la mecánica racional y estableció principios de estática e hidrostática que prevalecieron hasta tiempos de Galileo Galilei (1564-1642). Murió en el saqueo de Siracusa mientras estaba absorto en la contemplación de figuras geométricas, dibujadas en la arena, y haber gritado: «¡Aléjate!» a un soldado romano que se aproximaba. Éste, no habiendo apreciado el interés de la particular matemática de Arquímedes, le mató en el lugar.

Durante el Período Romano se valoraba en mayor medida la ética, mientras que la actividad científica se reducía al desarrollo de fortificaciones, armas militares y fuentes de diversión.



GALENO (129-201 d.C.). Empezó su formación médica en Pérgamos. Inspirado por un sueño, su padre se aseguró de que estudiara con los mejores físicos de la época. Nombrado físico por el Colegio de gladiadores a la edad de 28 años, llegó a ser, probablemente, el primer «físico deportivo» y «médico de equipo» de la Historia. Durante cuatro años practicó cirugía y dietética con los gladiadores, obteniendo sustanciales conocimientos del cuerpo humano y de su movimiento. En reconocimiento a su inmenso talento, Marco Aurelio le nombró físico del emperador; lo fue durante 20 años y se dedicó a investigar y a escribir tratados. Después de que el fuego destruyera el templo de Pax y la mayoría de sus manuscritos, regresó a Pérgamos, donde murió a los 70 años. Pensaba que la Naturaleza colocaba cada cosa de acuerdo con una función distinta, pero con el alma dominando el cuerpo. Su manuscrito, *De usu partium*, trascendió las Ciencias Médicas de tal forma que llegó a ser una autoridad incontestable durante 1.300 años, enfatizando la importancia del conocimiento de la estructura y la función para el diagnóstico y la terapia. *De motu musculorum* encarna la pasión de Galeno por el mecanismo del movimiento. Él creía que el músculo contenía una red de terminales nerviosas que se transmitían a través de un misterioso *Spiritus animalis* desde el cerebro hasta el músculo, que estimulaba el movimiento. Distinguió entre músculo agonista y antagonista y entre nervio motor y sensorial.

Obsesionado por la elegancia de las Matemáticas y formado por los mejores físicos de su época, Galeno elevó la Medicina al nivel de una ciencia exacta. Como anatomista, su descripción de músculos y nervios y su correlación de lesiones a varias partes de la médula espinal y los nervios cervical y craneal están consideradas entre las más brillantes observaciones médicas de todos los tiempos.

Durante esta época (650 a.C.-200 d.C.), las principales aportaciones a la Biomecánica fueron:

1. Separación de conocimiento y mito (Tales y Pitágoras).
2. Desarrollo de paradigmas matemáticos y mecánicos (Arquímedes).
3. Desarrollo de paradigmas anatómicos (Galeno).
4. Desarrollo de los primeros análisis biomecánicos del cuerpo humano (Aristóteles).

EDAD MEDIA (200-1450 d.C.)

Durante este período la religión y el desarrollo espiritual aumentaron, siendo casi nula la aportación a la ciencia. La contribución de la Edad Media al desarrollo de la Biomecánica es mínima. En general, el desarrollo científico fue rechazado en este período y, consecuentemente, el interés creado previamente en fisiología, anatomía y locomoción humana estuvo dormido durante más de 1.200 años. Sin embargo, representaciones y dibujos del movimiento florecieron rápidamente en el arte griego y romano y serían los artistas, antes que los científicos, quienes posteriormente reavivarían el estudio del movimiento humano.

RENACIMIENTO ITALIANO (1450-1600)

El Renacimiento italiano, que creció rápidamente desde 1450 hasta el saqueo de Roma en 1527, se caracterizó por la libertad de pensamiento, que posibilitó el resurgimiento de la Filosofía antigua griega, la Lite-

ratura y el Arte. El caos político del siglo XV en Italia proporcionó el retroceso para la erupción moral de las libertades intelectuales y morales. La autoridad de los ancianos sustituyó a la autoridad de la Iglesia. De esta manera, el hombre llegó a ser la medida de todas las cosas. En esta época surgieron figuras artísticas como Leonardo Da Vinci, Miguel Ángel y Maquiavelo.



LEONARDO DA VINCI (1452-1519). Fue el hijo ilegítimo de un notario y una campesina y criado por la familia de su padre. Aunque más conocido como artista, Leonardo Da Vinci fue principalmente un ingeniero civil y militar. Su constante miseria a lo largo de su vida le forzó a desarrollar sus talentos, creando producciones festivas, diseñando acueductos y fortificaciones, aparatos de destilación, esquís acuáticos, un helicóptero, un tanque, un paracaídas, un cañón de vapor y un ala delta.

Da Vinci contribuyó sustancialmente al entendimiento de la mecánica en su tiempo. Entre sus mayores avances: 1) describió el «paralelogramo de fuerzas», componiendo y descomponiendo fuerzas, 2) estudió la fricción o rozamiento y cuestionó la relación de Aristóteles entre fuerza, peso y velocidad en la caída libre y 3) preparó la tercera ley de Newton en su análisis del vuelo de los pájaros afirmando que un objeto ofrece tanta resistencia al aire como el aire lo hace al objeto. Sin embargo, la mecánica de Da Vinci nunca alcanzó los conceptos de aceleración, inercia o masa en comparación con el peso. Por otro lado, fue capaz de representar los músculos individuales como hilos y demostró el origen, la inserción, la posición relativa y la interacción de cada músculo; también esquematizó la acción mecánica y la representó en sus dibujos con fuerzas actuando a lo largo de los filamentos musculares. A diferencia de Galeno, los estudios de Da Vinci se caracterizaron por la verificación y experimentación.



COPÉRNICO. Cambió la noción de que el universo era geocéntrico en su *De Revolutionibus Orbium Coelestium* aportando un punto de vista revolucionario e inadmisibles para aquella época. Esto tuvo implicaciones directas para la Biomecánica porque el deseo de explicar las órbitas de los planetas sirvió para sentar las bases de la mecánica.



VESALIO. En su *De Humani Corporis Fabrica Libri Septem* revolucionó la anatomía humana. Se formó como físico en la universidad de Padua y se graduó como *magna cum laude*. Declaró, con descaro, que la anatomía humana podía ser aprendida únicamente de la disección y observación del cuerpo humano, cambiando así la filosofía galena que influyó durante 1.300 años:

- Demostró que el músculo se acortaba y se hacía más grueso durante la contracción.
- Atribuyó la contracción a propiedades del músculo, ya que el músculo se contrae cuando es cortado en los extremos.
- Pensaba que el músculo estaba compuesto de sustancias de ligamento o tendón y dividido en un gran número de fibras de contenido carnoso que recibían extensiones de arterias, venas y nervios.

Fue el fundador de la anatomía moderna. A pesar de su crítica hacia la filosofía de Galeno, Vesalio adoptó la teoría del *Spiritus Animalis* como la causa de la contracción muscular y portador de la función motor/espiritual del cerebro.

Durante esta época (1450-1600), la relevancia del Renacimiento italiano y sus principales aportaciones a la Biomecánica se sustentan en tres aspectos:

1. El trabajo científico fue reavivado.
2. Se sentaron las bases de la anatomía moderna y la fisiología.
3. El movimiento y la acción muscular fueron estudiados como entidades interconectadas.

REVOLUCIÓN CIENTÍFICA (1600-1730)

El ambiente en el cual se desarrolló la revolución científica fue similar al ambiente que tuvo lugar en el Renacimiento italiano. Hombres de ciencia eran apoyados por instituciones privadas y públicas, tales como reyes, nobles, familias acomodadas, universidades y hasta el Vaticano en Roma. La libertad intelectual fue altamente respetada y el interés por las nuevas ideas y los descubrimientos fue sustancial. Además, las sociedades científicas empezaban a emerger, estimulando el cambio de ideas y especulaciones, y tuvo lugar un intenso contacto entre científicos de diferentes países europeos.

La revolución científica del siglo XVII tuvo nombres tan ilustres como Galileo Galilei, Johannes Kepler, René Descartes e Isaac Newton, los cuales dieron un cambio en el conocimiento de la Naturaleza y en la manera de hacer el análisis científico. La experimentación llegó a ser la piedra angular del nuevo método científico. Descartes, Galileo y Newton eran partidarios de una metodología que cuestionaba ciertas verdades por experimentación. Pero veamos algunas aportaciones de tan ilustres hombres de ciencia:



GALILEO GALILEI (1564-1642). Recibió su educación primaria en Florencia, al final del Renacimiento. Se matriculó en la Universidad de Pisa en 1581 y empezó a investigar sistemáticamente la doctrina de Aristóteles de la caída libre de los cuerpos. Alrededor de 1591, había descubierto la imposibilidad de mantener que la velocidad de la caída está en función del peso del objeto, como Aristóteles creía. Un año más tarde, Galileo fue nombrado profesor de Matemáticas en la universidad de Padua.

Galileo fue más allá del estudio mecánico de la materia inorgánica y propuso publicar un tratado sobre el análisis mecánico del movimiento animal, *De animalium motibus*, algo así como «el movimiento de los animales». Los temas de Galileo fueron: Biomecánica del salto humano, análisis de la marcha de los caballos y de los insectos, y una determinación de las condiciones que permitían al cuerpo humano inmóvil flotar. Analizó la resistencia de algunos materiales, tales como vigas y sólidos huecos; su análisis de la resistencia de los sólidos a la fractura y la causa de su cohesión tuvieron aplicación en la dinámica de la estructura del hueso.

También comparó los efectos del cambio de estructuras de biomateriales. Demostró el incremento de tamaño de un fémur normal para adaptarse a soportar un peso tres veces superior; afirmó que «no se puede incrementar el tamaño de una estructura indefinidamente artificialmen-

te o de forma natural». Sería imposible cambiar el tamaño de hombres y animales y mantener su función. Sólo puede hacerse usando materiales más fuertes o aumentando los huesos y, por tanto, cambiando la forma a un monstruo. Los estudios de Galileo sobre mecánica de estructura, función y movimiento animal le distinguen como el padre de la Biomecánica.

Estructuró el camino de la Ciencia para los siglos venideros. Así, sus teorías del movimiento uniforme, de proyectiles y del plano inclinado y la definición de momento lineal proporcionaron las bases para las tres leyes de Newton, como así reconoció en vida el propio Newton: «Si he sido capaz de ir más lejos que otros ha sido porque permanecía en los hombros de gigantes».

Galileo era un hombre bajo, rechoncho, con un ardiente pelo pelirrojo y un carácter fuerte. Su enfrentamiento con la Iglesia le llevó a la condena pública de la teoría de Copérnico acerca de un mundo heliocéntrico en 1616 y su arresto domiciliario permanente en 1633 hasta su muerte en 1642. Con la publicación *Manchas solares* (1613) no sólo no recibió ninguna oposición de la iglesia, sino que los cardenales Borromeo y Barberini (el futuro Papa Urbano VIII) escribieron cartas a Galileo expresando su sincera admiración. En 1624 Galileo tuvo un encuentro con el Papa Urbano VIII para obtener el permiso de publicación de su análisis del sistema copernicano. Éste le sugirió que una manera de publicar un análisis que eludía argumentos teológicos era reconocer la supremacía de Dios y la inhabilidad de la mente humana para entender todos los misterios de Dios. La arrogancia de Galileo acabó de perderle situando al Papa como un completo simplón en su escrito *Diálogo* (1631). Dos años más tarde fue detenido.

SANTORIO SANTORIO (1561-1636). Fue colega de Galileo. Fuertemente influenciado por él, Santorio fue el primer científico en aplicar la mecánica a la Medicina y aplicar métodos cuantificables a la mecánica. Durante 30 años, Santorio pasó mucho tiempo suspendido de una báscula romana pesándose él mismo y los líquidos y sólidos que «entraban y salían de su cuerpo». También intentó medir la cantidad de respiración que perdía a través de los pulmones y la piel, aunque con menos éxito. Sus experimentos fueron creando las bases del metabolismo.

WILLIAM HARVEY (1578-1657). Nació en una familia de labradores ricos. Recibió su educación primaria en Cambridge y completó sus estudios como físico en la universidad de Padua; volvió a Londres en 1603. Tuvo éxito pronto; llegó a ser físico de Jaime I y posteriormente de Carlos I. La teoría de Aristóteles de la primacía del corazón influyó fuertemente en su descubrimiento de la circulación sanguínea.

La vivisección de perros permitió a Harvey ver el «movimiento del corazón». El movimiento activo, según él, era la contracción del corazón (sístole) y no la diástole, como Galeno había sugerido. Midiendo la capacidad del corazón seccionado y estimando el número de latidos del corazón en media hora, demostró que el corazón bombeaba más sangre a las arterias que la que el cuerpo contenía. Por lo tanto, la sangre debía regresar al corazón por otra ruta. Sugirió que debía existir un sistema de capilares que conectara las arterias con las venas: había descubierto la circulación sanguínea. Aplicó teoría mecánica a la acción del corazón y lo describió como una bomba reconociendo la naturaleza mecánica del sistema vascular. Fue el primer biomecánico cardíaco. Murió de una apoplejía, a la edad de 90 años.



RENÉ DESCARTES (1596-1650). Fue filósofo y uno de los pensadores dominantes del siglo XVII. Educado en los jesuitas, se formó rigurosamente en Astronomía y en la mecánica de Galileo, además de intensamente en Matemáticas. Pasó su vida viajando y luchando, como soldado, en Holanda, Bohemia y Hungría. En Holanda fue persuadido para ser el tutor de la Reina Cristina de Suecia en 1649. Descartes tenía el hábito de dormir tarde y decía que sus mejores pensamientos los hacía en el confort de una cama caliente. La Reina Cristina no era de esa opinión y prefería empezar los tutoriales de filosofía a las cinco de la mañana en una librería fría y helada. Descartes no sufrió mucho tiempo estas intempestivas tutorías, pues a los cinco meses de empezarlas murió de una pulmonía.

De acuerdo con la leyenda, Descartes inventó el sistema de coordenadas cartesiano mientras estaba echado sobre la cama observando los hábitos de vuelo de una mosca alrededor de la habitación. Mientras la mosca voló hacia la esquina de la habitación, Descartes se dio cuenta de la posibilidad de representar el movimiento con un sistema cartesiano. Llegó a ser el creador de la filosofía mecánica que representaba el análisis matemático de la mecánica, influenciando así en la mecánica del siglo XVIII y también la fisiología del XVII.



GIOVANNI BORELLI (1608-1679). Nació en Nápoles y su familia estuvo bajo constante sospecha de conspiración contra España. Debido a ello, hubo de huir a Roma en 1624. Ese mismo año, la Reina Cristina, que aceleró la muerte de Descartes con su afición a levantarse muy temprano, renunció a su corona para dedicarse plenamente a la cultura. Se convirtió en el patrón de Borelli, apoyando su investigación sobre «la mecánica del cuerpo humano» con dotaciones anuales. Debido a su publicación de *De motu animalium*, a menudo se le consideró el padre de la Biomecánica (Fig. 1.3). En esta obra describía métodos geométricos de complejos movimientos humanos tales como saltar, correr, volar y nadar. Además en sus investigaciones, analizó la marcha y los músculos. Borelli fue el primero en comprender el funcionamiento optimizado de las palancas del sistema musculoesquelético

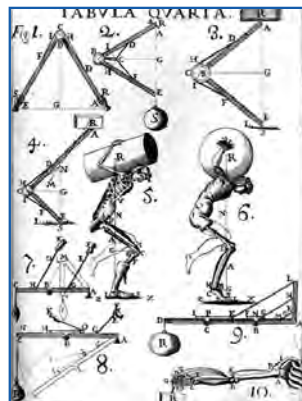
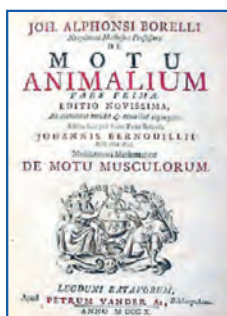


Figura 1.3. Portada y diseño de palancas del libro *De motu animalium* (1685).

dotando de ventaja mecánica a los músculos que ponen en movimiento el cuerpo humano. También intuyó el efecto de las fuerzas en el mantenimiento del equilibrio y determinó la posición del centro de gravedad en el cuerpo humano. Entre algunos ejemplos de proposiciones sobre los saltos y la contracción muscular, podemos destacar las siguientes:

- *Proposición CLXXVIII*: al saltar con una inclinación horizontal, la trayectoria es parabólica.
- *Proposición CLXXIX*: un salto con carrera es más largo y más alto.

Algunas de sus proposiciones respecto a la contracción muscular incluían:

- *Proposición II*: la contracción muscular no consta de una tensión simple de fibras similar a la ejercida sobre una cuerda levantando un peso.

Las proposiciones mecánicas de Borelli fueron más fuertes que sus proposiciones sobre la acción muscular.



ISAAC NEWTON (1642-1727). Nació un 25 de diciembre, 11 meses después de la muerte de Galileo. Descendiente de granjeros con ningún antepasado noble, demostró rápidamente ser un pésimo granjero, a menudo distraído y vago. Preparándose para la universidad, leyó trabajos de Kepler, Galileo y Descartes. Fue admitido en Cambridge, pero regresó en 1666 a Woolsthorpe para escapar de la peste de aquel entonces.

Andando sin rumbo fijo por el huerto de su casa, la fascinación de Newton alcanzó su punto máximo. En esta etapa, descubrió la teoría de la gravitación. Obtuvo el reconocimiento de sus hazañas en su propio tiempo. Como maestro de la Casa Real de la Moneda, reformó la moneda y le dieron el título de «sir» por su esfuerzo. Llegó a ser presidente de la *Royal Society* en 1703, posición que mantuvo hasta su muerte. Sin embargo, fue ridiculizado y satirizado al final de su vida en Inglaterra como un científico que se concentraba en detalles sin importancia.

Newton hizo varias contribuciones que fueron importantes para la Ciencia, en general, pero su mayor contribución fue la síntesis de las diferentes piezas del puzzle de «mecánica» que hasta entonces había. Koestler definió a Newton como el director de una orquesta de músicos individuales, cada uno absorto en sintonizar su instrumento; un director que hacía de los aullidos individuales de los instrumentos una hermosa melodía. Las piezas del puzzle de mecánica eran:

- Las leyes de Kepler del movimiento de los cuerpos celestes.
- La ley de Galileo sobre la caída libre de los cuerpos y de los proyectiles.
- La ley de inercia de Descartes, que requería movimiento rectilíneo si no actuaba ninguna fuerza.

Sin embargo las piezas no encajaban. Por ejemplo:

- Las fuerzas de Kepler responsables del movimiento de los planetas no se aplicaban al movimiento sobre la Tierra.
- Las leyes de Galileo del movimiento sobre la Tierra no proporcionaban una aparente posibilidad para explicar el movimiento de los planetas.
- Los planetas de Kepler se movían en trayectorias elípticas, mientras que los planetas de Galileo debían hacerlo en trayectorias circulares.

- Kepler necesitaba una fuerza central que era la del Sol, mientras que Galileo no la necesitaba, pues proponía que el movimiento circular se perpetuaba.
- La ley de la inercia de Descartes requería que los planetas siguieran una línea recta; sin embargo, estaba claro que su trayectoria no era así.
- Había un desacuerdo sobre las fuerzas responsables del movimiento de los planetas.

La contribución de Newton fue sintetizar las piezas del puzzle en la ley de la gravitación y en las leyes del movimiento. No está claro cómo Newton encontró la solución. Él dijo que encontró la ley de la gravedad como equilibrio a la fuerza centrífuga de la luna. Con la publicación de cuatro leyes básicas en su *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, en 1686, todo el movimiento en el universo podía describirse o predecirse. Sin embargo, todavía no se tenía consciencia de que estas predicciones eran posibles, siempre y cuando la velocidad fuese pequeña respecto a la velocidad de la luz. Hasta unos cuantos años más tarde, con los descubrimientos de Albert Einstein todavía nadie se planteaba que algo especial se produjese cerca de la velocidad de la luz.

Estas cuatro leyes son:

- Ley de inercia.
- Ley de la aceleración debida a una fuerza actuante.
- Ley de acción y reacción.
- Ley de la gravedad.

En nuestros días, 250 años después de la muerte de Newton, la visión de la mecánica es newtoniana. La segunda ley de Newton es una herramienta para el análisis cinético y cinemático del movimiento. Además, observó que cuando un móvil es afectado por dos fuerzas independientes se mueve a lo largo de la diagonal igual al vector suma de ambas, lo que le llevó a la ley del paralelogramo. Esto, aplicado a la acción muscular, proporcionó la intuición de que dos o más músculos debían empujar en un punto común de inserción a diferentes ángulos y diferentes fuerzas. La mejora del conocimiento de la mecánica en sus escritos *revolución científica* dio un salto cuantitativo. Y detrás de ella, otras disciplinas afines también tuvieron un desarrollo importante.

La Biomecánica y la Fisiología también se beneficiaron de la invención del microscopio y de la llegada del método científico. Por ejemplo, algunos de estos avances fueron:

- En 1637 en experimentos sobre ranas, Jan Swammerdam demostró la constancia del volumen muscular durante la contracción.
- En 1664 William Croone ilustró que el cerebro debía enviar una señal a los músculos para producir la contracción. Proporcionó una descripción precisa de la estructura muscular entre 1664 y 1667.
- La teoría de la irritabilidad, reacción ante el estímulo, fue propuesta por Francis Glisson.
- Clopton Havers utilizó el microscopio, en 1691, para hacer un estudio completo del hueso; afirmó que se componía de materia orgánica, inorgánica y láminas ordenadas alrededor de cavidades en forma de tubo.

Durante esta época (1600-1730), las principales aportaciones a la Biomecánica fueron fundamentalmente dos:

1. Teoría y experimentación fueron introducidas como elementos complementarios en la investigación científica.
2. Se estableció la teoría newtoniana, proporcionando una teoría completa para el análisis mecánico.

LA ILUSTRACIÓN (1730-1800)

En esta época, la antigua filosofía natural quedó atrás y fue sustituida por una nueva mecánica general, desarrollándose a la vez un nuevo grupo de científicos, los filósofos mecánicos. Pero estas épocas suelen venir acompañadas de situaciones en las que algunos conceptos no son totalmente comprendidos, lo que requiere a los brillantes cerebros matemáticos del siglo XVIII para clarificar muchas partes del puzzle; no para cambiar las bases, sino para darles el soporte matemático necesario para poder obtener resultados experimentales.

El concepto de fuerza no estaba claro en este tiempo. Los «filósofos mecánicos» no se ponían de acuerdo sobre si la materia se movía por fuerzas externas, internas o por ninguna fuerza. Así:

- Descartes argumentaba que no había ninguna fuerza en la materia.
- Newton argumentaba que la materia se componía de partículas inerciales y que las fuerzas actuaban entre cada par de partículas.
- Leibniz proponía que las fuerzas eran internas a las partículas.

El posicionamiento de los científicos estaba influenciado por creencias religiosas. En esta época, los matemáticos estaban convencidos de que el análisis matemático era la solución a las enfermedades de la sociedad. Así, en 1669, Fontanelle argumentaba que el nuevo espíritu geométrico podía mejorar la política, la moral y los trabajos literarios. De hecho, D'Alembert, influenciado por la misma idea, creía que la Santa Inquisición española podía ser minada mediante el contrabando del pensamiento matemático hacia España. En esta órbita de pensamiento, en Francia los filósofos naturales eran héroes. Newton era el más grande de ellos y hoy sería considerado una estrella. Tal es así, que en 1784 se habían escrito 40 libros sobre Newton en inglés, 17 en francés y 3 en alemán.

Las leyes de Newton describían el movimiento de masas puntuales y podían aplicarse apropiadamente a cuerpos celestes, pero no podían describir el movimiento de cuerpos rígidos, el movimiento de fluidos o las vibraciones de una cuerda. Para ello fue necesaria la aparición de matemáticos que dieran soporte a estas cuestiones. Destacaron en este campo Euler, D'Alembert y Lagrange.



LEONARD EULER (1707-1783). Considerado uno de los más hábiles, brillante y más productivo matemático y científico del siglo XVIII, desarrolló teorías matemáticas para describir el movimiento de cuerpos vibrantes, así como la ampliación de las leyes de Newton a cuerpos rígidos y fluidos (ángulos de Euler). Además, estableció las bases matemáticas para introducir el concepto de conservación de la energía.



D'ALEMBERT (1717-1783). Fue encontrado en las escaleras de la Iglesia St Jean le Rond. En 1743, dos años después de su aceptación en la Academia de las Ciencias, publicó *Traité de dynamique*, que contenía el principio de D'Alembert que establecía que «la tercera ley de Newton del movimiento se cumple no sólo para cuerpos fijos sino para aquellos que se mueven libremente». Las implicaciones del trabajo de D'Alembert para el desarrollo de la Biomecánica incluían la aplicación de sus principios a la cinética.



JOSEPH LAGRANGE (1736-1815). Demostró un agudo interés por las Matemáticas desde temprana edad. En 1766, sustituyó a Euler como director de la Academia de las Ciencias de Berlín. Empezó su trabajo en mecánica analítica, a la edad de 19 años, y lo terminó a los 52. Lagrange trataba los problemas mecánicos usando el cálculo diferencial. Su tratado no contenía ningún diagrama ni ningún método geométrico, como tenía *Newton principia*. Las ecuaciones de Lagrange expresaban la segunda ley de Newton en términos de energía cinética y potencial.

Fisiólogos del siglo XVIII adoptaron la filosofía mecánica para explicar las estructuras y funciones del cuerpo humano. El estudio de bombas, poleas y palancas abrió el camino a la investigación del desarrollo, la regeneración y la nutrición del cuerpo humano. Sin embargo, una teoría vitalista empezó a cambiar la teoría mecánica. François Bichat decía que la «forma venía de la función». Además, el descubrimiento de la electricidad aumentó el interés y el conocimiento de la naturaleza de los músculos.

En este campo cabe destacar a Albrecht von Haller, quien inspirándose en la teoría de Hermann Boerhaave de que las fibras eran el elemento estructural básico del cuerpo humano, se centró en la estructura y las funciones de los músculos. Extendió la teoría de la irritabilidad de Glisson, o de la contracción, y sugirió que la contractibilidad era una propiedad innata del músculo, puesto que los experimentos demostraban que el músculo tenía esa habilidad, incluso después de muerto, y que la contracción muscular podía ser provocada por estímulos eléctricos, químicos, térmicos y mecánicos. Pensaba que la electricidad que tenía «fluía» a través de los nervios, llevando estímulo sensorial y las órdenes motoras; pero, a la vez, pedía cautela para interpretar que la electricidad era el misterioso *spiritus animalis* que controlaba el movimiento; era consciente de que la técnica experimental del siglo XVIII no era capaz de revelar los secretos de los impulsos nerviosos electroquímicos.

BAGLIVI (1688-1706). Fue el primero en diferenciar entre estructura y función del músculo liso y estriado.

JAMES KEILL (1674-1719). Calculó el número de fibras presentes en cada músculo y la cantidad de tensión por fibra que requiere levantar un peso dado.

Durante esta época (1730-1800), las principales aportaciones a la Biomecánica fueron:

1. El concepto de fuerza llegó a ser mejor entendido.
2. Los conceptos de conservación de momento y energía empezaron a desarrollarse.
3. Tuvo lugar una consolidación matemática de las diferentes leyes mecánicas.
4. La contracción muscular llegó a ser un evento influenciado por fuerzas eléctricas, bioquímicas y mecánicas.
5. La relación entre fuerza y movimiento fue muy importante; de aquí surgieron las leyes de conservación de la energía y momento, que formaban la base mecánica de la Biomecánica.
6. El análisis matemático desarrollado con los métodos de Lagrange y D'Alembert, basados en la mecánica de Newton, facilitó el estudio de la dinámica de los movimientos humanos.
7. Empezaron a estudiarse los biomateriales para crear estructuras.

SIGLO DE LA MARCHA (1800-1900)

El desarrollo de la Ciencia, en lo relacionado con el movimiento humano en el siglo XIX, fue influenciado por tres eventos en la segunda mitad del siglo XVIII:

- La novela *Emile* de Jean Jacques Rousseau en 1762.
- La invención de la máquina de vapor por James Watt en 1777.
- La toma de la Bastilla en 1789.

JEAN JACQUES ROUSSEAU (1712-1778). En su novela *Emile* restablecía la antigua idea de desarrollar complementariamente cuerpo e intelecto, fomentando así una vuelta a la Naturaleza y a la actividad física.

EL INVENTO DE LA MÁQUINA DE VAPOR por James Watt anunciaba el comienzo de la Revolución Industrial, creando la necesidad de tiempo para el ocio y la recreación.

EL ASALTO DE LA BASTILLA marcaba el comienzo de la Revolución Francesa y el final del monopolio del ocio y los deportes de las clases altas. El desarrollo del deporte y la actividad física creó un renovado interés científico por la locomoción humana.

El siglo XIX se caracterizó por el desarrollo de métodos experimentales e instrumentos para aumentar el conocimiento de cómo nos movemos. El análisis de la marcha humana ocupaba a fisiólogos, ingenieros, matemáticos y aventureros. El estudio de la locomoción empezó como una ciencia observacional, pero al final del siglo XIX la fotografía había revolucionado y cuantificado el estudio del movimiento humano y animal.



ETIENNE JULES MAREY (1838-1904).

Transformó el estudio de la locomoción de una ciencia observacional a otra basada en la cuantificación gracias a la cinematografía. Los numerosos inventos de Marey fueron diseñados para proporcionar una descripción cuantitativa del movimiento. Construyó, en lo que hoy son las pistas de Roland Garros en el Parque de los Príncipes, una estación fisiológica que incluía una pista circular de 500 m equipada con monitores de TV. Analizaba el movimiento de adultos y niños, durante el deporte y el trabajo, así como los movimientos de caballos, pájaros, peces, insectos y hasta medusas. De hecho, a menudo es reconocido como pionero de la cinematografía antes que de la Biomecánica.

Utilizó dispositivos tales como calzados acolchados y la mesa dinamométrica, que fue la primera plataforma de fuerzas seria. Aprovechó rápidamente el potencial de las placas fotográficas para superar el defecto de nuestros sentidos. Desarrolló la tecnología para grabar secuencias de movimientos a velocidades relativamente altas. Así, desarrolló la moderna cámara de cine. Sin embargo, él prefería el análisis cuadro a cuadro del movimiento argumentando que la pantalla retrataba imágenes que no podía ver con sus ojos. La técnica de recogida de datos de Marey llegó a tener una alta demanda en diversos campos, como la cardiología, microscopía, mecánica, música e ingeniería civil. Sus investigaciones también proporcionaron alguna pista acerca del almacenamiento y la reutilización de energía elástica, variaciones en fuerzas de reacción y del centro de gravedad del movimiento y la dependencia del coste fisiológico en las características del movimiento (Figs. 1.4 y 1.5).



Figura 1.4. Tecnología utilizada por Marey para grabar secuencias de movimientos.

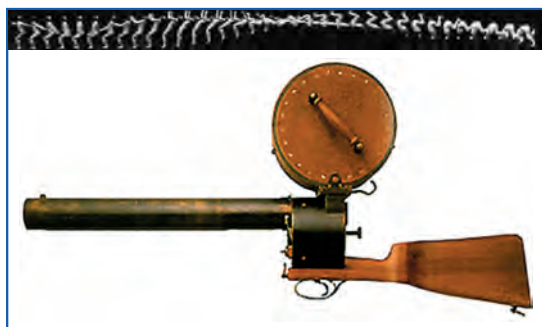


Figura 1.5. Detalle de la escopeta fotográfica realizada por Marey.



EDWARD MUYBRIDGE (1830-1904). Empezó sus trabajos estudiando el trote de los caballos a petición del señor Stanford, un propietario de caballos y aficionado a las carreras de caballos. Creía que había un instante en el cual las cuatro pezuñas estaban en el aire y, le pidió a Muybridge que estudiase a su caballo Occidente en un trote. Así lo hizo y tuvo éxito, dedicándose a partir de entonces a docu-

mentar el movimiento de humanos y de los animales. Inicialmente colaboró con Stanford estudiando las marchas de sus caballos en lo que hoy día es la Universidad de Stanford. Sin embargo, después de algunas controversias sobre los derechos de autor de la publicación de la investigación *Caballos en movimiento*, terminaron su asociación (Fig. 1.6).

La contribución de Muybridge a la Biomecánica fue la gran cantidad de imágenes que produjo para documentar el movimiento. Entre 1884 y 1885, Muybridge produjo 781 láminas de un total de 20.000 imágenes que fueron publicadas en *Locomoción animal*, *Animales en locomoción* y *La figura humana en movimiento*. Aportó una gran cantidad de ilustraciones, pero sus publicaciones tenían muchas imprecisiones, ya que carecía de metodología científica (Fig. 1.7).



FRIEDRICH TRENDELENBURG (1844-1924). Nació en Berlín en 1844, pero estudió Medicina en Glasgow. Su nombre se asoció con dos patologías clínicas de la marcha. La primera, descrita en 1890, relacionada con la incompetencia de la vena safenofemoral en pacientes con venas varicosas. La segunda, en 1895, relacionada con el

acortamiento unilateral de la extremidad inferior debido a una fractura del fémur o a la dislocación de la articulación de la cadera (Fig. 1.8).

Durante esta época Du Bois Reymond y Duchenne sentaron las bases de la electromiografía. El galvanismo y la electricidad animal desarrollaron la imaginación de Mary Shelley para crear a Frankenstein en 1816. En este ambiente, Du Bois refinó su método para medir la electricidad. Posteriormente, Duchenne desarrolló los electrodos de superficies para la piel y pudo observar las acciones de los músculos superficiales de cientos de sujetos sanos y enfermos.

El interés sobre el hueso creció notablemente, aceptándose la importancia de una buena alineación del esqueleto para una buena salud. Se realizaron estudios sobre los efectos de la presión en el desarrollo del hueso en 1862: Volkmann indicó una relación inversa entre aumento de presión y crecimiento del hueso. Wolff sintetizó muchas de sus ideas en 1870 en la conocida ley de Wolff.

Durante esta época (1800-1900), las aportaciones a la Biomecánica fueron:

1. Métodos de medición desarrollados para cuantificar la cinemática y cinética del movimiento y su aplicación al análisis de la marcha humana.



Figura 1.6. Detalle de los primeros estudios de Muybridge con los caballos.

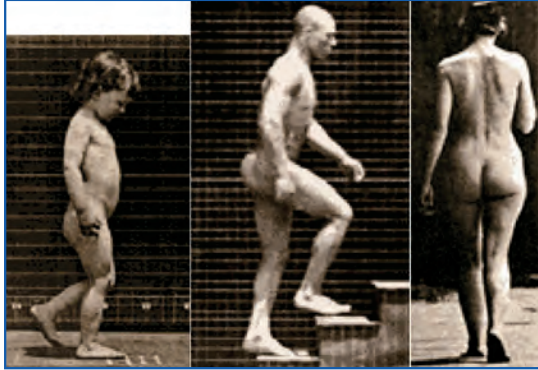


Figura 1.7. Edward Muybridge y la figura humana en movimiento.



Figura 1.8. Artículo original sobre la marcha tipo Trendelenburg.

2. Se desarrollaron métodos de medición para cuantificar la corriente eléctrica.
3. Se aplicaron principios de ingeniería en el análisis biomecánico y biológico.
4. La Biomecánica pasó de ser una ciencia intuitiva a estar basada en cuantificación y análisis matemático.
5. Los desarrollos en la técnica fotográfica ilustraban sutiles escenas que nuestros ojos no pueden ver.
6. La acción muscular fue cuantificada con la aparición de la electromiografía, abriendo un nuevo camino en el conocimiento de la acción muscular.
7. Los biomateriales fueron entendidos en mayor detalle; su estudio se centró en su función mecánica y su crecimiento.

SIGLO XX

Está caracterizado por varios factores para el desarrollo de la Biomecánica:

- Los desarrollos mecánicos y tecnológicos de las dos guerras mundiales.
- La explosión de apoyo financiero para la investigación.
- El reconocimiento social y económico del deporte en la sociedad, que abrió el camino para que los biomecánicos le prestaran gran atención. Con el transcurso del tiempo, ha emergido una subdisciplina, que hoy es conocida como Biomecánica deportiva.

- Han aumentado considerablemente los investigadores biomecánicos y centros de investigación.

Debido al gran desarrollo de la Biomecánica durante este siglo, al igual que la Ciencia, nos limitaremos a citar a los científicos más relevantes que de una manera u otra han contribuido al desarrollo de la Biomecánica.

La obra precursora más significativa dedicada al estudio de la locomoción, especialmente por la utilización de la fotografía cinematográfica, fue *Animal Locomotion*, escrita por Muybridge en 1887; sin embargo, no fue publicada hasta 1955. Sus técnicas cinematográficas fueron decisivas para investigaciones posteriores, especialmente a principios de este siglo.

AMAR (1920-). Desarrolló un amplio tratado dedicado a la mecánica corporal, orientando sus estudios hacia el mundo del trabajo. En su libro *The Human Motor* realiza un análisis de la actividad muscular, la fatiga física y los efectos que tiene sobre la actividad muscular. Puede considerarse el primer tratado de ergonomía.

NICOLAS BERNSTEIN (1896-1966). Descendía de una familia de físicos. En 1921 la ciencia soviética empezó a desarrollar una nueva dirección psicofisiológica hasta 1940 con él a la cabeza. Desarrolló un método para la medición del movimiento basado en el análisis matemático. La Biodinámica de Bernstein incluía estudios de:

- Útiles tales como el martillo y la sierra.
- Diseño de las cabinas de los tranvías en Moscú.
- Análisis de los movimientos de la mujer trabajando.
- Coordinación y regulación de movimientos de niños y adultos, proporcionando la base para las teorías de control motor y coordinación.
- Estableció que los adultos corren más económicamente que los niños.

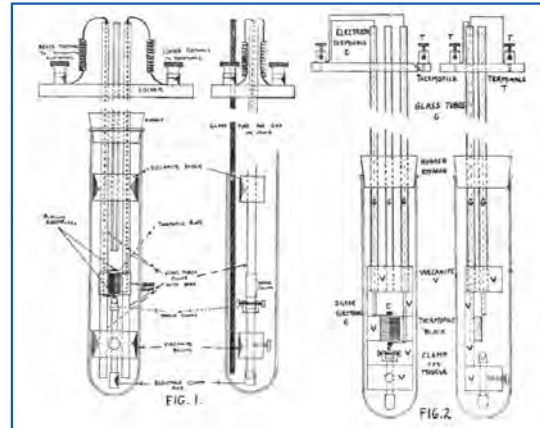


Figura 1.9. Termofilia para la medida de la producción de calor en el músculo sartorio del zorro (Hill, 1928).



A.V. HILL (1888-1977). Empezó su carrera en 1915 en Cambridge como matemático, pero después cambió a fisiología (Fig. 1.9). En 1923 recibió el premio Nobel en Fisiología y Medicina. Su principal contribución fue:

1. Explicar la función mecánica y estructural de la acción muscular, que sigue vigente hasta nuestros días.

2. Estudiar la locomoción humana; contribuyó especialmente a la eficiencia de la carrera.
3. En la década de los 30 tuvieron un gran auge las técnicas de registro de la actividad eléctrica en los músculos, aunque con unos recursos muy limitados.



SIR CHARLES SCOTT SHERRINGTON (1852-1952). Sherrington nació en Londres y estudió fisiología. Desde sus inicios, el mayor interés de su vida fue el campo de la Neuro-

logía, con especial atención a los reflejos y al problema de la inervación de los músculos antagonistas y el papel fundamental de los reflejos de inhibición. En 1906, publicó una de sus más conocidas obras: *The Integrative Action of the Nervous System* (Fig. 1.10). Fue premio Nobel de Medicina en 1932 con lord Edgar Douglas Adrian.



Figura 1.10. Detalle de la portada del libro *The Integrative Action of the Nervous System* escrito por Sherrington.

RUDOLF LABAN (1879-1958). Pensaba que su conocimiento sobre el movimiento humano podría ser aprovechado en la industria, por lo que enseñó a trabajadores industriales a encontrar el ritmo de sus movimientos individuales y a equilibrar movimientos fuertes con otros ligeros y movimientos estrechos con amplios. Las técnicas de Laban también fueron usadas por el Ministerio del Aire para crear una forma más eficiente de saltar en paracaídas.



A. F. HUXLEY (1924). Estudió Físicas en Cambridge. Trabajó en radares durante la II Guerra Mundial y aplicó sus conocimientos de física a la fisiología muscular, obteniendo un gran prestigio a raíz de su «modelo del filamento deslizante», que explica el acortamiento muscular de la contracción muscular. Posteriormente, amplió su trabajo proponiendo mecanismos de conexión entre los filamentos de actina y la miosina, estableciendo la llamada «teoría del puente cruzado».

El interés social por el deporte, la proliferación de publicaciones sobre el análisis del movimiento y la Biomecánica aplicada a la actividad deportiva, durante la década de los 50, hizo que las investigaciones se extendieran a otros aspectos relacionados con la actividad física, como el equipamiento deportivo y el rendimiento deportivo (Atwater, 1980). Durante esta década se incrementaron los conocimientos sobre técnicas electromiográficas (EMG), que se aplicaron al análisis de las técnicas deportivas (Basmajian, 1976). En 1955 Bunn publicó *Scientific Principles of Coaching*, que se puede considerar como el primer libro de mecánica aplicada al deporte, con una estructura adecuada para la enseñanza de la Biomecánica deportiva de aquella época. Utilizó una estructura similar a la que tienen textos actuales de Biomecánica deportiva como el de Hay (1993) o Kreighbaum y Barthel (1990). En la primera parte del libro se describen los principios de la mecánica, mientras que en la segunda se desarrolla la aplicación práctica de esos principios a varios deportes. En la década de los 70, también cabe destacar el trabajo de algunas personas que, aunque no hicieron mucha investigación, contribuyeron con importantes ideas al apoyo científico en el deporte mediante publicaciones princi-

palmente teóricas, como Geoffrey Dyson y su libro sobre la mecánica del atletismo.

Durante la primera mitad de la década de los 60, las publicaciones se orientaron hacia la actividad muscular y articular, unas dirigidas hacia los movimientos básicos (Basmajian, 1962) y otras hacia las habilidades deportivas (Broer y Houtz, 1967). Creció considerablemente el número de investigadores que orientaron su trabajo hacia la mecánica del movimiento humano y hacia la mecánica de las técnicas deportivas. Durante la segunda mitad de esta década aparecieron las primeras revistas especializadas en Educación Física; se publicaron algunos artículos orientados hacia la enseñanza de la cinesiología en *Journal of Health, Physical Education and Recreation*.

Sin embargo, es en la década de los 70 donde se constituye la primera sociedad de Biomecánica la *International Society of Biomechanics ISB* (Pensilvania, 1972), y a principios de la de los 80 la *International Society of Biomechanics in Sports ISBS* (San Diego, 1982). La *European Society of Biomechanics* (ESB) se creó el 21 de mayo de 1976 en una reunión en Bruselas de 20 científicos pertenecientes a 11 países europeos. La ESB realiza un multitudinario congreso bianual; el último se celebró entre el 26 y 28 de agosto de 2007 en Dublín. Cabe destacar que hasta la fecha se han realizado cuatro congresos mundiales de Biomecánica: San Diego, 1989; Ámsterdam, 1994; Sapporo, 1998; y Calgary, 2002. El último tuvo lugar en 2006 en Munich (Alemania).

La lista de correo electrónico Biomch-L la fundaron en 1989 Herman Woltring y Ton van der Bogert. En septiembre de 2002 pasaron de 4.500 personas o instituciones inscritas pertenecientes a 67 países. Esta lista de correo se utiliza para realizar consultas sobre metodología de investigación, anunciar eventos y congresos científicos, difundir información y animar un foro de discusión sobre aspectos relacionados con la Biomecánica (Fig. 1.11)

La primera aparición de la Biomecánica como disciplina universitaria surgió en disciplinas relacionadas con el deporte. Al principio del siglo XX, algunas universidades enseñaban Biomecánica en las facultades de Educación Física. Había una discusión respecto a si el campo debía llamarse cinesiología o Biomecánica, cuestión que está resuelta hoy, siendo la cinesiología la ciencia repartida con varios aspectos mecánicos, fisiológicos y neurológicos del movimiento humano (Aguado, 2001).

En Europa, la mayor actividad en Biomecánica se localiza en la Escuela Superior de Educación Física de Leipzig (Alemania). Con la incorporación de las asignaturas Biomecánica del movimiento humano y Biomecánica de las técnicas deportivas en el plan de estudios de los institutos de Educación Física de Alemania y la creación del Instituto de Biomecánica, surgió la necesidad de crear un texto que permitiera sustituir las publicaciones aisladas. Hochmuth con su *Biomechanik Sportlicher Bewegungen*, trata con notable éxito la aplicación de la mecánica newtoniana a la actividad deportiva (1973). En los países del Este la Biomecánica adquiere un gran auge en 1931 cuando se organiza el *Primer Ciclo de Conferencias sobre la Biomecánica de los Ejercicios Corporales* y en Leipzig se organiza el *Primer Congreso Mundial de Biomecánica Deportiva*. En la década de los 70, el profesor Paavo Komi, recién acabada su formación doctoral en la Universidad de Pensilvania; con el Profesor Richard C. Nelson, comienza su actividad investigadora y docente en el Departamento de Biología de la Actividad Física y el Centro de Investigación Neuromuscular de la Universidad de Jyväskylä en Finlandia. En

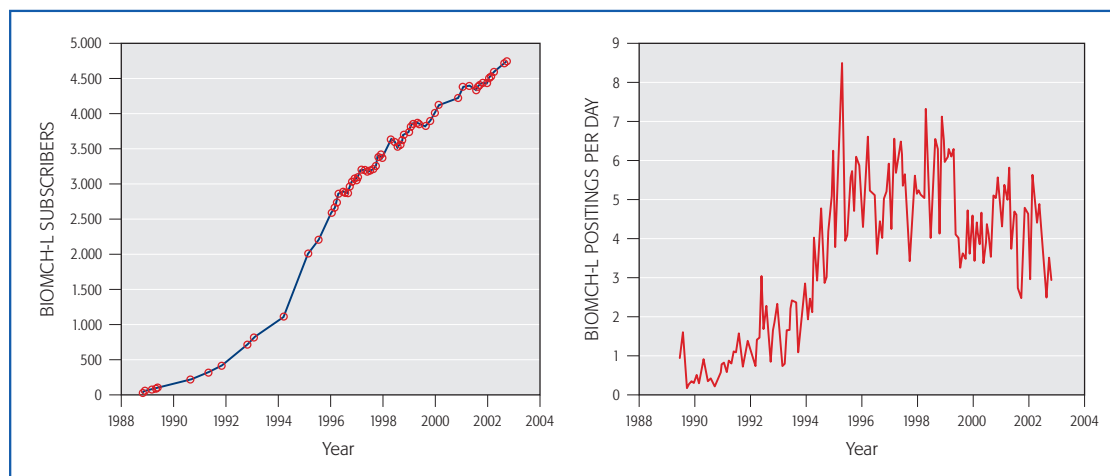


Figura 1.11. Evolución de las suscripciones a la Biomch-L y número de mensajes por día (fuente: lista de correo electrónico Biomch-L).

la actualidad, estos centros se han convertido en lugares de referencia internacional en lo relativo a los aspectos de investigación neuromuscular sobre ejercicio y envejecimiento. Desde entonces, en este centro se han formado investigadores que han realizado un gran avance en el conocimiento del sistema neuromuscular y su respuesta al ejercicio y al envejecimiento. Destacan los estudios de ciclo acortamiento-estiramiento realizados por el profesor Carmelo Bosco o los relacionados con las adaptaciones neuromusculares y hormonales con el entrenamiento de fuerza realizados por los profesores Keijo Häkkinen, Antti Mero o Jukka Viitasalo.

Como parte de la más reciente historia de la Biomecánica, cabe destacar la contribución realizada por el profesor Benno Nigg en la *Eidgenössische Technische Hochschule* (ETH) de Zurich, donde realizó su formación doctoral relacionada con el estudio de la locomoción humana con especial énfasis en las fuerzas que actúan en el sistema locomotor y los efectos que producen (por ejemplo, carga excesiva y lesiones y efectos biológicos negativos sobre hueso, tendones y ligamentos). Es uno de los principales precursores del estudio de la marcha humana y sus aplicaciones en el diagnóstico y la rehabilitación (por ejemplo, ortesis, zapatillas deportivas, equipamiento y superficies deportivas). En la actualidad, es codirector del Laboratorio de Rendimiento Humano y catedrático en la Universidad de Calgary. También cabe mencionar la contribución del profesor holandés Gerrit Jan Van Ingen Schenau (1944-1998) y posteriormente Maarten Bobbert sobre la energética del movimiento, la coordinación del movimiento, o la función de los músculos biarticulares, con especial atención en el patinaje de velocidad. Otros autores también destacan por su contribución en el campo de la simulación de los movimientos aéreos y su aplicación a los movimientos aéreos en gimnasia y a los saltos de palanca y trampolín, por ejemplo los trabajos desarrollados por el grupo de Baumann en Colonia o Maurice (Fred) Yeadon en Loughborough.

En Estados Unidos cabe mencionar la contribución más reciente a la historia de la Biomecánica del grupo dirigido por los profesores Richard Nelson y Peter Cavanagh en la Universidad de Pensilvania y sus estudios relacionados con la locomoción humana. Especialmente, cabe destacar la función dinamizadora que realizó el profesor Nelson para organizar congresos internacionales y constituir en la década de los 70, la primera

sociedad de Biomecánica, la *International Society of Biomechanics* ISB (Pensilvania, 1972). Hoy día este grupo está dirigido por Vladimir Zatsiorsky. Asimismo, también en Estados Unidos, cabe mencionar la contribución realizada por el profesor James Hay (1936-2002) en la Universidad de Iowa y sus trabajos relacionados con el atletismo, la natación y el desarrollo de metodologías para la obtención de coordenadas a partir de imágenes (tanto al aire libre como bajo el agua) y para el cálculo de parámetros mecánicos (por ejemplo, el momento angular) mediante la utilización de programas informáticos. En el grupo del profesor Hay, cabe destacar la gran relevancia que tuvieron en el campo del análisis cinemático del movimiento los estudios de investigación y la tesis doctoral titulada *A simulation method for predicting the effects of modifications in human airborne movements* (1979) realizados por Jesus Dapena, en la actualidad responsable del departamento de kinesiología y catedrático en la universidad de Indiana (Campus de Bloomington).

La primera revista especializada en Biomecánica, el *Journal of biomechanics*, con una orientación médica, apareció en 1968 en Nueva York, mientras que el *Modern trends in Biomechanics* lo hizo en 1970 en Londres. Por otro lado, la primera revista científica de Biomecánica con orientación deportiva fue publicada en 1985 en Estados Unidos y se denominó *Journal of sports Biomechanics*, y más tarde *Journal of Applied Biomechanics*.

En las Olimpiadas de Moscú, hasta las últimas realizadas en Barcelona, Los Ángeles y Atenas, se da un paso cualitativo importante al crearse dentro de la comisión médica del CIO una subcomisión de Biomecánica y fisiología del deporte. Esta subcomisión, que empieza a subvencionar trabajos en las Olimpiadas de Los Ángeles, fomenta el desarrollo de programas de investigación con los objetivos de describir y mejorar las técnicas deportivas, así como promover investigaciones que permitan una evolución de las marcas en contra de la lucha contra el dopaje (Aguado, 2001).

En la actualidad, el gran avance tecnológico y la colaboración cada vez más patente en áreas como la biología, fisiología, Medicina, ingeniería y Ciencias de la actividad física y el deporte hacen que la Biomecánica se encuentre en un interesante momento de gran producción y avance científico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguado X. Eficacia y técnica deportiva: análisis del movimiento humano. Barcelona: Inde Publicaciones, 1993.
2. Aguado X. La Biomecánica. ¿Hacia dónde vamos? En: Biomecánica y deporte. Colección Aula Deportiva Técnica. Ayuntamiento de Valencia, 2001; 17-30.
3. Aguado X, Izquierdo M, González JL. Biomecánica dentro y fuera del laboratorio. León: Universidad de León. Secretariado de Publicaciones, 1997.
4. Basmajian JV. Muscles alive - their functions revealed by electromyography. Baltimore: The Williams & Wilkins Company, 1962.
5. Broer MR, Houtz SJ. One foot jump: Volleyball spike. En: Charles C. Patterns of Muscular Activity in Selected Sport Skills Springfield: Thomas Publishing, 1967; 77-83.
6. Hay JG. Biomechanics of Sport Techniques. 4th Ed. Englewood Cliff, NJ: Prentice Hall, 1993.
7. Hochmuth G. Biomecánica de los movimientos deportivos. Madrid: Doncel, 1973.
8. Holton G. Introducción a los conceptos y las teorías de las ciencias físicas. Reverté, 1993.
9. Instituto de Biomecánica de Valencia (varios autores). Biomecánica articular y sustituciones protésicas. IBV. Valencia: Instituto de Biomecánica de Valencia, 1998.
10. Kreigbaum E, Barhels K. Biomechanics. A qualitative approach for studying human movement. New York: McMillan, 1990.
11. Nigg B, Herzog W. Biomechanics of the Musculo-skeletal system. New York: Wiley publishers, 1994.
12. Rasch J, Burke R. Kinesiología y anatomía aplicada. Buenos Aires: El Ateneo, 1985.
13. Sánchez del Río C. Los principios de la física en su evolución histórica. Madrid: Editorial de la Universidad Complutense, 1986.
14. Yeadon MR, Challis JH. The future of performance-related sports biomechanics research. Journal of Sports Sciences, 1994;. 12:3-32.