

LA INVESTIGACIÓN EN BIOMECÁNICA APLICADA A LA NATACIÓN: EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y SITUACIÓN ACTUAL

**Salvador Llana Belloch
José Ignacio Priego Quesada
Pedro Pérez Soriano
Ángel Lucas Cuevas**

*Grupo de Investigación en Biomecánica aplicada al Deporte (GIBD).
Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de Valencia.*

Fecha de recepción: Mayo 2013
Fecha de aceptación: Septiembre 2013

Resumen

A lo largo de los años, los records mundiales en natación han mejorado de forma notable respecto a otros deportes. Esto se ha debido, tanto a la mejora de la condición física de los nadadores como a la evolución de las técnicas de nado. Gran "culpa" de esto se debe al avance científico en el que se ha visto inmerso este deporte. El presente trabajo tiene como objetivo presentar de una forma organizada y coherente la evolución histórica de la investigación en biomecánica aplicada a la natación. Así, se presentan los investigadores más relevantes, pero también sus descubrimientos y métodos utilizados para alcanzarlos. De esta manera el lector entenderá cuándo y por qué aparecieron conceptos como "resistencia hidrodinámica", "hull speed", "vórtices", etc.

Palabras Claves: resistencia hidrodinámica, propulsión, cinemática, cinética.

Abstract

Throughout decades, world records in swimming have improved significantly compared to other sports. This is due both to the improvement of the swimmers physical condition and the improvement of swimming techniques. In part this is due to scientific progress. The aim of this paper is to present in an organized and coherent way the historical evolution of research in biomechanics applied to swimming. Thus the most relevant researchers, but also their discoveries and methods are presented. In this way the reader will understand when and why appeared concepts as "drag", "hull speed", "vortex", etc.

Key words: drag, propulsion, kinematics, kinetics.

1. Introducción

Las actividades acuáticas en general, y la Natación en particular, son actividades físicas que se realizan en un medio para el que el ser humano no está adaptado desde un punto de vista evolutivo (Llana, Pérez-Soriano y Aparicio, 2011). Como ya indicó Miyashita en 1981, al hacer una comparativa de cómo se han mejorado a lo largo de los años los records mundiales en la carrera a pie y en Natación (figura 1) se observa como la pendiente es muy superior en Natación. Esto es así, porque la carrera a pie es un tipo de locomoción de carácter filogenético, mientras que la natación es de tipo ontogenético. De esta manera, dado que la técnica está “normalizada”, la velocidad de carrera a pie depende fundamentalmente de la condición física. Por el contrario, en la locomoción acuática la técnica ha experimentado constantes mejoras a lo largo de los años (Llana, Pérez-Soriano, del Valle y Sala, 2012), de manera que la mejora en marcas no ha dependido sólo de la condición física sino, también, de la evolución de las técnicas de nado.

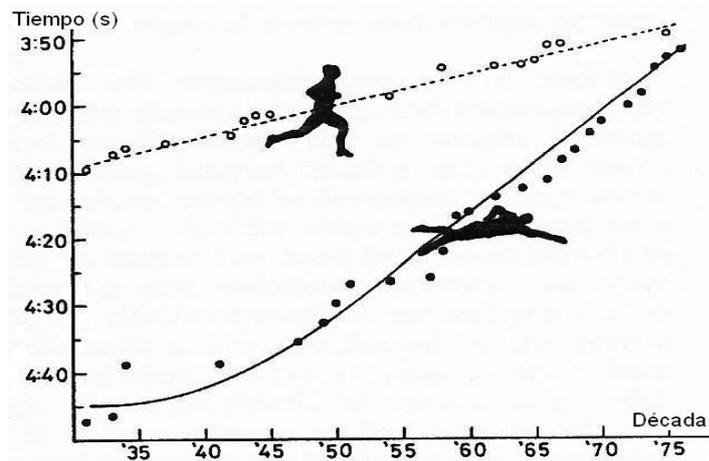


Figura 1: evolución de los records mundiales en la milla (carrera a pie) y en los 400 m.l. de Natación

Durante mucho tiempo, los nadadores y entrenadores utilizaban las técnicas y métodos que les funcionaban bien. No era posible justificar dichos métodos y técnicas de una forma científica y todos entendían que el entrenamiento era un arte. El empirismo en base al ensayo-error era la clave del progreso. Bajo este prisma, aceptar nuevos conceptos fue un proceso lento. Este escenario contrasta con la situación actual, donde los entrenadores entienden que para mejorar es imprescindible estar al día en los avances científicos. Además, dado que las disciplinas que influyen en el rendimiento son numerosas, el trabajo multidisciplinar (entrenador, fisiólogo, biomecánico, fisioterapeuta, psicólogo, ...) se considera imprescindible.

A continuación se hace un repaso de los investigadores que más han influido en la evolución de la técnica de nado, así como los medios y métodos que han utilizado en su estudio.

1.1. Los pioneros

El primer estudio científico en el ámbito de la natación data de principios del s.XX, cuando el alemán Du Bois-Reymond (1863-1938) midió la resistencia hidrodinámica pasiva de un nadador arrastrado por una barca (1905). Para realizar dicha medición, utilizó un dinamómetro elemental donde la fuerza de resistencia la medía un muelle previamente calibrado. En las condiciones en que se realizaron las mediciones, es cuestionable que la velocidad de arrastre fuera constante, condición indispensable para obtener resultados precisos y fiables (Llana, 2002). Posiblemente por estos dos motivos, y por la escasa muestra utilizada, los resultados que obtuvo fueron poco concluyentes.

Hubo que esperar hasta 1920 para que se retomara el interés científico por este deporte. Julius Amar (1879–1935) en 1920 realizó estudios similares a los de Du Bois-Reymond. El instrumental utilizado seguía siendo bastante elemental, sin embargo, Amar consiguió demostrar que la resistencia hidrodinámica estaba relacionada con el cuadrado de la velocidad según indica la siguiente ecuación:

$$R = K v^2$$

Donde: R es la fuerza de resistencia hidrodinámica

K es la constante de arrastre

v^2 es la velocidad de arrastre elevada al cuadrado

Sus resultados mostraron valores de $K = 25 \sim 5$ kg/m para varones arrastrados por la superficie del agua y en posición ventral.

La década de 1930 puede considerarse como el despegue definitivo en el estudio científico de la Natación. Así, Karpovich (1896-1975) prosiguió con el estudio de la resistencia hidrodinámica, siendo el primero en utilizar un motor eléctrico para asegurar la condición de velocidad constante (1933). De esta manera obtuvo unos valores medios para la constante de arrastre mayores que los encontrados por Amar, siendo de 30 kg/m para varones arrastrados en posición ventral. Por otro lado, observó que la ecuación utilizada por Amar era correcta hasta velocidades de arrastre de unos 2 m/s, pero que a partir de dicha velocidad, la resistencia hidrodinámica no se relacionaba con el cuadrado de la velocidad sino con el cubo de ésta.

Desde entonces muchos otros estudios (Alley 1952; Counsilman 1955; Onoprienko, 1968; Kent y Atha, 1971; Clarys 1978; Clarys y Jiskoot, 1975; Miyashita y Tsunoda, 1978; Kolmogorov y Duplishcheva, 1992; Llana y Klauck, 2003) han medido la fuerza de resistencia hidrodinámica ofrecida por los nadadores

en posición de deslizamiento, denominada como “resistencia pasiva” (passive drag). En nuestros estudios (Llana y Klauck, 2003), para arrastres en posición ventral en la superficie y a velocidades cercanas a los 2 m/s, el valor de la constante de arrastre fue de 23´5 Kg/m para nadadores/as de categoría júnior.

La mayoría de autores consideran a Thomas Kirk Cureton (1901-1992) el padre de la investigación en Natación. Kirk (figura 2) inició sus trabajos en el Instituto de Springfield (Illinois, E.E.U.U.) en la década de 1930, y los prosiguió en la Universidad de Illinois (Illinois, E.E.U.U.). Escribió más de 1.000 artículos y publicó algunos de los libros más importantes en la historia de las ciencias de la actividad física y el deporte, como pueden ser *Physical Fitness, Appraisal and Guidance* (1947) o *Physical Fitness of Champion Athletes* (1951).

En la década de 1930 ya postuló que la tracción subacuática debía realizarse con el codo flexionado, aspecto que no quedaría mundialmente aceptado hasta los estudios de James Counsilman a finales de la década de 1960. Por otro lado, fue capaz de vaticinar, ante la incredulidad del entrenador del equipo olímpico americano Bob Kiphuth, la supremacía de los nadadores nipones en las finales olímpicas de Berlín-1936. Y es que a pesar de sus desventajas antropométricas (1.68 m de estatura frente a 1.83 m de estatura de los nadadores americanos), observó que su frecuencia cardíaca en reposo era de 56 latidos/min. frente a los 65 latidos/min. de los americanos, y que sus niveles de fuerza muscular y de flexibilidad eran superiores, por ejemplo, 74.8° de movimiento en la articulación del tobillo para los japoneses por 65.4° para los americanos (Colwin, 1993).

Además de trabajar en el campo científico, también supervisó la preparación física de muchos deportistas. De entre sus nadadores, destacó el australiano John Marshall, quien consiguió todos los records desde los 200 a los 1500 en 1950. Este nadador destacaba por sus excepcionales niveles de flexibilidad (figura 2), a pesar de que sus niveles de fuerza muscular fuesen relativamente bajos y tuviese un sobrepeso de unos 9.5 kg con respecto al ideal según sus medidas antropométricas. Por otro lado, tenía una gran capacidad para tolerar el lactato, llegándosele a registrar un valor de pH sanguíneo tras un esfuerzo máximo de 6´74, el más bajo registrado en los laboratorios de Cureton (Colwin, 1993).

En Australia destacó, Frank Cotton (1890-1955), considerado el padre de la ciencia del deporte en este país. Nadador en su juventud, formó parte del relevo 4x800m del equipo australiano consiguiendo la medalla de plata en los juegos de París-1924. Tras esto se especializó en medicina cardíaca y circulatoria y desarrolló todo su trabajo en la Universidad de Sídney. Diseñó el primer cronómetro específico para los entrenamientos de Natación, que fue instalado en 1947 en la Piscina Olímpica del Norte de Sídney y que allí continúa en nuestros días. Fue pionero en usar la frecuencia cardíaca como parámetro para controlar las intensidades de

entrenamiento. Ayudó a Bob Kiphuth en diseñar ejercicios “en seco” específicos para la musculatura responsable del nado, algo muy novedoso para su época y que quedó plasmado en el libro *Swimming* (1942). Realizó estudios que empezaron a consolidar la necesidad de realizar un calentamiento previo a la parte principal del entrenamiento y, por supuesto, antes de la competición, cosa que no estaba bien establecido en la época. No hizo grandes aportaciones a la técnica de nado, dada su condición de fisiólogo, pero estableció las bases de la investigación científica en Australia, motivo por el que lo destacamos.

James E. Counsilman (1920-2004) no necesita presentación para cualquiera que provenga del mundo de la Natación. Es posiblemente el entrenador y científico que más ha influido en el desarrollo de la Natación contemporánea. Piloto durante la Segunda Guerra Mundial, dejó el ejército en 1945 e inmediatamente retomó sus estudios comenzando su trabajo como entrenador de Natación en la Universidad del Estado de Ohio. En 1947, tras graduarse, se incorporó a la Universidad de Illinois para seguir sus estudios con Kirk Cureton. Se doctoró con el trabajo *La aplicación de la fuerza en dos tipos de estilos de crol*. Tras pasar varios años como profesor y entrenador en las universidades de Iowa y del Estado de Nueva York (allí recibió el apodo de “Doc” pues los responsables de la institución insistían en que los alumnos utilizaran el término “doctor” para dirigirse a aquellos profesores que tenían dicho rango. Pero los alumnos no eran tan formales y utilizaron el diminutivo). A mediados de la década de 1950 se trasladó definitivamente a la Universidad de Indiana, donde llevó a cabo sus mayores contribuciones a este deporte.

Sus dos principales libros *The science of swimming* (1968) y *Competitive Swimming Manual* (1977) son libros de obligada lectura para los amantes de este deporte. En 1993 reeditó junto a su hijo Brian, la actualización de su primer libro renombrándolo como *The new science of swimming*. Counsilman revolucionó la técnica de nado de los estilos. Fue el primero en describir la patada de dos tiempos en crol, la importancia de flexionar el codo (tirón) y posteriormente extenderlo (empuje), de no utilizar trayectorias rectilíneas en la tracción subacuática y de acelerar en la parte final en la brazada. Revolucionó, junto a su nadador Chet Jamstrensky, la técnica de la patada de braza y fue el primero en acuñar el término “feel of the water” y lo que ello conlleva. Al postular que las trayectorias debían ser curvilíneas, fue el primero en utilizar el principio de Bernuilli para justificar la fuerza de sustentación, lo cual supuso un cambio crucial en la forma de ver y entender la generación de la fuerza propulsiva durante el nado (figura 4). Perfeccionó sistemas de entrenamiento tanto para mejorar la resistencia como la velocidad, y fue, una vez más, pionero en el desarrollo de máquinas simuladoras de la brazada para el entrenamiento de la fuerza muscular en seco, como la “Isokinetic minigym” y el aparato electrónico “Biokinetic”.



Figura 2: izquierda, Cureton (quinto por la izquierda) en el 2nd Int. Symp. on Biomechanics in Swimming (Bruselas, 1974). Derecha, Cureton examinando al nadador John Marshall (1951).

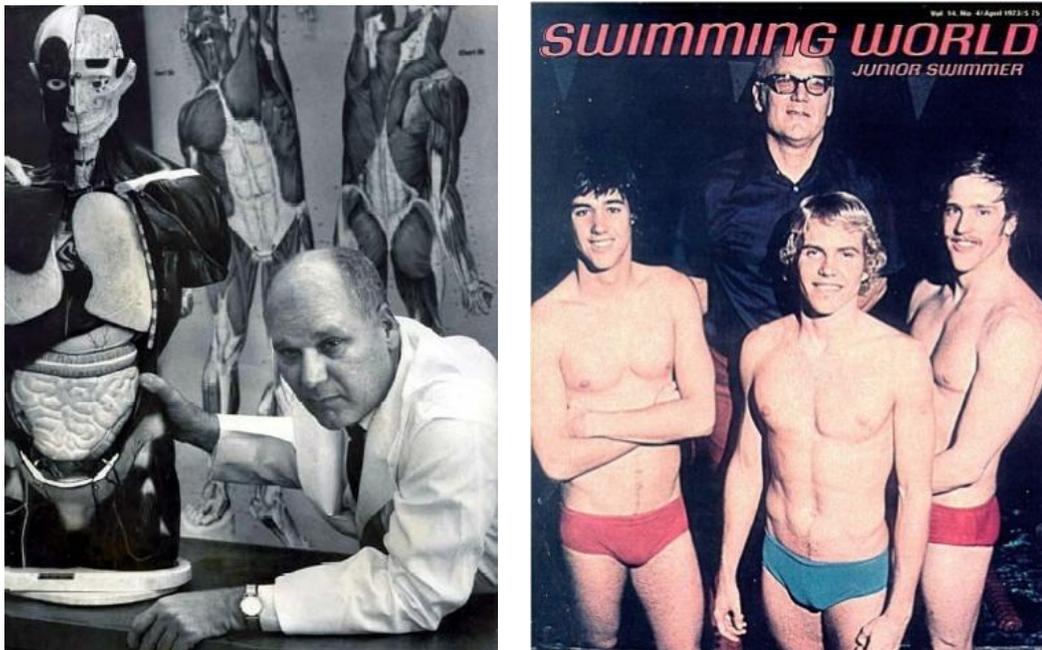


Figura 3: Izquierda, Counsilman impartiendo una clase. Derecha, en la portada de Swimming world en 1973.

1.2. Los organismos internacionales: del “Grupo de Trabajo en Biomecánica del Deporte” (W.G.B.S.-I.C.S.P.E.) a la “Comisión Mundial de Ciencia y Deporte” (W.C.S.S.)

Tras ser sentadas las bases de la investigación por los pioneros citados en el apartado anterior, se produjo un creciente aumento en la producción científica. La cooperación entre los diversos grupos de investigación y la difusión de sus descubrimientos, fue de la mano de la creación de asociaciones internacionales encargadas de organizar congresos y reuniones de expertos.

A mediados del s.XX, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) se confirmó como garante en la promoción de eventos relacionados con la actividad física, el deporte, la salud y las ciencias para su estudio. Así, en 1958 se fundó en París el Consejo Internacional del Deporte y la Educación Física (I.C.S.P.E.) en un intento por unir el ámbito científico y la práctica físico-deportiva. En 1967 se creó un subcomité del I.C.S.P.E. para la investigación en biomecánica deportiva denominado Grupo de Trabajo en Biomecánica del Deporte (W.G.B.S.-I.C.S.P.E.), encabezado por el Dr. Jurg Wartenweiler (figura 5), y que trabajaba fundamentalmente en biomecánica de la Natación. Así, en 1970 se celebró en la Universidad de Bruselas (Bélgica) el Primer Simposium Internacional de Biomecánica en Natación. Desde entonces, este congreso se celebra cada cuatro años (tabla 1).

Tabla 1: congresos organizados por el W.G.B.S.-W.C.B.S.

Año	Lugar de celebración	Título
1970	Bruselas (Bélgica)	1 st Int. Symp. on Biomechanics in Swimming
1974	Bruselas (Bélgica)	2 nd Int. Symp. on Biomechanics in Swimming
1978	Edmonton (Canada)	3 ^{er} Int. Symp. on Biomechanics in Swimming
1982	Amsterdam (Holanda)	4 th Int. Simp.on Biomechanics in Swimming and 5 th International Congress on Swimming Medicine
1986	Bielefeld (Alemania)	5 th Int. Symp. on Biomechanics and Medicine in Swimming
1990	Liverpool (Inglaterra)	6 th Int. Simp.on Biomechanics and Medicine in Swimming
1994	Atlanta (USA)	7 th Int. Symp on Biomechanics and Medicine in Swimming
1998	Jyväskylä (Finland)	8 th Int. Symp. on Biomechanics and Medicine in Swimming
2002	St Etienne (Francia)	9 th Int. Symp. on Biomechanics and Medicine in Swimming
2006	Oporto (Portugal)	10 th Int. Symp. on Biomechanics and Medicine in Swimming
2010	Oslo (Noruega)	11 th Int. Symp. on Biomechanics and Medicine in Swimming

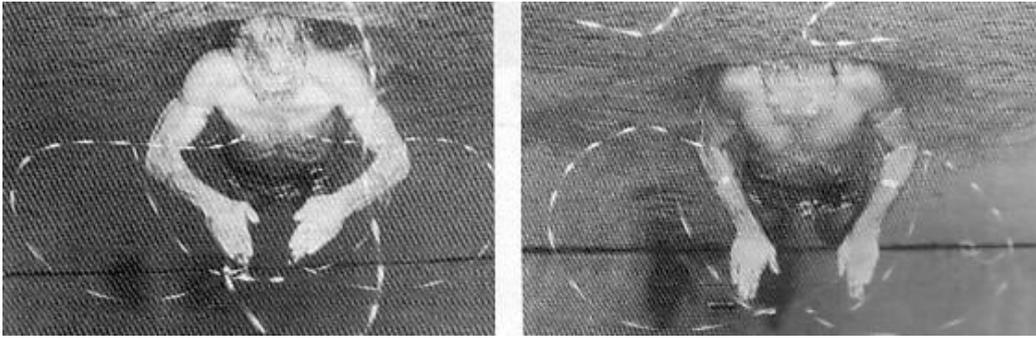


Figura 4: Counsilman fue el primero en utilizar fotogrametría estroboscópica en Natación.



Figura 5: el Dr. Jurg Wartenweiler (derecha) en el 2nd Int. Symp. on Biomechanics in Swimming, (Bruselas, 1974).

En 1973 se creó la Sociedad Internacional de Biomecánica (I.S.B.) que funcionó de forma independiente del IC.S.P.E. hasta 1982, año en que ambas instituciones llegaron a un acuerdo para compartir la dirección del W.G.B.S. De esta manera, se abrieron las puertas a la organización de simposiums internacionales de otros deportes (tabla 2). En 1983 el IC.S.P.E. pasó a llamarse Consejo Internacional de las Ciencias del Deporte y la Educación Física (IC.S.S.P.E.), editando su propia revista, el *Journal of Sports Sciences*.

En 1983 empezaron los congresos de la Sociedad Internacional de Biomecánica en el Deporte (I.S.B.S.). A diferencia de los organizados por el W.G.B.S. se trata de congresos anuales (tabla 3) que abarcan todas las áreas de la biomecánica y todos los deportes, pero que desde finales de la década de 1990 cuenta con un “*Programa Aplicado*” dedicado a la Natación.

En 1985, en la XXV reunión anual del IC.S.S.P.E. celebrada en Palma de Mallorca, el W.G.B.S. pasó a denominarse Comisión Mundial de Biomecánica del Deporte (W.C.S.B.). Finalmente, y dado que el ámbito de estudio se extendía más allá de la biomecánica, a finales de la década de 1990 pasó a llamarse Comisión Mundial de Ciencia y Deporte (W.C.S.S.).

2. Los principales investigadores en los diferentes países.

Tras exponer a los investigadores considerados pioneros y a los principales organismos internacionales que amparan la investigación y difusión de la investigación en el ámbito de la Natación, a continuación se presentan los principales investigadores en el ámbito de la biomecánica aplicada a la Natación, así como los medios y métodos que han utilizado para llevar a cabo sus estudios.



Figura 6: esquema del sistema empleado por Magel (1970).

Tabla 2: primeros congresos de otros deportes, organizados por el W.G.B.S.-W.C.B.S.

Año	lugar de celebración	Título
1973	Budapest (Hungary)	1 st Int. Symp. Biomechanics in Track y Field
1987	Liverpool (Inglaterra)	1 st World Congress on Science and Football
1990	St. Andrews (Escocia)	1 st World Congress on the Science of Golf
1992	Chamonix-Grenoble (Francia)	Int. Scientific Congress (Science of Winter Sports)
1993	Runcorn (Inglaterra)	1 st World Congress on Science and Racket Sports
1996	St Christoph Arlberg (Austria)	1 st Int. Congress on the Science of Skiing
1999	Newport (Inglaterra)	1 st World Congress on Science and Medicine of Cricket
2002	St Andrews (Escocia)	4 th World Congress on the Science of Golf
2003	Cape Town (Sudáfrica)	2 nd World Congress on Science and Medicine of Cricket
2003	Lisboa (Portugal)	5 th World Congress on Science and Football
2003	París (Francia)	3 rd World Congress on Science and Racket Sports

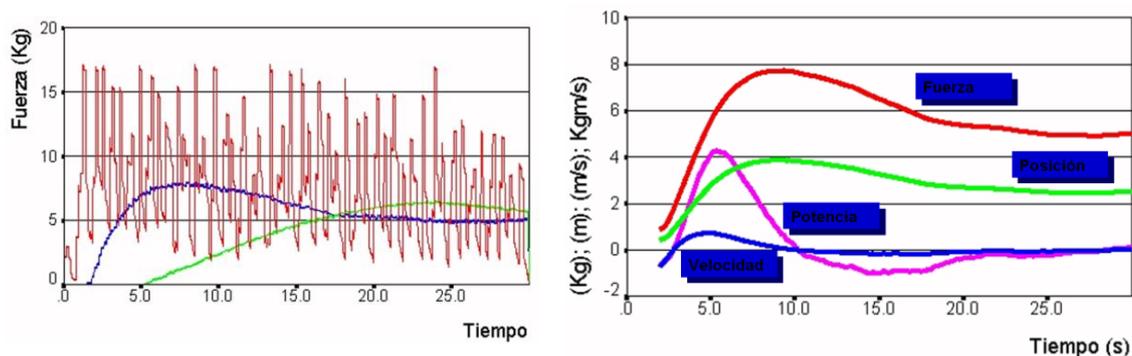


Figura 7: izquierda, registros fuerza/tiempo con cable (rojo), y gomas diferente rigidez (azul y verde). Derecha, gráfica con la posición, velocidad, fuerza y potencia de nado (Brizuela, Llana y Tella, 1999).

Tabla 3: congresos organizados por la I.S.B.S.

Año	Lugar de celebración	Título
1983	San Diego (U.S.A.)	I st Int. Symp. on Biomechanics in Sports
1984	Colorado Springs (U.S.A.)	II nd Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1985	Greeley (U.S.A.)	III th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1986	Halifax (Canadá)	IV th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1987	Atenas (Grecia)	V th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1988	Bozeman (U.S.A.)	VI th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1989	Footscray (Australia)	VII th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1990	Praga (Checoslovaquia)	VIII th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1991	Ames (U.S.A.)	IX th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1992	Milán (Italia)	X th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1993	Amherst (U.S.A.)	XI th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1994	Budapest (Hungria)	XII th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1995	Thunder Bay (Canadá)	XIII th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1996	Funchal (Portugal)	XIV th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1997	Dento (U.S.A.)	XV th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1998	Konstanza (Alemania)	XVI th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
1999	Perth (Australia)	XVII th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2000	Hong-Kong (China)	XVIII th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2001	San Francisco (U.S.A.)	IXX th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2002	Caceres (España)	XX th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2003	Ottawa (Canadá) Simposio cancelado	XXI th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2004	San diego (U.S.A.)	XXII th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2005	Pekín (China)	XXIII th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2006	Salzburgo (Austria)	XXIV th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2007	Ouro Preto (Brasil)	XXV th Int.Simp.on Biomechanics in Sports
2008	Seul (Korea)	XXVI th Int. Conference on Biomechanics in Sports
2009	Limerick (Irlanda)	XXVII th Int. Conference on Biomechanics in Sports
2010	Marquette (Michigan, USA)	XXVIII th Int. Conference on Biomechanics in Sports
2011	Oporto (Portugal)	XXIX th Int. Conference on Biomechanics in Sports
2012	Melbourne (Australia)	XXX th Int.Conference on Biomechanics in Sports

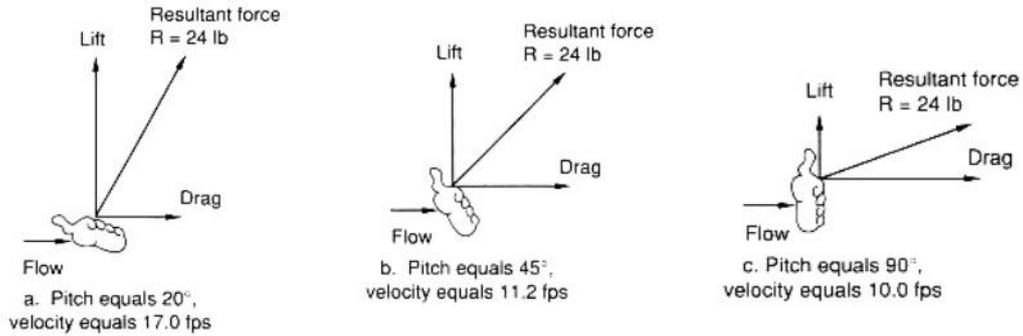


Figura 8: fuerza propulsiva y sus componentes de arrastre y de sustentación en función del ángulo de ataque (Schleihauf, 1977).

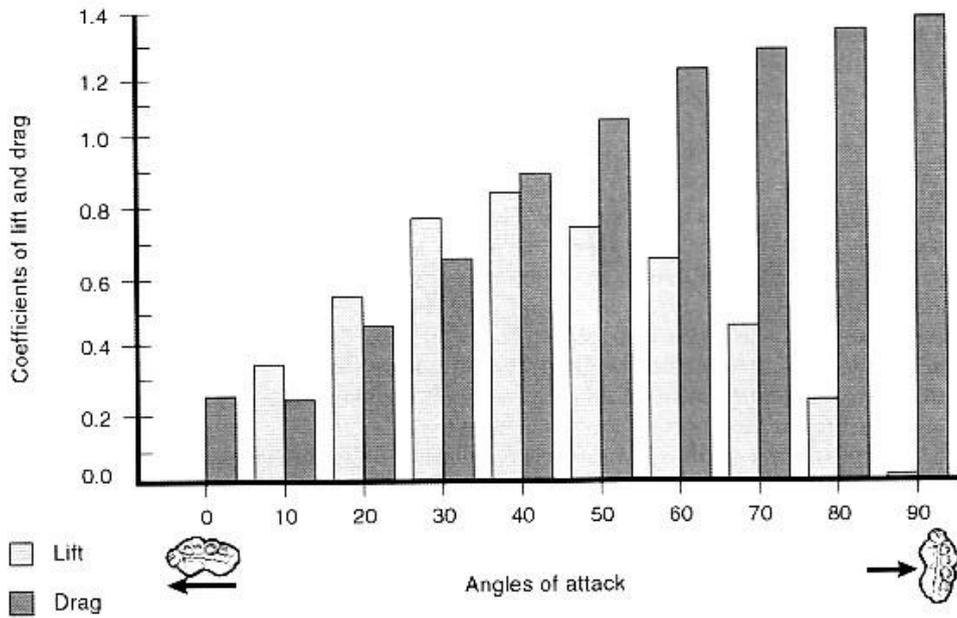


Figura 9: valores para la fuerza de arrastre (drag) y de sustentación (lift) de la mano para ángulos de ataque de 0° a 90° (Schleihauf, 1979).

2.1. Los Estados Unidos de América

Estados Unidos es el país que más investigadores ha aportado al estudio científico de la Natación. Con antelación al citado James Counsilman, fueron varios los entrenadores que intentaron dar una visión científica a sus postulados. En 1922, Frank Sullivan (1880-1944) publicó el libro *Science of Swimming*, y en 1942 Bob Kiphuth (1890-1967) y David Armbruster (1890-1985) publicaron *Swimming* y *Competitive swimming and diving* respectivamente. Estos libros tuvieron un gran impacto tanto en la técnica de nado como en la concepción del entrenamiento de la época. No obstante, no se puede decir que los autores hicieran grandes aportaciones científicas. En 1970, Charles Silvia (1911-1998) del Springfield College, publicó *Manual and lesson plans for basic swimming, water stunts, lifesaving, springboard diving, skin and scuba diving*, en el que presentaba conclusiones similares a las de Counsilman en cuanto a la necesidad de flexionar y extender el codo durante la tracción subacuática. Sin embargo, su repercusión fue limitada, posiblemente debido al impacto de los descubrimientos de “Doc”.

John Magel, del Queens College de Nueva York, fue pionero en registrar la fuerza generada durante el nado atado mediante una célula de carga (Magel, 1970). La figura 6 muestra el esquema del instrumental utilizado. Para 3 minutos de nado, registró valores máximos de 7´8 kg para el crol, 8´0 kg para la mariposa, 8´6 kg para la espalda y 10´8 kg para la braza.

En nuestros estudios (Brizuela, Llana y Tella, 1999), empleamos gomas elásticas dado que con el cable rígido aparecen picos de impacto (figura 7) que sobrealoran los máximos de fuerza aplicados, especialmente en braza y mariposa. Por otro lado, el hecho de que el nadador se pueda desplazar permite calcular la velocidad y junto con la fuerza, la potencia instantánea.

Robert E. Schleihauf, del Departamento de Salud y Educación Física del Hunter College de Nueva York, llevó a cabo los primeros estudios encaminados a cuantificar la fuerza propulsiva de las extremidades superiores durante la tracción subacuática. A mediados de la década de 1970 realizó una réplica en plástico de la mano y la introdujo en un canal de agua que se desplazaba a velocidad conocida (Schleihauf, 1977; Schleihauf, 1979) y mediante una célula de carga, midió los valores de la fuerza de resistencia equivalentes a la fuerza propulsiva si se moviera la mano y el agua estuviera quieta. De esta manera pudo descomponer la fuerza resultante en sus componentes de “arrastre” y de “sustentación” (figura 8), y sus correspondientes coeficientes en función del ángulo de ataque de la mano (figura 9).

Desde finales de la década de 1970 y principios de 1980, Schleihauf encabezó el grupo de investigadores con los que realizó el **primer estudio cinemático y de análisis cinético inverso** de la técnica de nado de los cuatro estilos

de competición (figura 10). Para ello utilizaron los stages de la selección americana previos a los J.J.O.O. de Los Ángeles-1984. Es de destacar la presencia en dicho proyecto del español Jesús Dapena, profesor de Biomecánica en la Universidad de Indiana, quien fue el responsable de los cálculos matemáticos. Dichos estudios fueron presentados en los Congresos de Biomecánica y Medicina de la Natación celebrados en los años 1982 (Ámsterdam) y 1986 (Bielefeld) y sus resultados han sido ampliamente reproducidos en numerosos textos (figura 10). Asimismo, y como consecuencia de los conocimientos adquiridos en estos estudios, Schleihauf realizó importantes contribuciones al diseño de máquinas para el entrenamiento “en seco” de la fuerza muscular con el objeto de reproducir, lo más fielmente posible, el gesto técnico del nado. En 1984 se doctoró con el trabajo *The biomechanical analysis of swimming propulsion in the sprint crawl stroke*.

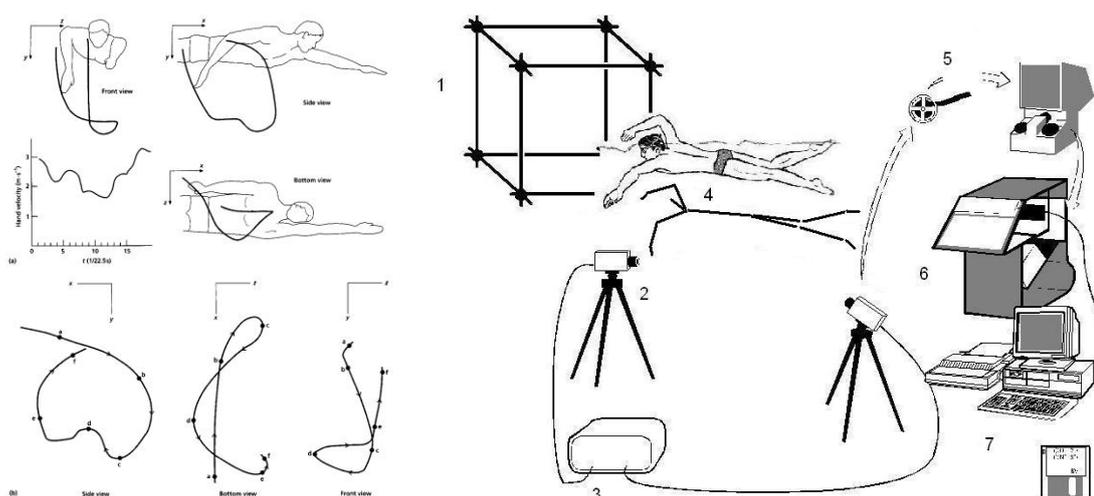


Figura 10: izquierda, resultados de los estudios cinemáticos (Schleihauf, 1979). Derecha, instrumental para el estudio cinemático tridimensional, similar al utilizado por Schleihauf en la década de 1980: (1) Sistema de referencia cúbico de dimensiones conocidas. Ha de tener un tamaño mayor al del sujeto de estudio. (2) Dos cámaras de cine colocadas de forma no co-lineal (actualmente se utilizan cámaras de vídeo digitales, lo que permite eliminar las etapas 5 y 6). (3) Electrónica para el evento sincronizador de las cámaras. (4) Modelo del cuerpo humano que permita obtener las variables de interés. (5) Moviola para seleccionar las escenas de estudio. (6) Proyector para digitalizar manualmente las imágenes. (7) Ordenador y software para el cálculo de las coordenadas tridimensionales de los segmentos del modelo utilizado.

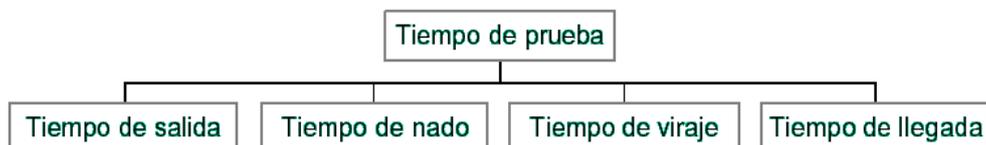


Figura 11: diagrama de flujo para el análisis de la competición propuesto por Hay (1983).

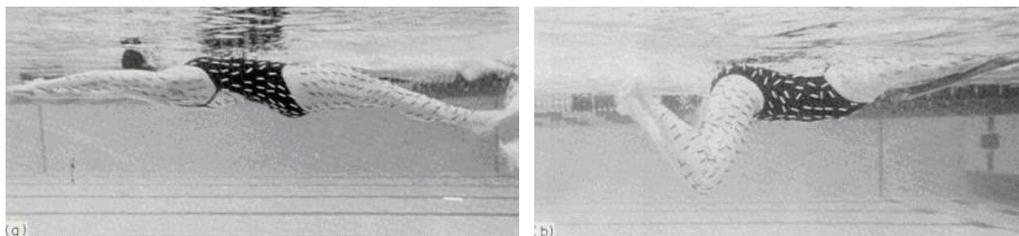


Figura 12: visualización del flujo utilizando la técnica de tufts (Hay y Thayer, 1989).

James Hay (1936–2002) de la Universidad de Iowa, fue uno de los investigadores en biomecánica deportiva más relevantes a nivel internacional. En el ámbito de la Natación, sus investigaciones y propuestas han sido ampliamente aceptadas. Al igual que para otros deportes, propuso un “*análisis de la competición*” consistente en descomponerla en sus elementos constitutivos (Figura 11).

También fue pionero en el estudio de la interacción agua-nadador, para lo que utilizó unas pequeñas tiras de tela, llamados “tufts” (Hay y Thayer, 1989) que le permitieron visualizar el flujo de agua alrededor del cuerpo del nadador (figura 12).

Jane M. Cappaert inició sus investigaciones en la década de 1990 y desde entonces ha trabajado para el equipo olímpico americano. En 1992 presentó un trabajo que completaba al de Schleihauf sobre la fuerza propulsiva de las extremidades superiores al incluir el antebrazo (figura 13). Asimismo, participó en los análisis cinemáticos de la técnica de nado de los finalistas olímpicos en los J.J.O.O. de Barcelona-1992 y de Atlanta-1996, lo que permitió establecer los modelos técnicos actualmente aceptados por la comunidad científica internacional (figura 14).

Barry Bixler (1951-2007), ingeniero especializado en la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional (C.F.D.) ha contribuido enormemente a una mejor comprensión de la interacción agua-nadador/a. En sus estudios (Bixler y Schloder, 1996; Bixler y Riewald, 2002), esponsorizados por la división de Ciencia y Tecnología Deportiva del Comité Olímpico de USA, ha modelado la mano y el antebrazo (fases I y II del proyecto) para calcular las fuerzas propulsivas que se generan durante el nado (figura 15 y 16). Sus estudios corroboran, una vez más, que la tercera ley de Neewton (ley de acción-reaación) es la principal responsable de la fuerza propulsiva. Con estos resultados publicó el marco teórico aceptado por la comunidad científica internacional actualmente sobre la propulsión en natación (Stager & Tanner, 2005).

Ernest W. Maglischo ha sido entrenador en varias universidades americanas desde 1965 y, desde la década de 1980, ha participado activamente en las investigaciones llevadas a cabo por los más importantes investigadores americanos como los citados Schleihauf, Cappaert y Bixler. Pero sobretodo destaca como el más importante divulgador de la ciencia aplicada a la Natación con su libro *Swimming faster* (1983), actualizado y reeditado bajo el título *Swimming even faster* (1993), y vuelto a actualizar y reeditar con el título *Swimming fastest* (2003). Estos han sido la saga de libros de Natación más vendidos a nivel internacional y, desde nuestro punto de vista, los mejores que se han publicado.

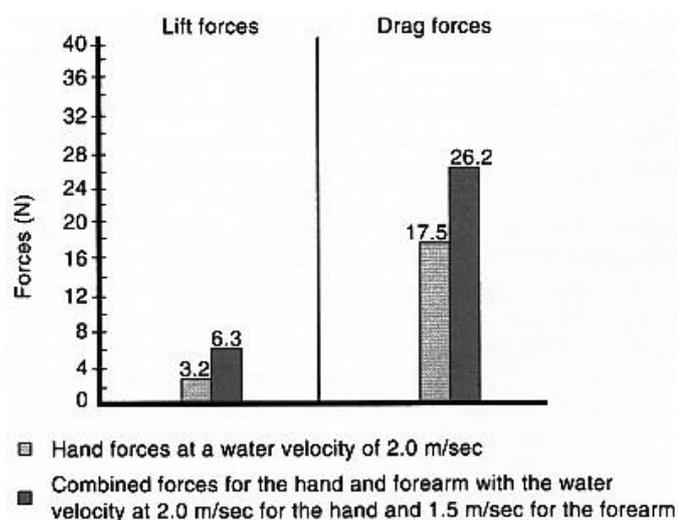


Figura 13: valores para la fuerza de sustentación y de arrastre para la mano y para el conjunto mano-antebrazo (Cappaert, 1992)

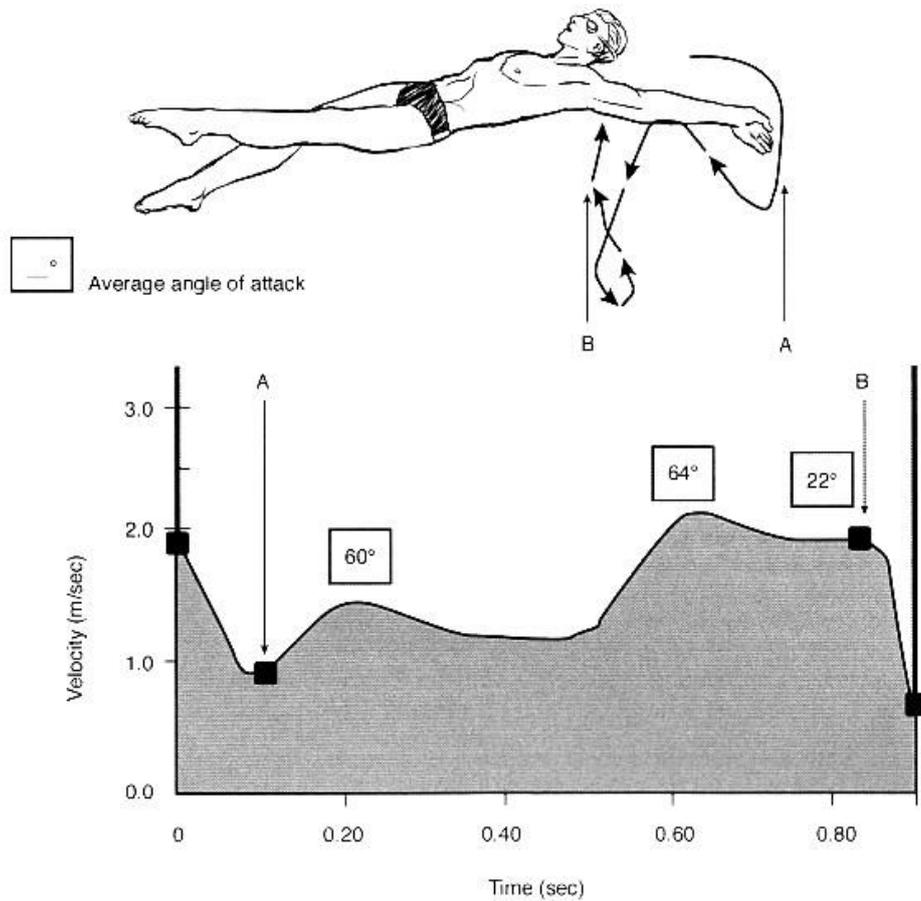


Figura 14: gráfica velocidad/tiempo y ángulo de ataque de la mano para el espaldista Mantín López Zubero en los juegos de Barcelona-1992 (Cappaert, 1993)

2.2. Canadá

Howard Firby (1924-1991) está considerado como el padre de la Natación de competición moderna en Canadá y como uno de los mejores profesores de técnica de estilos (Colwin, 2002). *Howard Firby on swimming* (1975) es uno de sus libros más prestigiosos. En él demostró sus grandes dotes como dibujante, pues todas las ilustraciones son suyas. Ilustraciones que han sido ampliamente utilizadas por otros autores. La figura 17 muestra la denominada “regla de los dos antes de Firby” para el nado de mariposa, que hace referencia a la coordinación respiración-brazos en el estilo mariposa. Por otro lado, fue el primer autor en indicar la existencia de un patrón de olas durante el nado (figura 18), y que el conocimiento de dicho patrón puede ser muy útil para el entrenador.

Doris Miller, de la Universidad de Ontario Oeste, ha centrado su investigación en los saltos de trampolín y plataforma. En 1975 publicó una revisión sobre la biomecánica de la Natación que, a pesar del tiempo transcurrido, sigue siendo uno de las mejores revisiones sobre el tema. En dicha revisión (Miller, 1975) aparece por primera vez en la literatura, el concepto de “*hull speed*” o velocidad máxima que un nadador puede alcanzar en la superficie debido a la resistencia por oleaje: los trabajos de Alley (1952), Counsilman (1955) y Thrall (1960) sobre resistencia pasiva, mostraron como a velocidades cercanas a 1’5 m/s el sistema de olas generado por el nadador hace que éste se mueva en una depresión que va aumentando tal como aumenta la velocidad (figura 19). Este efecto se asemeja a “nadar cuesta arriba”. Cuando la longitud de la depresión de la ola generada iguala la talla del nadador, la velocidad de nado correspondiente es la denominada “*hull speed*” o velocidad máxima.

2.3. Australia

Desde que el anteriormente citado Frank Cotton fundó los cimientos de la ciencia del deporte en Australia, numerosos científicos y entrenadores han prestado su apoyo a la Natación. Cabe destacar a Forbes Carlile (figura 20), otro pionero entrenador-científico australiano. Fisiólogo y profesor en la Universidad de Sídney, Forbes fue entrenador del equipo olímpico australiano en los juegos de Melbourne-1956 y del equipo holandés en Tokio-1964 y otra vez entrenador del equipo australiano en el primer Campeonato del Mundo de Natación celebrado en Belgrado-1973. Además de innumerables artículos, su libro *Forbes Carlile on Swimming* (1963) fue el primero que planteó la necesidad de la “puesta a punto” (tapering) y del calentamiento tanto pasivo, con bañeras con agua caliente, como activo. Para demostrar su eficacia, midió la temperatura muscular con agujas que introducía en el músculo a 3 cm de profundidad (Carlile, 1956a).

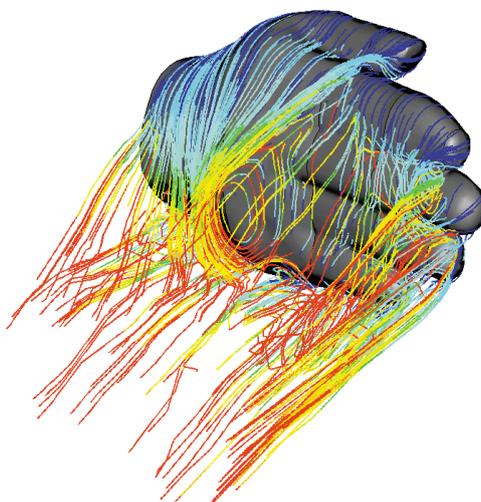


Figura 15: flujo alrededor de la mano. Los colores indican las diferencias en presión (Bixler y Riewald, 2002)



Figura 16: izquierda, líneas de agua y mapa de presiones en el nadador. Centro e izquierda, mapas de resistencia hidrodinámica en nadadoras y nadadores respectivamente.



Figura 17: “regla de los dos antes de Firby” para el nado de mariposa. Para iniciar la inspiración, la cabeza (1) ha de salir del agua antes que los brazos (2). Para acabar la inspiración, la cabeza (1) ha de entrar al agua antes que los brazos (2).

Don Talbot es el entrenador australiano más laureado. Fue el primer director del Instituto del Deporte Australiano creado en Canberra en 1980, y posteriormente ampliado con el Instituto del Deporte de Australia-Oeste en Perth. Dichos institutos se caracterizan por realizar una gran labor en investigación eminentemente aplicada.

Bruce Mason es el responsable de la “Unidad de Evaluación, Entrenamiento e Investigación” en Canberra. A principios del siglo XXI desarrolló un innovador software que permitía el análisis de la técnica de nado desde cualquier ángulo (Mason, 2002). Asimismo, ha sido el responsable del análisis cuantitativo de la competición en diversos eventos de primer orden como los Campeonatos del Mundo de 1998 (Mason y Cossor, 1998), los Juegos Panpacíficos de 1999 (Mason y Cossor, 2000) o los J.J.O.O. de Sydney-2000, etc.

Entre otros desarrollos cabe destacar un sistema de arrastre que utiliza un motor para asegurar la condición de velocidad constante (figura 21). Con este sistema han realizado estudios de resistencia pasiva tanto para medir el efecto de los bañadores de última generación (Benjanuvatra, Dawson, Blanksby y Elliot, 2001), como para medir la profundidad óptima a la que deben deslizar los nadadores tras salidas y virajes (Lyttle, Blanksby, Elliot, y Lloyd, 1998). Dichos estudios indican que la profundidad mínima a partir de la cual se evita la resistencia por oleaje, y por tanto la denominada “hull speed” es de 0´6 m.

2.4. Nueva Zelanda

En Nueva Zelanda destacan Rhys Thorp y Barry Wilson (éste recientemente jubilado), de la Universidad de Otago, quienes han realizado estudios sobre resistencia hidrodinámica activa a velocidades de nado medias-bajas. Para ello, adaptaron la metodología de Kolmogorov y Duplischeva (1992), pero con un instrumental diferente (figura 22). Midiendo el O₂ para determinar el gasto energético demostraron que es un buen sistema para calcular la resistencia activa, pero sólo para velocidades de nado donde exista stady state (Thorp y Wilson, 2002).

Asimismo, Wilson lleva realizado una fructífera colaboración con Hidegi Takagi de la Universidad de Mie (Japón). Entre sus trabajos, destaca el desarrollo de un guante instrumentado con transductores de presión (figura 23) que permiten registrar la fuerza de propulsión de la mano (Takagi y Wilson, 1999).

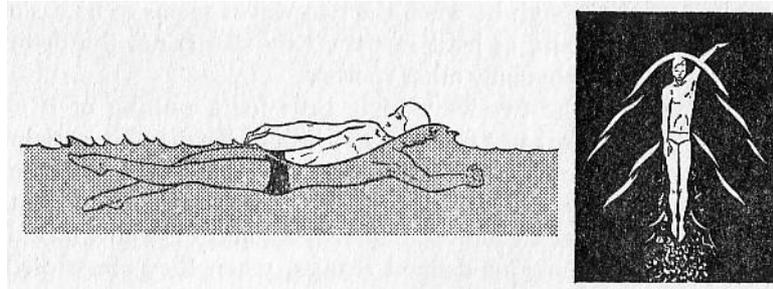


Figura 18: patrón de olas para el estilo espalda (Firby, 1975).



Figura 19: nadadora a 1'5 m/s. En este caso, la distancia entre la cresta anterior y la cresta posterior (L) todavía no ha igualado a la talla de la nadadora, lo que quiere decir que no ha alcanzado su "hull speed".

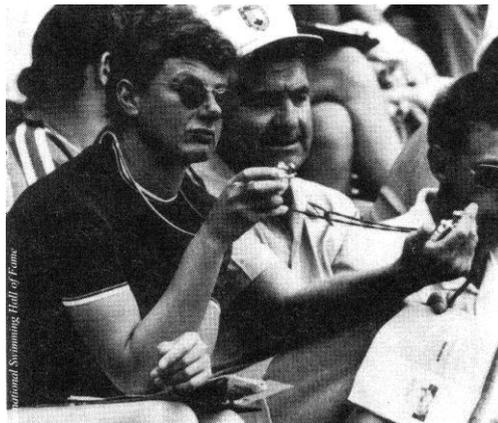


Figura 20: Forbes Carlile y su esposa Ursula.

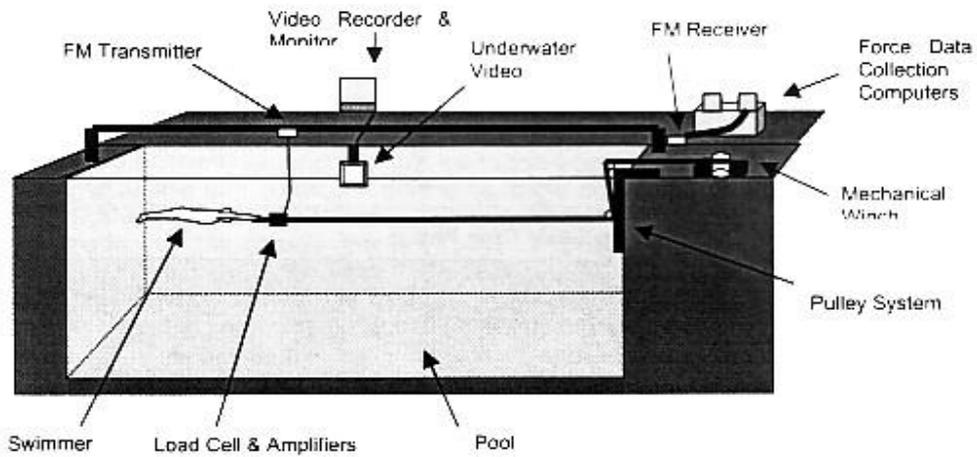


Figura 21: sistema para medir la resistencia pasiva (Little, Blanksby, Elliot, y Lloyd, 1998).

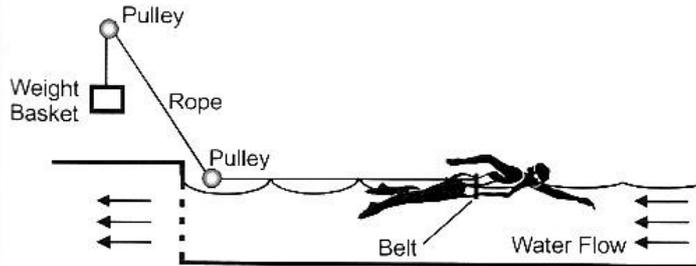


Figura 22: Sistema de Natación semi-atada en el canal de agua de la Universidad de Otago (Thorp y Wilson, 2002).

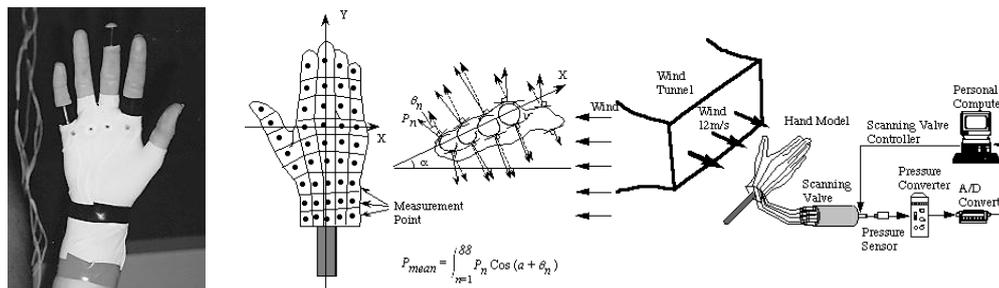


Figura 23: izquierda, foto del guante instrumentado. Centro, ángulos y algoritmo para calcular los valores de presión. Derecha, calibración del guante (Takagi y Wilson, 1999).

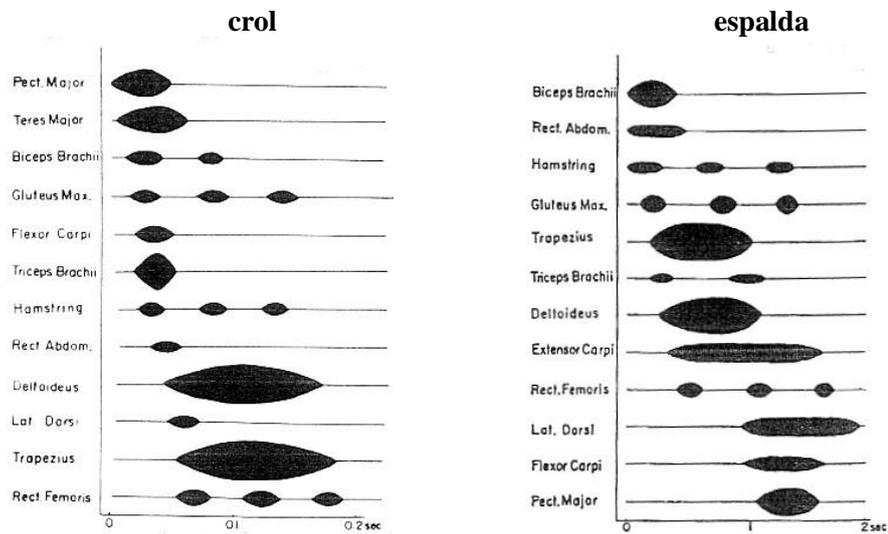


Figura 24: registros de electromiografía para los principales músculos en los estilos crol y espalda (Ikai, Ishii y Miyashita, 1964).

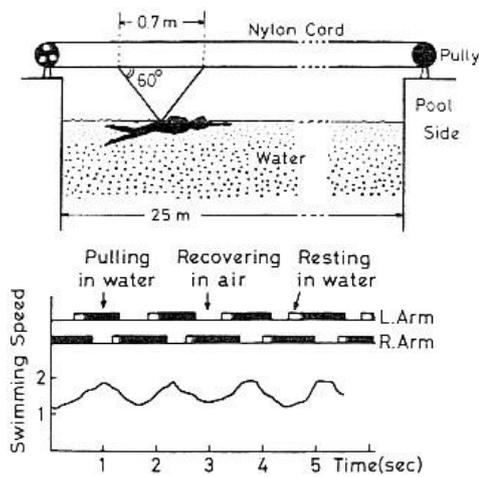


Figura 25: arriba, esquema del instrumental utilizado para medir la velocidad durante el nado. Abajo, gráfica velocidad/tiempo (Miyashita, 1997).

2.5. Japón

La Natación es un deporte de gran tradición en Japón (Llana, Pérez-Soriano, del Valle y Sala, 2012), siendo un país que siempre ha tenido nadadores en la más alta elite. El padre de la investigación científica en el ámbito de la natación es Mitsumasa Miyashita, quien se jubiló como profesor de la Universidad de Tokio en 1997, pero que sigue colaborando con sus colegas japoneses y es ponente asiduo en los más importantes congresos internacionales. Sus trabajos se recopilaron en un libro de edición limitada denominado *The Bio-Physics of Swimming –three decades of research-* (1997). En el prólogo de dicho libro escribe como se inició. “*En los inicios de mi investigación, intenté aplicar los métodos de Karpovich (1930) y Cureton (1930) a los nadadores japoneses. Hice uso de sencillos muelles para medir la fuerza muscular durante la brazada y la patada, la resistencia hidrodinámica pasiva arrastrando nadadores en una piscina de 200m, y la fuerza propulsiva durante la natación atada*”. Fue pionero en realizar estudios de electromiografía (figura 24), de la velocidad intraciclo (figura 25) y sobre la resistencia ofrecida por el oleaje (figura 26).

Hidegi Takagi, de la Universidad de Mie, es uno de los investigadores más destacados de la actualidad. Su colaboración con Barry Wilson, de la Universidad de Otago, Nueva Zelanda, ha dado sus frutos con el desarrollo del guante instrumentado citado en el apartado 2.4., así como estudios comparativos entre el nado en piscina y en canal de agua (Wilson, Takagi y Pease, 1999). Estos estudios han constatado la diferencia en longitudes y frecuencias de ciclo a velocidades de 1´6 m/s, pero no a velocidades inferiores. También ha realizado estudios sobre la técnica de nado de los diferentes estilos, así como el análisis cuantitativo en diferentes campeonatos del máximo nivel, como fue el caso del IX Campeonato del Mundo celebrado en Fukuoka-2001.

En la Universidad de Kanoya desarrollaron en 2004, asesorados por Huub Toussaint de la Universidad de Ámsterdam, Holanda, un M.A.D. system (sistema para medir la resistencia activa), cuyo funcionamiento es similar al original (figura 27).

Yohei Sato y Takanori Hino, del National Maritime Research Institute, han utilizando la metodología CFD. para conocer las fuerzas propulsivas durante el nado. Sus resultados (figura 28) han sido similares a los presentados por Bixler y Riewald (2002).

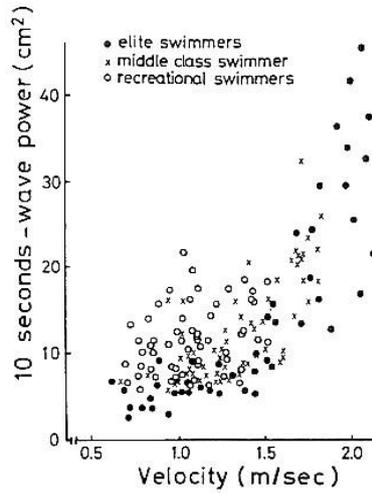


Figura 26: oleaje generado por tres grupos de nadadores de diferente nivel (Ohmichi, Takamoto y Miyashita, 1983)



Figura 27: M.A.D. system japonés. Izquierda, preparando el sistema fuera del agua. Centro, instantánea en la que se observa el apoyo de la mano del nadador en las plataformas. Derecha, resultados comparativos entre el sistema holandés y el japonés.

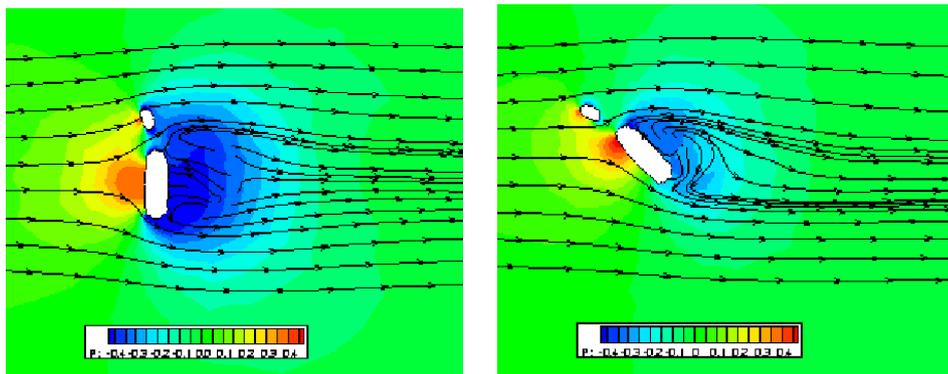


Figura 28: representación de los valores de presión alrededor de la mano para un ángulo de ataque de 90° (izquierda), y otro de 45° (derecha) (Sato y Hino, 2002).

2.6. Sudáfrica

Cecil M. Colwin (1971-2012) está considerado como uno de los autores que más ha influido en el desarrollo de Natación en la segunda mitad del s.XX. Vivió entre Sudáfrica y Australia, donde colaboró con Frank Cotton. Se inició en las tareas de entrenador en 1965 y desde tuvo numerosos campeones olímpicos y recordman mundiales. En la década de 1970 fue contratado por la federación canadiense para elaborar el plan de trabajo de cara a los Juegos de Montreal-1976, donde el equipo canadiense obtuvo su mayor número de medallas en unos juegos. En 1993 fue aceptado en el Internacional Swimming Hall of Fame. Está considerado como uno de los más grandes divulgadores de la natación y como un gran historiador de este deporte.

Ha escrito centenares de artículos en revistas especializadas, y sus tres libros más importantes *Swimming into the 21st Century* (1993), *Swimming Dynamics* (1999) y *Breakthrough swimming* (2002), son referencias obligatorias para cualquiera que esté interesado en el mundo de la Natación. En la década de 1980, publicó una serie de artículos donde hacía referencia a la necesidad de tener en cuenta la interacción agua-nadador para entender mejor la generación de propulsión. Fruto de estos artículos surgió la denominada “*Teoría de los Vórtices*” (Colwin, 1984, 1985a, 1985b).

2.7. El antiguo “Bloque del Este”

Hasta su desaparición hacia 1990, los países del “bloque del este” desarrollaron intensos planes estatales para lograr la excelencia de sus nadadores y otros deportistas en las competiciones internacionales. Así por ejemplo, tras su desaparición, en la República Democrática Alemana se encontraron ocho piscinas con canal de agua (figura 30), mientras que los Estados Unidos de América disponía únicamente de una, en el Centro de Alto Rendimiento de Colorado Springs.

Dadas las directrices políticas, la investigación era eminentemente aplicada. Había más investigación “empírica” de los entrenadores que científica y para demostrarlo nada mejor que ver las referencias bibliográficas que Vorontsov y Rumyantsev (2000) citan en su revisión sobre la biomecánica de la natación en el libro *Biomechanics in Sport* editado por la Comisión Médica del Comité Olímpico Internacional. En el capítulo dedicado a la resistencia hidrodinámica, aparecen 7 referencias de autores soviéticos, más otras 4 de autores de la misma procedencia pero con fechas posteriores a la “caída del muro”, frente a un total de 25 referencias de autores de países occidentales. En el capítulo equivalente del libro *Swimming fastest* (Maglisco, 2003) aparecen 2 referencias a autores soviéticos frente a 30 de autores occidentales.

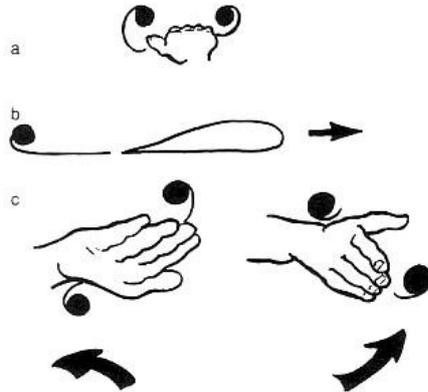


Figura 29: formación de vórtices al (a) traccionar con un ángulo de ataque de 90°, (b) tras el ala de un avión, y (c) con ángulos de ataque superiores o inferiores a 90° (Colwin, 1992).



Figura 30: piscina con canal de agua del Centro de Alto Rendimiento de Berlín-Este en 2002. Izquierda, vista lateral donde se aprecia la ventana. Centro, vista superior del canal de agua. Derecha, Salvador Llana con Lars Brechtel, actual responsable de la instalación.

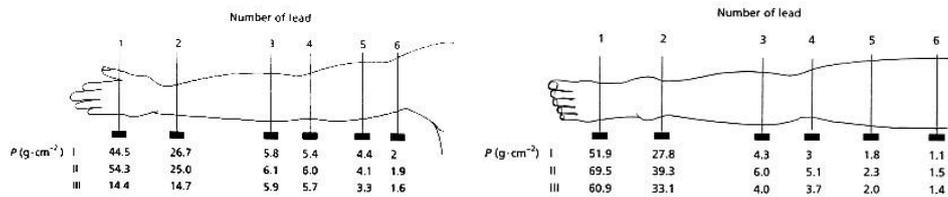


Figura 31: registros de presión sobre diferentes puntos de las extremidades superior e inferior (Bagrash, Minenkov y Chubarov, 1973).

Otra característica de esta época fue el secretismo imperante, incluso dentro del mismo país, pues no todos los científicos y entrenadores tenían acceso a toda la información. Con los países “aliados” existía cierta cooperación pero, nuevamente, el acceso a la información estaba jerarquizado y restringido, por ejemplo, cuando en 1999 quien suscribe fue invitado a Angola a impartir un curso de formación, los entrenadores nativos le informaron de haber ido a la República Democrática Alemana a principios de 1980 para realizar cursos de formación como entrenadores. Tras la “caída del muro” algunos volvieron a Alemania. Pues bien, en los sótanos del edificio donde residieron en su primera visita, existían unos laboratorios que incluían una piscina con canal de agua y “otros aparatos”. En su primera visita era zona restringida, en su segunda visita tuvieron acceso a ella.

Pasando a relatar las aportaciones más relevantes de forma cronológica, los primeros estudios sobre resistencia hidrodinámica pasiva los inició Onoprienco en 1968. Utilizó a un nadador al que arrastró en superficie y a 0'5 m de profundidad, encontrando una disminución de la resistencia a favor del arrastre subacuático del 13% y del 9% para velocidades de arrastre de 1'1 m/s y 1'9 m/s respectivamente.

Bagrash, Minenkov y Chuvarov (1973), realizaron estudios sobre las características presurométricas de las extremidades superiores e inferiores en el nado de crol. Se realizaron tres condiciones diferentes: (I) nado atado y codo extendido, (II) nado atado y con flexión-extensión de codo y (III) nado libre. Los resultados se presentan en la figura 31 y muestran como la segunda manera fue la más eficaz, coincidiendo con los postulados de Counsilman de 1968. En el caso de las extremidades inferiores, las condiciones fueron: (I) nado atado y rodilla en extensión, (II) nado atado y con flexo-extensión rodilla y (III) nado libre. Nuevamente, los resultados mostraron que el movimiento con flexo-extensión de rodilla era el más efectivo.

Zatsiorsky, Bulgakova y Chaplinsky (1979) realizaron estudios sobre las salidas. Entre los resultados más interesantes destaca la alta correlación encontrada ($r = 0'94$, $p < 0'05$) entre la velocidad de deslizamiento subacuático y el “tiempo de salida” empleado en completar 5'5 m. Además, dicho tiempo no correlacionó con el tiempo de apoyo en el poyete de salida.

Issurin, actualmente en el Wingate Institute Technion de Haifa (Israel), e Issurin y Kostuk (1977 y 1978 respectivamente) realizaron estudios sobre resistencia hidrodinámica y fuerza de propulsión, así como análisis cinemáticos de la brazada de crol mientras que Rummyantsev (1982; 1984) centró sus estudios en la fuerza de propulsión.

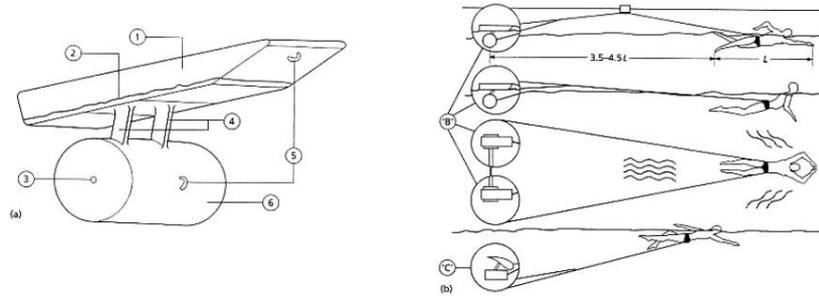


Figura 32: (a) “cuerpo hidrodinámico” utilizado por Kolmogorov y Duplischeva:1) tabla de goma-espuma, 2) nivel del agua, 3) orificio, 4) juntas de unión, 5) anclajes para el nadador, 6) cilindro metálico. (b) y (c) forma de atado según el estilo de nado (Kolmogorov y Duplischeva, 1992).

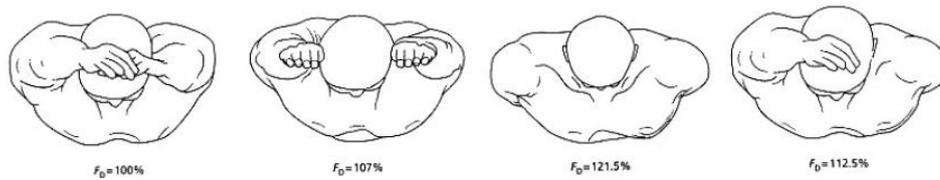


Figura 33: efecto de la posición de las extremidades superiores sobre la resistencia hidrodinámica pasiva (Bulgakova y Makarenko, 1996)

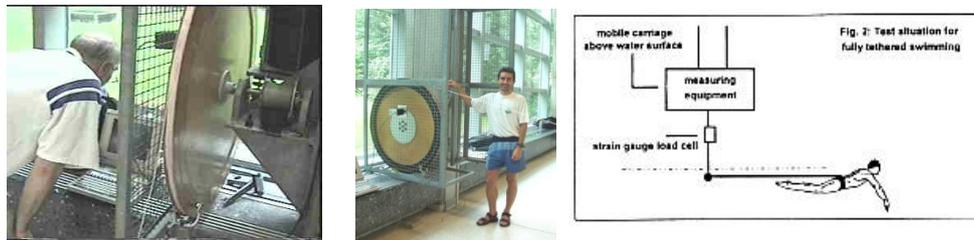


Figura 34: Izquierda y centro, Jurgen Klauck y Salvador Llana con el aparato de arrastres de la German Sporthochshule de Colonia. Derecha, esquema de la plataforma móvil del Centro Acuático.

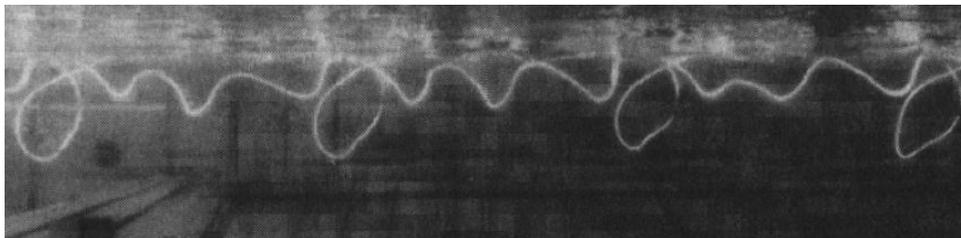


Figura 35: trayectoria de la mano y pies durante el nado crol (Reischle, 1985).

Kolmogorov y Duplischeva (1992) desarrollaron su denominado “método de perturbación de la velocidad” para el estudio de la resistencia hidrodinámica activa. El método consiste en nadar dos veces 30 m a la máxima velocidad: la primera a nado libre y, la segunda resistido con un “cuerpo hidrodinámico” diseñado para tal efecto y previamente calibrado (figura 32). En los dos intentos se calcula la velocidad media con un sistema de cronometraje convencional y, dado que en ambos casos la potencia desarrollada por el nadador es máxima y constante, la resistencia activa puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$P_1 = P_2$$

$$P_1 = F_{r1} v_1 \text{ y } P_2 = F_{r2} v_2$$

Donde:

v_1 , P_1 y F_{r1} = velocidad media, potencia y resistencia hidrodinámica activa del intento sin el “cuerpo hidrodinámico” (m/s, W y N, respectivamente),

v_2 , P_2 y F_{r2} = velocidad media, potencia y resistencia hidrodinámica activa del intento con el “cuerpo hidrodinámico” (m/s, W y N, respectivamente).

A su vez, F_{r1} y F_{r2} dependerán de:

$$F_{r1} = 1/2 C_x \rho S v_1^2$$

$$F_{r2} = 1/2 C_x \rho S v_2^2 + F_b$$

Donde:

ρ = densidad del agua en Kg/m³,

C_x = coeficiente de forma (parámetro adimensional que depende de la forma del cuerpo)

S = superficie de choque o área frontal proyectada en m²

F_b = resistencia hidrodinámica del “cuerpo hidrodinámico”.

Combinando ecuaciones:

$$1/2 C_x \rho S v_1^3 = 1/2 C_x \rho S v_2^3 + F_b v_2; \text{ por tanto: } C_x = F_b v_2 / 1/2 \rho S (v_1^3 - v_2^3)$$

$$\text{Finalmente: } F_{r1} = F_b v_2 v_1^2 / (v_1^3 - v_2^3)$$

La gran ventaja de este método es su sencillez y su aplicabilidad a cualquier estilo de nado. Su gran inconveniente es que solamente se aplica a velocidad máxima. Los resultados obtenidos en el estilo crol dieron valores medios de $K = 25'95 \text{ kg/m}$ para hombres y $K = 20'61 \text{ kg/m}$ para mujeres. Por otro lado, como ya indicaron los estudios de Clarys (1979), los resultados muestran que la resistencia activa depende más de la técnica de nado que de las características antropométricas.

Bulgakova y Makarenko publicaron en 1996 el libro *Sport Swimming*, donde recogen aportaciones propias y de otros autores soviéticos-rusos. La figura 33 muestra una de las representaciones del libro donde se comparan diferentes posiciones de los segmentos corporales y su efecto sobre la resistencia hidrodinámica.

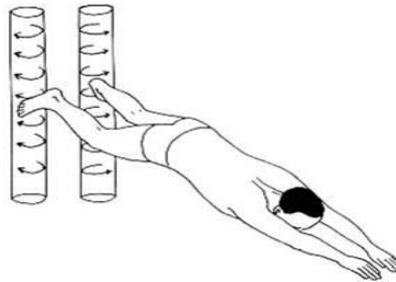


Figura 36: representación gráfica de los vórtices generados al final de la patada de braza (Ungerechts, 1988)

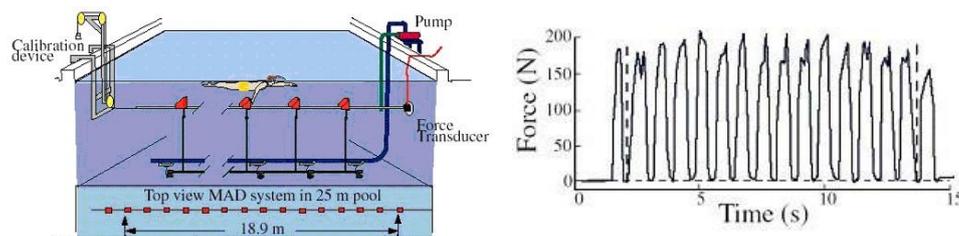


Figura 37: izquierda, esquema del M.A.D. system. Derecha, registros fuerza/tiempo.



Figura 38: canal de agua del Laboratorio de Hidrodinámica de Barcos en Delft. A la izquierda está Toussaint. Derecha, detalle de la réplica en plástico de la mano-antebrazo.

2.8. Alemania

La German Sportshule de Colonia es, junto con la Universidad de Jyväskylä en Finlandia, el más reputado centro de investigación en ciencias de la actividad física y del deporte en Europa. El *Centro Acuático* dispone de diverso instrumental fijo para realizar estudios, como un aparato de arrastre (figura 34) y una plataforma móvil en el techo que permite colocar instrumental y desplazarse a la misma velocidad que el nadador/a (figura 34). Numerosos investigadores han desarrollado su labor allí, como Jurgen Klauck, físico recientemente jubilado que durante años trabajó en el Instituto de Biomecánica. Padre de una nadadora, muy pronto orientó su trabajo hacia el mundo de la Natación. Sus estudios abarcan desde las máquinas para entrenamiento “en seco” de la fuerza, pasando por el desarrollo de instrumental para el análisis de la técnica de nado, el desarrollo de modelos físicos y sobre el concepto de “masa añadida”. A principios del s.XXI realizó estudios sobre el efecto que los bañadores de última generación tienen sobre la resistencia hidrodinámica pasiva (Llana y Klauck, 2003). Los resultados de dichos estudios no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre dichos bañadores y los convencionales.

También en la German Sportshule de Colonia trabajan Kurt Wilke y Klaus Daniel, quienes son referencias obligadas en entrenamiento deportivo y la técnica de nado. El libro *Das training des Jugendlichen Schwimmers* (Wilke, 1988), traducido al castellano en 1990 con el título *El entrenamiento del nadador juvenil*, está considerado como un clásico.

Klaus Reischle, de la Universidad de Heidelberg, ha sido uno de los investigadores que más estudios realizó con la técnica de fotogrametría estroboscópica (figura 35). Su libro *Biomechanik des Schwimmens* (1985), es un clásico que ha sido traducido a varios idiomas, entre ellos el español en el año 1992 con el título *Biomecánica de la natación*.

Bodo Ungerechts, de la Universidad de Liefelfeld, destaca como investigador en aspectos relacionados con la hidrodinámica y especialmente, en la Teoría propulsiva de los vórtices (figura 36). También ha realizado estudios comparativos sobre el nado de los delfines. Actualmente se encuentra en la Universidad de Tsukuba (Japón), donde está perfeccionando un sistema láser P.I.V. (particle image velocimetry) para visualizar los vórtices generados durante el nado. De momento, el sistema permite obtener imágenes 2D, pero esperan obtener imágenes 3D en breve.

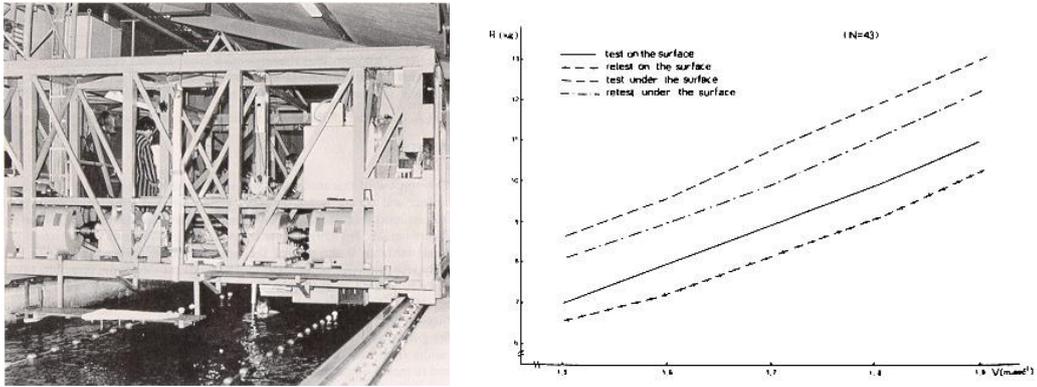


Figura 39: izquierda, el Netherlands Ship Model Basil, en Wageningen. Derecha, gráfica resistencia hidrodinámica/velocidad, donde se compara el efecto superficie-subacuático (Jiskoot y Clarys, 1975).

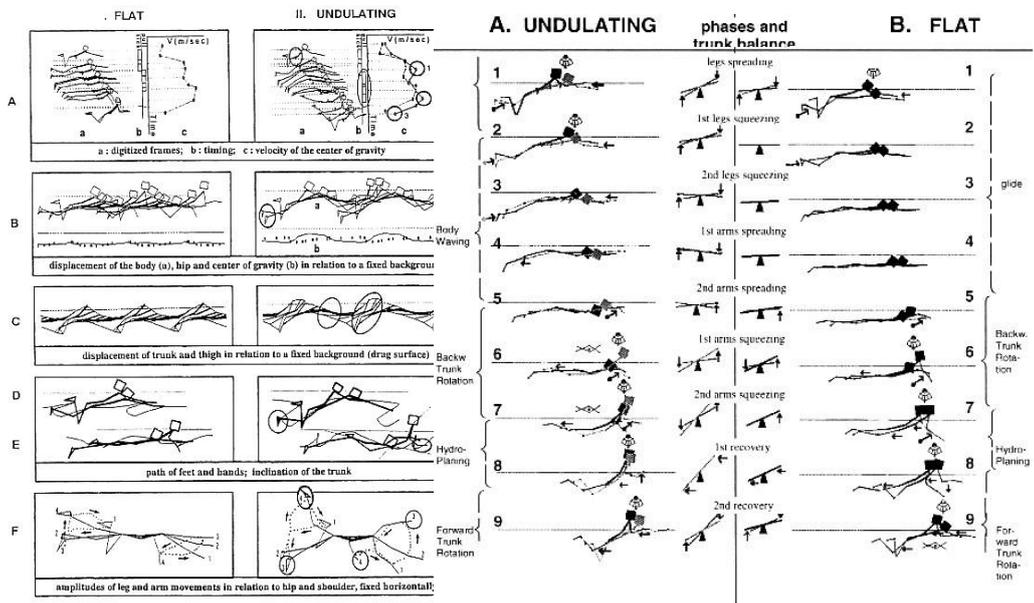


Figura 40: izquierda, comparativa entre algunos parámetros espaciales y temporales de la braza plana y ondulatoria (Persyn, Colman y Van Tilborgh, 1992). Derecha, división del ciclo de nado en nueve fases para comparar la braza plana y la braza ondulatoria (Persyn y Colman, 1999).

2.9. Bélgica y Holanda

En la Universidad de Ámsterdam está uno de los grupos de investigación más dinámicos de la actualidad, que ha centrado sus estudios en la resistencia hidrodinámica activa y más recientemente, en la resistencia por oleaje. Entre los investigadores más reseñables destacan Peter Hollander, Hoob Toussaint, Monique Berguer y Gert de Groot. En la década de 1980 desarrollaron el “M.A.D. system” (figura 37), un innovador y controvertido (pues los nadadores se apoyan en superficies sólidas para impulsarse, lo que es totalmente contrario a lo que hacen durante el nado normal) sistema para medir la resistencia activa. Con él obtuvieron unos valores de $K = 30 \text{ kg/m}$ para hombres y $K = 24 \text{ kg/m}$ para mujeres durante el nado de crol (Toussaint, Groot, Savelberg, Vervoorn, Hollander y Ingen Schenau, 1988). A principios de 2000 instalaron un nuevo MAD system, más preciso y fiable, con el que acometieron estudios sobre la resistencia por oleaje (Toussaint, Stralen y Stevens, 2002). Los resultados de dicho estudio mostraron como en el caso del estilo crol y a velocidades superiores a 1.9 m/s , la resistencia por oleaje puede representar más del 20% del total. También han realizado estudios sobre el efecto de los bañadores Fastskin de Speedo sobre la resistencia hidrodinámica. Al igual que estudios anteriormente citados, no encontraron diferencias estadísticamente significativas (Toussaint 2002).

Monique Berguer ha centrado sus estudios en la fuerza propulsiva generada por las extremidades superiores. Para tal fin, diseñó una réplica del miembro superior para introducirla en el canal de agua del Laboratorio de Hidrodinámica de Barcos en Delft (figura 38). En sus primeras publicaciones, cuestionó la validez de determinados aspectos de los trabajos de Schleinhauf, sin embargo, los estudios de Lauder, Dabnichki y Bartlett (ver apartado 2.11.) han rehabilitado los trabajos de Schleinhauf.

En Bélgica, Jan Pieter Clarys es uno de los científicos más dinámicos desde la década de 1970. Fue organizador de los dos primeros simposiums internacionales de Biomecánica en la Natación celebrados en Bruselas en los años 1970 y 1974. Inicialmente sus estudios se centraron en el estudio de la resistencia hidrodinámica y de la actividad muscular utilizando técnicas de E.M.G. Para ello utilizaron el canal de agua de la Dársena de Modelos de Barcos de Holanda en Wageningen (figura 39). Sus resultados indicaron que la resistencia activa era entre 1.5 y 2 veces mayor que la resistencia pasiva, siendo mayor en nadadores recreativos que en nadadores de competición. Dedujo también que la resistencia activa se ve más afectada por la técnica de nado que por las características antropométricas de los nadadores. Sin embargo, algunos de sus resultados fueron un tanto erróneos, por ejemplo, los relacionados con el efecto de la resistencia por oleaje (figura 39). “*Parece que la resistencia hidrodinámica al ser arrastrado por debajo del agua, ...es mayor que la resistencia hidrodinámica en la superficie*”, y continúa “*Aplicándolo a la práctica, quiere decir, que en cuando a la resistencia hidrodinámica se refiere, es preferible nadar en la*

superficie que por debajo de ella” (Jiskoot y Clarys, 1975). Es normal que estos resultados causaran confusión en la comunidad científica de la época, y en algún estudiante años después.

En la Universidad de Leuven, Bélgica, hay otro grupo de trabajo encabezado por Ulrik Persyn y Veronique Colman (1961-2006). Gran parte de sus estudios se han centrado en el estudio de la técnica del estilo braza, comparando la “braza plana” y la “braza ondulatoria” (figura 40). Entre sus resultados destaca el hecho de que la braza ondulatoria presenta menores variaciones en la velocidad intraciclo y requiere mayores niveles de flexibilidad, siendo más típica en mujeres, mientras que estilos más planos presentan mayores variaciones en la velocidad intraciclo y requieren mayores niveles de fuerza, tanto en las extremidades inferiores como en las superiores, siendo más típica en hombres. En los últimos años, han presentado propuestas metodológicas para la mejora de la técnica de nado basándose en aspectos kinesiológicos y biomecánicos. También han colaborado estrechamente con Ungerechts en el estudio de las estelas y vórtices de agua generados durante el nado (figura 41).

2.10. Francia

Jean-Claude Chatard es, posiblemente, el investigador francés con más repercusión internacional en la actualidad. Profesor de la Universidad de Saint-Etienne, organizó el IX Simposium de Biomecánica y Medicina en Natación en el año 2002. Sus estudios han abarcado tanto aspectos biomecánicos como fisiológicos siempre aplicados a la mejora del rendimiento. En el campo fisiológico es de destacar su cooperación con Sabino Padilla e Iñigo Múgica, de los servicios médicos del Athletic Club de Bilbao. Entre sus mayores contribuciones destaca el estudio por el que demostró que la resistencia hidrodinámica pasiva presenta una relación inversa con el nivel de los nadadores, siendo por tanto un buen indicador de la aptitud de éstos (Chatard, Bourgion y Lacourt, 1990). Por otro lado, ha desarrollado el “*índice de coordinación*” como indicador de la eficiencia técnica (Chollet, Chalies y Chatard, 2000). Este índice es una escala que va desde -20 hasta 10. Sus estudios muestran como el valor aumenta con el nivel de los nadadores y disminuye cuando se aumenta la resistencia, por ejemplo al respirar o al nadar con ropa de diverso tipo.

Chollet es profesor en la Universidad de Rouen y entrenador del Club de Natación de Montpellier, por lo que sus investigaciones son fundamentalmente aplicadas. Así, en el “Quinto Simposium Internacional de Biomecánica y Medicina en Natación” celebrado en la localidad alemana de Bielefeld en 1996, presentó el desarrollo de un sistema de bio-feedback (figura 42) cuyo propósito era mejorar la brazada durante el nado. En cuanto al estudio de la técnica, sus trabajos se han

centrado en el análisis de variables cinemáticas y en aspectos coordinativos, como el arriba mencionado “Índice de coordinación”. Por otro lado, su libro *Natation sportive. Approche scientifique*, editado en 1992, revisado y vuelto a reeditar en 1997, es posiblemente el mejor libro de Natación en lengua francesa, habiéndose traducido a otros idiomas como el español en el año 2003, con el título *Natación Deportiva*.

Patric Pélayo, de la Universidad de Lille, ha colaborado con los arriba citados en numerosas ocasiones, siendo sus aportaciones numerosas y abarcando aspectos tan variados como la historia, la biomecánica, la fisiología y el entrenamiento. De entre sus recientes estudios destaca el realizado sobre la relación existente entre la frecuencia y la longitud de ciclo en la máxima velocidad de nado en steady state (Deberle, Lefevre, Depretz, Sydney y Pélayo, 2003). La figura 43 muestra como, al sobrepasar dicha velocidad, los nadadores disminuyen la longitud de ciclo y aumentan la velocidad de nado, siendo por tanto un buen indicador de la máxima velocidad de nado en steady state.

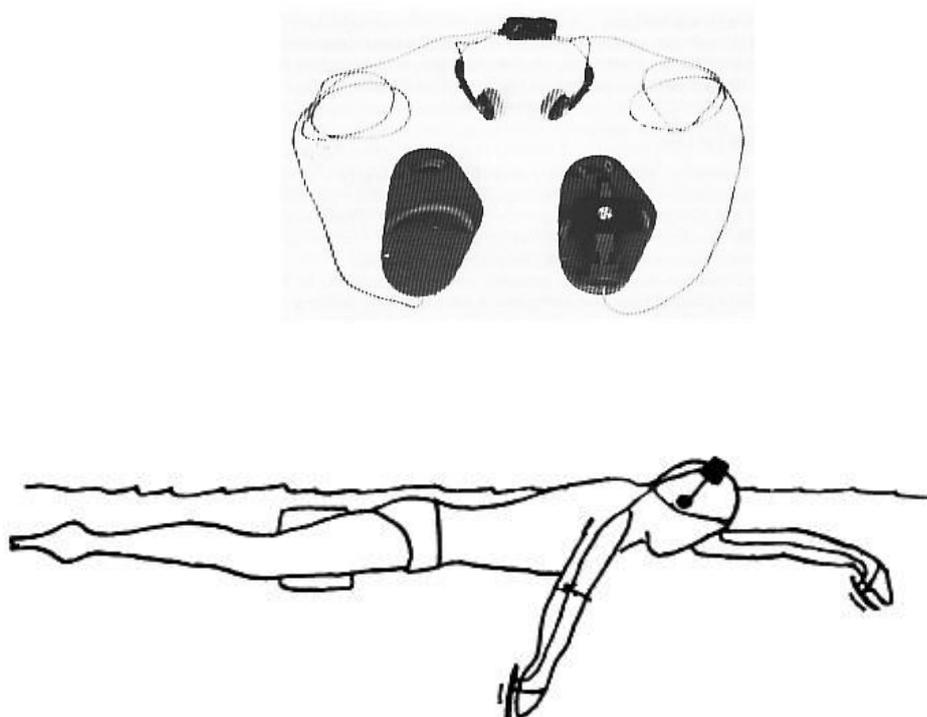


Figura 42: izquierda, sistema experimental compuesto por auriculares, palas instrumentadas y alimentador eléctrico. Derecha, dibujo de su uso (Chollet, Micallef, y Rabischong, 1988).

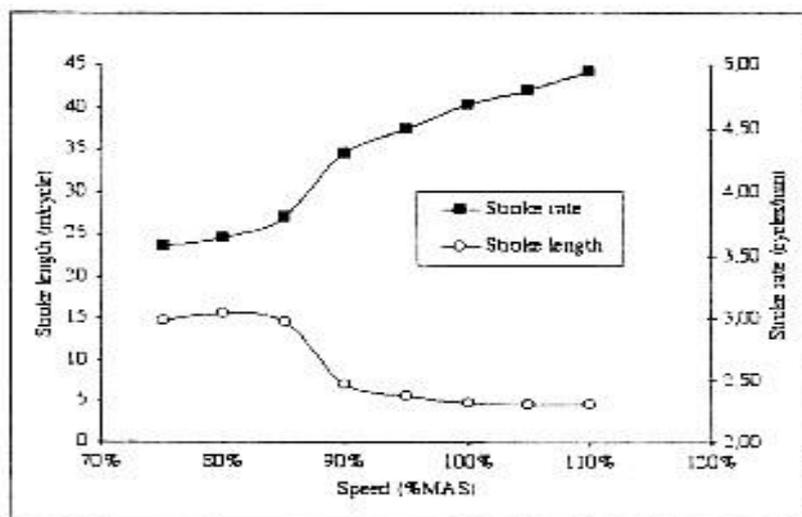


Figura 43: relación longitud y frecuencia de ciclo con la máxima velocidad aeróbica (Deberle, Lefevre, Depretz, Sydney y Pélayo, 2003)

2.11. Reino Unido

Ross Sanders obtuvo su doctorado en la Universidad de Queensland (Australia) y durante un tiempo trabajó en la Universidad de Otago en Nueva Zelanda. Actualmente está afincado en Edimburgo donde es responsable del área de Investigación en Ciencias del Deporte de la Universidad de Edimburgo y director del “Centro Acuático para la Educación e Investigación” de dicha universidad. Fue presidente de la Sociedad Internacional de Biomecánica del Deporte (I.S.B.S.) durante los años 1999-2001 y es actual responsable del “Servicio de Información a los Entrenadores” de la citada organización. Con todo ello, es uno de los biomecánicos más influyentes a nivel internacional. Sus investigaciones se han centrado tanto en el ámbito de los saltos de trampolín y plataforma, como en la Natación.

R. M. Bartlett, de la Universidad de Sheffield Hallam, es un biomecánico que ha centrado sus estudios más en el atletismo y especialmente el lanzamiento de jabalina, que en la Natación. Sin embargo, sus aportaciones en esta ámbito son de gran importancia, especialmente en el cálculo de las fuerzas propulsivas a partir de datos cinemáticos. En su trabajo con Lauder (Lauder, Dabnichki y Bartlett, 2001) zanjó la polémica suscitada sobre la validez de los trabajos de Schleihauf. En sus conclusiones dice textualmente “la comparación entre los dos métodos más importantes para la reconstrucción de la mano (Schleihauf y Berger) muestra que el método de Schleihauf permite una reconstrucción más precisa y estable. El método es menos sensible a los errores debidos al azar ...” (figura 44).

2.12. Portugal

A pesar de no tener grandes nadadores a nivel internacional, Portugal es un país con un buen nivel en investigación aplicada a la Natación. Destaca J. Paulo Vilas-Boas, de la Universidad de Oporto, quien se ha formado en diversos centros de investigación europeos, lo que le ha permitido tener una excelente cooperación con ellos. Posiblemente gracias a ello, organizó en 2006 en Oporto el X Simposium Internacional de Biomecánica y Medicina en Natación. Sus estudios abarcan diversos aspectos relacionados con la técnica de nado como la relación entre las fluctuaciones de velocidad y el coste energético que ello conlleva, las modificaciones cinemáticas debidas a la respiración lateral en mariposa y comparativas entre las salidas de agarre y las de atletismo.

En la Universidad Técnica de Lisboa está el grupo encabezado por Francisco Alves, quien se ha entrado en el estudio de cinemático de la técnica y su relación con el gasto energético. Su cooperación con Antonio Silva, de la Universidad de Vila Real, se ha centrado en el estudio del estilo braza. Estos estudios los han llevado a cabo en colaboración con Colman y Persyn de la Universidad de Leuven.

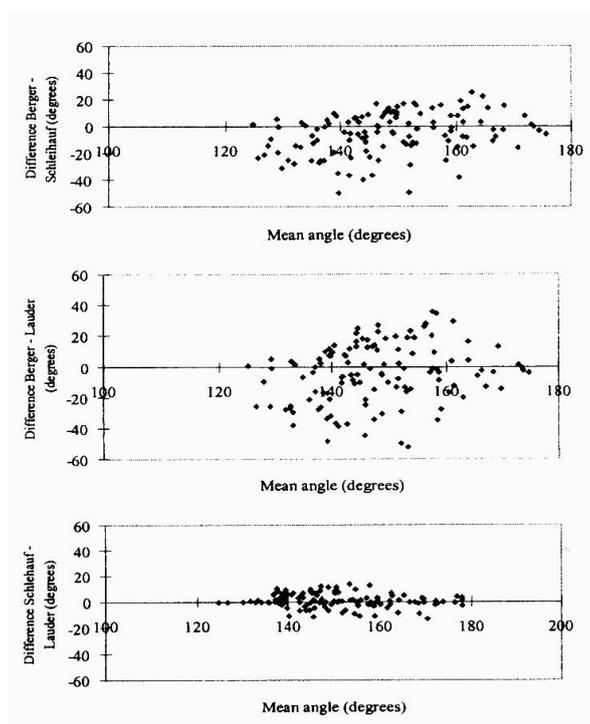


Figura 44: concordancia entre los resultados de (a) Berger-Schlehauf, (b) Berger-Lauder y (c) Schlehauf-Lauder (Lauder, Dabnichki y Bartlett, 2001).

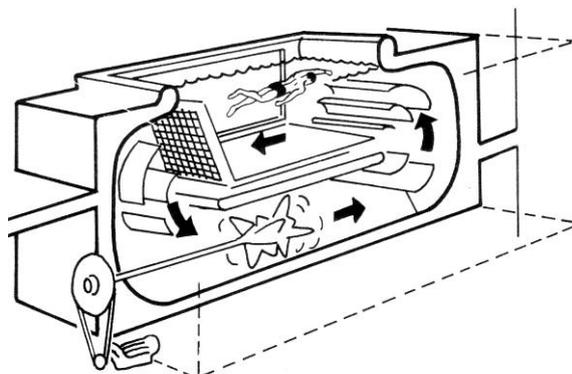


Figura 45: esquema de la primera piscina con canal de agua (Astrand y Englesson, 1972).

2.13. Finlandia

El Departamento de Biología de la Actividad Física de la Universidad de Jyväskylä es uno de los más reputados a nivel internacional. De entre sus investigadores, Kari Keskinen es quien más ha investigado en el ámbito de la Natación, en ocasiones junto a Paavo komi, Keijo Häkkinen y Antti Mero. Sus estudios abarcan tanto aspectos biomecánicos, como fisiológicos y de rendimiento deportivo. En cuanto al ámbito fisiológico es de destacar su colaboración con Ferran Rodríguez del I.N.E.F. de Barcelona.

En 1985 realizó el primer estudio que sincronizaba la señal de fuerza registrada con la célula de carga durante el nado atado y la filmación subacuática de los movimientos de los miembros superiores. El test duraba diez segundos, y registró máximos de fuerza de 125 N. Encontró que los mejores nadadores no eran los que registraban la máxima fuerza durante el nado atado y que en este tipo de nado, los nadadores mejor equilibrados se caracterizaban por aplicar mayores fuerzas en la fase de “tirón” que en la de “empuje”. Al comparar con el nado libre (10 segundos a máxima velocidad), encontró lo contrario, es decir, que los nadadores bien equilibrados (definidos como aquellos que presentan menores fluctuaciones en la velocidad intraciclo) alcanzaban mayores velocidades en la fase de “empuje” que en la fase de “tirón” (Keskinen, 1994).

2.14. Suecia

Como se indicó en el apartado 2.1., en 1970 Magel inició los estudios sobre Natación atada. Sin embargo, la transferencia a la natación “real” de dichos estudios fueron cuestionados. Uno de los argumentos se basaba en que los máximos de fuerza registrados para los cuatro estilos eran inversamente proporcionales a su velocidad

de nado real: braza = 10'8 kg., espalda =8'6 kg, mariposa =8'0 kg y crol = 7'8 kg. Con el objeto de poder realizar estudios válidos sobre variables tanto de carácter biomecánico como fisiológico, Per Olof Astrand (considerado el padre de la fisiología del ejercicio en Europa), diseñó la primera piscina con canal de agua en 1968 (Astrand y Englesson, 1972). La principal ventaja de este tipo de piscinas (figura 45), es que permite grabar e instrumentar al nadador con un equipamiento fijo, lo cual facilita mucho las posibilidades de análisis de múltiples variables. Holmer y Haglund (1977) explicaron que si el flujo es laminar, la técnica es idéntica.

2.15. España

Fernando Navarro, actualmente jubilado, está considerado como el padre de la investigación científica en Natación en España y sus innumerables trabajos han abarcado todas las facetas de la Natación. Su influencia ha sido decisiva en todos los que nos hemos dedicado a la Natación en este país.

En los **Centros de Alto Rendimiento** se realiza investigación eminentemente aplicada y desarrollan instrumental para las necesidades que les solicitan los entrenadores del centro. Así, en el CAR de Sant Cugat del Vallés (Barcelona), destacan **Xavier Balius y Carles Torró** y en el CAR de Sierra Nevada **Blanca de la Lafuente**.

Raúl Arellano, de la Universidad de Granada, es una referencia en aspectos relacionados con la técnica y la biomecánica. En 1990 participó en el Sexto Simposium Internacional de Biomecánica y Medicina en Natación celebrado en Liverpool, y desde entonces no ha faltado a ninguno de ellos. Asimismo, en 1994 fue el primer autor español en publicar un artículo de Natación en una revista de impacto internacional, concretamente en el *Journal of Sport Sciences*.

En los últimos años cabe destacar las aportaciones de jóvenes como **Santiago Veiga**, actualmente en la FCAFD-INEF de Madrid o **Germán Díaz** en la Universidad Europea de Madrid,

En la **Universidad de Valencia** iniciamos estudios en Natación atada, y fuimos diversificándolos gracias a la adquisición de diversos instrumentales, de manera que actualmente analizamos aspectos tan diversos como (1) la relación técnica de nado-velocidad intraciclo utilizando un cable-velocímetro, (2) las salidas, mediante una plataforma dinamométrica sincronizada a cámaras de vídeo (tanto en superficie como subacuáticas), (3) resistencia hidrodinámica mediante un sistema de análisis de arrastre, (4) los efectos que los subproductos debidos a la desinfección en piscinas tienen sobre el organismos de los nadadores (Zarzoso, M; Llana, S; Pérez-Soriano, P. 2010), (5) desarrollo de sistemas de cronometraje específicos para la Natación (Pérez, P; S Llana, G Brizuela and A Encarnación, 2009), que permiten al

nadador visualizar los tiempos de paso, número de largos (figura 46), y emitir texto al nadador. La mayoría de estas investigaciones puede verse en la página web del grupo: <http://www.uv.es/gibd>.

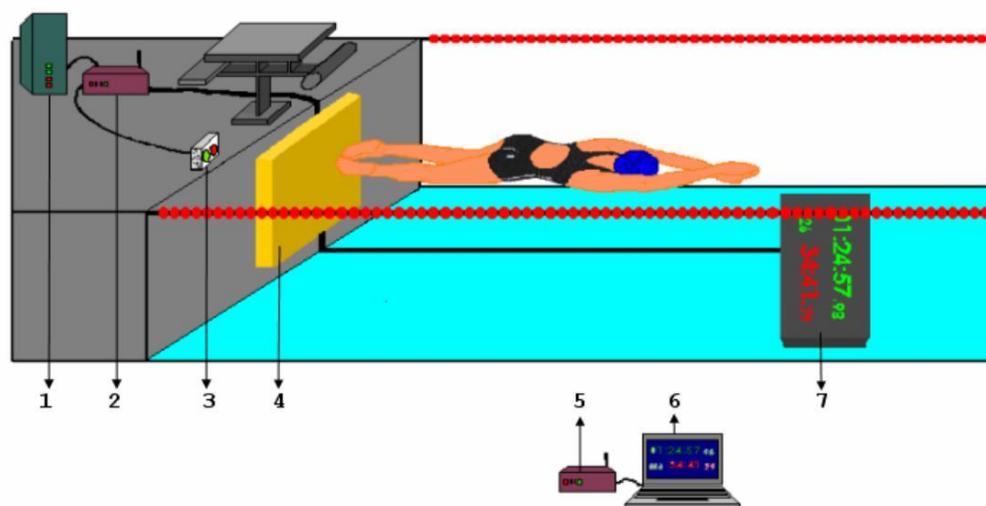


Figura 46: esquema del sistema de cronometraje “swimtimer”: (1) fuente de alimentación, (2) sistema emisor telemétrico, (3) botonera para activar el sistema, (4) plataforma de contacto, (5) sistema receptor telemétrico, (6) PC para almacenar los tiempos y (7) pantalla subacuática (Llana, Pérez, Zahonero, García y Sanchis, 2003).

3. Referencias

- Alley, L.E. (1952) An analysis of water resistance and propulsion in swimming the crawl stroke. *Res.Quart.* 23, 253-270.
- Amar, J. (1920) *The human motor*. Ed. Dutton.
- Armsbruster, D.A. (1942) *Competitive swimming and diving*. Ed. Mosby.
- Astrand, P.O. y Engleson, S. (1972) A swimming flume. *J. appl. Physiol.*, 33, 514-518.
- Benjanuvatra, N., Dawson, G., Blanksby, B.A. y Elliot B.C. (2001) Comparison of buoyancy, passive and net active drag forces between fastskin and standard swimsuits. *J. Sci. Med.* 5. 115-123.
- Bixler, B. y Riewlad, s. (2002) Analysis of a swimmer's hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics. *J. Biomech.* 35. (5) 713-717.
- Bixler, B. y Schloder, M. (1996) Computatinal fluid dinamics: an analytical tool for the 21st century swimming scientist.*J. Swimming Res.* 11.4-22.
- Brizuela, G., Llana, S. y Tella, V. (1999) Medición de la fuerza de propulsión durante el nado. Cálculo de variables biomecánicas. En *Biomecánica de la fuerza muscular y su valoración. Análisis cinético de la marcha, natación, gimnasia rítmica, badminton y ejercicios de musculación*. Ed. Ministerio de Educación y Deportes. C.S.D.
- Carlile, F. (1956a) Effect of preliminary warming up on swimming performance.*Res. Quart.*, 27 (2), 143-151.
- Carlile, F. (1963) *Forbis Carlile on swimming*. Ed. Pelham.
- Chatard, J.C., Bourgion, B. y Lacourt, J.R. (1990) Passive drag is still a good evaluator of swimming aptitude. *Eur. J. App. Phys.* 59, 399-404.
- Chollet, D., Chalties, S. y Chatard, J.C. (2000) A new index of coordination for the crawl: description and suefullness. *Int. J. sport. Med.*, 21, 54-59.
- Clarys, J.P. (1978) Human morphology and hidrodinamics. En: Terauds y Bedingfield (Eds.) *Bimechanics IV*, pp.187-196. University Park Press.
- Clarys, J.P., Jiskoot, J. (1975) Total resistance in water and its relation to body form. En Nelson, Morehouse, (Eds) *Biomechanics*, vol. 4 Baltimore. Univrsity Park Press. 187-196.
- Colwin, C. (1984a) Fluid dynamics: vortex circulation in swimming propulsion.En Welsh (Ed.) *American Swimming Coaches Association world clinic yerabool* 1994.38-46.
- Colwin, C. (1985a) Essential fluid dynamics of swimming propulsion. *American Swimming Coaches Association Magazine.* 22-27.
- Colwin, C. (1985b) Practical applicaion of flow analysis as a coaching tool.*American Swimming Coaches Association Magazine.*5-8.

- Colwin, C.M. (1993) *Swimming into the 21st Century*. Human Kinetics Publishers.
- Colwin, C.M. (1999) *Swimming Dynamics. Winning Techniques and Strategies*. Master Press.
- Colwin, C.M. (2002) *Breakthrough Swimming*. Human Kinetics.
- Counsilman, J (1955). Forces in swimming two types of crawl stroke. *Res. Quart.* 26: 127-139.
- Counsilman, J. y Counsilman, B. (1994) *The new science of swimming*. Ed. Prince Hall.
- Cureton, T. K. (1951). *Physical Fitness of Champion Athletes*. University of Illinois Press.
- Cureton, T. K., & Kasch, F. W. (1947). *Physical Fitness Appraisal and Guidance*. C.V. Mosby.
- Deberle, J., Lefevre, T., Depretz, S., Sydney, M. y Pélayo, P. (2003) Stroke length drops from the maximal lactate steady state speed. En Chatard (Ed.) *Biomechanics and Medicine in swimming IX*. 325-330.
- Du Bois-Reymond, R. (1905) Zur physiologie des schwimmens. *Arch. Anat. Physiol.* 29, 252-278.
- Firby, H. (1975) *Howard Firby on swimming*. Ed. Pelham Books.
- Hay, J., y Thayer, A. (1989) Flow visualization of competitive swimming techniques : the tufts method. *J. Biomechanics*, 22 (1) 11-19.
- Holmer, I. y Haglund, S. (1977) The swimming flume: experiences and applications. En Eriilsson y Furberg (Eds) *Swimming Science IV*. 379-385.
- Karpovich, P.V. (1933) Water resistance in swimming. *Res. Quart.*, 4: 21-28.
- Kent, M., Atha, J. (1971) Selected critical transient body positions in breast-stroke and their influence upon water resistance. En Lewillie 6 Clarys (Eds.) *Biomechanics in swimming I*.
- Keskinen, K. (1994) Measurement of technique in front crawl . En Miyashita, Mutoh y Richardson (Eds) *Medicine and Science in Aquatic Sport*, 117-121.
- Kiphuth (1942) *Swimming* Ed. Barnes.
- Kolmogorov, S.V.; Duplisheva, A. (1992) Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *J. Biomech.* 25: 311-318.
- Lauder, M.A., Dabnichki, P. y Bartlett, R.M. (2001) Improved accuracy and reliability of sweepback angle, pitch angle and hand velocity calculations in swimming. *J. Biomechanics*. 34, 31-99.
- Lauder, M. A., Dabnichki, P., & Bartlett, R. M. (2001). Improved accuracy and reliability of sweepback angle, pitch angle and hand velocity calculations in swimming. *Journal of Biomechanics*, 34(1), 31–39.

- Llana, S. (2002) Resistencia hidrodinámica en Natación. *Rendimientodeportivo.com*, nº2.
- Llana, S.; Klauck, J. (2002) Bañadores tradicionales vs bañadores de última generación: efecto sobre la resistencia pasiva. *Comunicaciones Técnicas*, nº4, pp: 53-58.
- Llana, S., Pérez-Soriano, P. y Aparicio I. (2011). Historia de la Natación I: desde sus orígenes hasta la Edad Media. *Citius, Altius, Forius*, vol. 4, nº2, pp 51-84.
- Llana, S., Pérez-Soriano, P., del Valle A. y Sala P. (2012). Historia de la Natación II: desde el Renacimiento hasta la aparición y consolidación de los actuales estilos de competición. *Citius, Altius, Forius*, vol. 5, nº1, pp 9-44.
- Lyttle, A.D.; Blanksby, B.A.; Elliot, B.C.; Lloyd, D.G. (1998) The effect of depth and velocity on drag during the streamlined glide. *J. Swim. Res.* 13: 15-22.
- Magel, J.R. (1970) Propelling force measured during tethered swimming in the four competitive swimming styles. *Res. Quart.* 41, 68-74.
- Maglischo, E.W. (2003) *Swimming fastest*. Ed. Human Kinetics.
- Mason, B. (2002) A comprehensive biomechanical support service to an elite national swimming programme. *Applied proceedings. I.S.B.S.* '02.
- Mason, B. Cossor, J. (1998) What can we learn from competition analysis at the Pan Pacific Swimming Championships? En Sanders y Hong (Eds.) *Application of biomechanical study in swimming. I.S.B.S.* '00.
- Mason, B. y Cossor, J. (2000) Swim turn performances at the Sydney 2000 Olympic Games. En Blackwelly Sanders (Eds) *Proceedings of swim swssions. I.S.B.S.* '01.
- Miller, D. (1975) Biomechanics of swimming. En: Willmore y Keogh (Eds.) *Exercise and Sport Sciences Reviews*. New York: Academic Press.
- Miyashita, M. (1981) The factors governing competitive swimming records. *International Journal of Physical Education*, 18 (3): 15-19.
- Miyashita, M. (1997) *The bio-physics of swimming -three decades of research-* University of Tokio.
- Miyashita, M.; Tsunoda, T. (1978) Water resistance in relation to body size. En: Eriksson y Furberg (Eds.), *Swimming Medicine IV*, pp.395-401. University Park Press. Baltimore.
- Pérez, P; S Llana, G Brizuela and A Encarnación (2009). Effects of three feedback conditions on aerobic swim speeds. *Journal of Sports Science and Medicine*. 8 (1):1-7.
- Reischle, K. (1992) *Biomecánica de la natación*. Ed. Gymnos.
- Sachs, F. (1912) *The complete swimmer*. London: Methuen.
- Schleihauf, F. (1977). A biomechanical analysis of freestyle aquatic skill. *Counsilmanj.—Competitive manual swimming, Engle wood Cliffs*.

- Schleihau, R. E. (1979). A hydrodynamic analysis of swimming propulsion. *Swimming III*, 70–109.
- Silvia, C. E. (1970). *Manual and Lesson Plans for Basic Swimming, Life Saving, Water Stunts, Springboard Diving, Skin and Scuba Diving and Methods of Teaching*.
- Stager, J. M., & Tanner, D. A. (2005). *Swimming: ; An International Olympic Committee Publication*. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Sullivan, F. (1922) Science of swimming. Containing Instructions for Acquiring all Swimming Strokes, and Directions for Becoming Proficient in Fancy With a Symposium on the Best Stroke for Beginners, Modern Methods of Life Saving and Resuscitation. American Sports Publ. Co.
- Takagi, H. y Wilson, B. (1999) Calculating hydrodynamic force by using pressure difference in swimming. En Keskinen, Komi y Hollander (Eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*.
- Thorp, R., & Wilson, B. (2002). Active drag at low swimming velocities. In *ISBS-Conference Proceedings Archive* (Vol. 1). Retrieved from <https://ojs.uib.uni-konstanz.de/cpa/article/view/709>
- Thrall, W.R. (1960) A performance analysis of the propulsive forces of the flutter kick. Tesis Doctoral. Universidad de Iowa.
- Toussaint, H., Stralen, M. y Stevens, E. (2002) Wave drag in front crawl swimming. En Gianikelis (Ed.) *Proceedings of I.S.B.S.'02*.
- Toussaint, H.M. (2002) The Fast-Skin™ "Body" suit: hip, hype, but does it reduce drag during front crawl swimming? *Applied Proceedings - Swimming- del XXth International Symposium on Biomechanics in Sport*.
- Toussaint, H.M., Groot, G., Savelberg, H., Vervoorn, K., Hollander, A.P. y Ingen Schenau, G.J. (1988) Active drag related to velocity in male and female swimmers. *J. Biomech.* 21: 435-438.
- Vorontsov, A. y Rumyantsev, V. (2000) Resistive forces in swimming. En Zatsiorsky Ed.) *Biomechanics in Sport*. Blackwell Scientific.
- Wilke, K. (1992) El entrenamiento del nadador juvenil. Ed. Estadium.
- Wilson, B., Takagi, H., y Pease, D. (1999) Technique comparison of pool and flume swimming. En Keskinen, Komi y Hollander (Eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*.
- Zatsiorsky, V. M., Bulgakova, N. Z., & Chaplinsky, N. M. (1979). Biomechanical analysis of starting techniques in swimming. *Swimming III*, 199–206.
- Zarzoso, M; Llana, S; Pérez- Soriano, P. (2010). Potential negative effects of chlorinated swimming pool attendance on health of swimmers and associated staff. *Biology of Sport*, 7(4); 233-240.