

VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Facultat de Ciències de l'Activitat Física i de l'Esport



“ANÁLISIS 3D DE LA ACCELERACIÓN EN CROL EN EL DOMINIO TEMPORAL Y FRECUENCIAL”

TRABAJO FIN DE MASTER

PRESENTADA POR:

José Antonio Pérez Ramirez

TUTORES:

Dr. D. Víctor Tella Muñoz

Dr. D. Joaquín Madera Gil

Valencia, 2012

ÍNDICE:

JUSTIFICACIÓN	3
ANTECEDENTES PREVIOS	7
Estilo crol y acciones propulsivas.....	9
Estilo crol y aceleración.....	12
Estilo crol y análisis de la aceleración con la velocidad	16
Estilo crol, parámetros cinemáticos y diferencias en función del género	17
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	19
MATERIAL Y MÉTODOS	23
1- Diseño	25
2- Muestra.....	25
3- Procedimiento general	26
4- Material empleado	27
5- Recogida de datos básicos, mediciones antropométricas y protocolo	27
6- Procedimiento de toma de datos cinemáticos.....	28
7- Análisis de datos	29
7.1. Selección de la zona de interés.....	29
7.2. Filmación, velocidad de nado y frecuencia de ciclo.....	29
8. Análisis estadístico	30
RESULTADOS	33
DISCUSIÓN	39
Sobre la muestra	41
Sobre la metodología.....	42
Sobre los resultados.....	42
CONCLUSIONES.....	47
LIMITACIONES, APLICACIONES Y POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	51
BIBLIOGRAFÍA.....	55

JUSTIFICACIÓN

El trabajo de fin de Máster que presento para su evaluación, tiene las siguientes justificaciones:

- Ligadas a que existe una línea de investigación abierta por profesores del Departamento de Educación Física y el Deporte de la Universidad de Valencia con respecto al análisis de la aceleración durante el nado, que busca mejorar, tanto el rendimiento en nadadores, como una mayor eficiencia durante el nado, mediante el análisis de variables temporales como frecuenciales del mismo.
- A mi interés por el Análisis Biomecánico de las técnicas deportivas, iniciado este interés durante mis estudios en la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte en la Universidad de Granada, en varias asignaturas dirigidas por, entre otros Raúl Arellano y Víctor Soto, me mostraron cómo la biomecánica puede afectar a nuestra vida cotidiana, vida saludable y vida deportiva.
- A que la propuesta de trabajo que se me realizó, por parte del profesor Víctor Tella me permitía conocer las partes de un trabajo de investigación y poner en práctica conocimientos y recursos adquiridos durante la fase lectiva del Máster, para la realización de mi propio trabajo de investigación.
- A que el propio trabajo de investigación me permitía ahondar en cuestiones relacionadas con la natación que desconocía antes de iniciar este documento y por el contrario me entusiasmaban, y ampliar mis conocimientos sobre dicha actividad deportiva.
- A que esta línea de investigación permite aunar los avances tecnológicos con el avance científico para mejorar el conocimiento en el ámbito de la natación, en cualquier aspecto y no solo en el ámbito de rendimiento, aspecto tecnológico que siempre me ha ilusionado.

ANTECEDENTES PREVIOS

El nado a crol en natación es el utilizado generalmente en las pruebas de estilo libre. En este estilo no se delimitan los movimientos ni su coordinación, al contrario que en el resto de estilos (braza, espalda, mariposa) que requieren de una propia coordinación o posición para efectuarse correctamente según la normativa vigente (FINA, 2012). En este trabajo se pretende indagar sobre el efecto de las acciones propulsivas que se realizan en el estilo crol, principalmente en las aceleraciones que se producen en el cuerpo del nadador durante la fase de nado.

Estilo crol y acciones propulsivas

Desde la década de los sesenta, diferentes autores (Costill, Maglischo, & Richardson, 1992; Counsilman, 1968; Counsilman, 1983; E. W. Maglischo, 1982; E. W. Maglischo, 1993; E. W. Maglischo, 2003) han analizado las acciones propulsivas que se efectúan durante el nado y su adecuada coordinación para alcanzar un mejor rendimiento en cada una de las pruebas y estilos. Generalmente, los estudios se han centrado en:

- Acción de brazos y su coordinación
- Acción de piernas y su coordinación
- Posición del cuerpo y su coordinación

En crol, los brazos efectúan movimientos de manera alterna y se distinguen dos grandes fases: aérea o recobro y acuática o propulsiva (C. W. Maglischo, Maglischo, Sharp, Zier, & Katz, 1984).

Para hacer referencia al movimiento de los brazos durante la fase acuática del nado Maglischo (2003) utiliza el término *sweep*, mientras que Colwin (1992) hace uso de *sculling*.

Así los principales autores distinguen 3 movimientos propulsivos durante la trayectoria de la mano en el agua o fase acuática. Maglischo (2003) los denomina movimiento hacia abajo (*downsweep*), hacia dentro (*insweep*) y hacia arriba (*upsweep*) mientras que Chollet (2004) utiliza los términos agarre (*catch*), tirón (*pull*) y empuje (*push*).

En cada movimiento propulsivo la acción de la mano irá acelerando al principio y decelerando al final para preparar el siguiente movimiento propulsivo (E. W. Maglischo, 2003) y así optimizar las fuerzas propulsivas que puedan generarse en función de la velocidad, posición y tiempo de cada uno de los movimientos propulsivos (Bixler, 2005). La coordinación entre las diferentes acciones propulsivas de los brazos determina además cómo coinciden en el tiempo las diferentes fases y sus movimientos propulsivos. De manera cualitativa, la descripción de estas coordinaciones ha sido estudiada tomando distintas referencias.

Maglischo (2003) y Costill (1992) han determinado que existen tres tipos de coordinación:

- a) coordinación en recuperación o con “tiempo muerto”: mientras un brazo está en la fase de agarre el otro se encuentra en la de empuje

b) coordinación en oposición: en la que los brazos se “alternan” en las acciones de propulsión.

c) coordinación en solapamiento: las acciones finales de propulsión de un brazo coinciden con las acciones iniciales de propulsión del otro brazo.

En otro estudio, Chollet, Chalies y Chatard (2000) analizan la coordinación brazo/brazo en crol cuantificando el tiempo medio transcurrido desde el inicio de la acción hacia abajo de un brazo y la finalización de la acción hacia arriba del otro y viceversa, con los siguientes resultados posibles, respecto a las acciones propulsivas de los brazos: a) si el índice de coordinación (IdC) es igual al 0% se llama coordinación coincidente, b) si el IdC es menor al 0% la coordinación se dice que es en oposición y, c) si el IdC es mayor al 0% la coordinación será de superposición (tabla 1).

Tabla 1. Descripción y valores de los índices de coordinación brazo/brazo (IdC) en crol. (Chollet et al., 2000)

IdC	COORDINACIÓN	DESCRIPCIÓN	
IdC=0	Oposición	Las acciones propulsivas de un brazo terminan cuando empiezan las del otro	
IdC>0	Superposición	Las acciones propulsivas de un brazo terminan cuando las del otro ya han comenzado	
IdC<0	Catch-up o punto muerto	Las acciones propulsivas de un brazo terminan sin que las del otro hayan comenzado (time-lag)	

Las acciones de piernas (batida) por ciclo completo de nado y su coordinación con respecto a las acciones propulsivas de los brazos también ha sido estudiadas por diferentes autores. Las piernas realizan batidos alternados (Chollet, 2004) en los que mientras una se mueve hacia abajo (fase descendente) la otra realiza un movimiento hacia arriba (fase ascendente). Por cada ciclo de nado los nadadores realizan seis, cuatro o dos batidos completos con las piernas (fase ascendente y fase descendente), en función de sus características antropométricas y fisiológicas, la distancia de la prueba, el nivel de fatiga, etc. Aún así, se considera que la aportación de las extremidades superiores en el crol es superior a la de las piernas (Adrian, Singh, & Karpovich, 1966); entre un 70 a un 85% de la propulsión total (Faulkner, 1968).

Las acciones propulsivas del nadador se acompañan de giros (rolidos) que se realizan sobre el eje longitudinal del cuerpo. Los rolidos llevan consigo giro de hombros y de caderas, además de facilitar la acción acuática y aérea de los brazos, evitando aumentar demasiado la resistencia de forma. Pero existen aún diferentes teorías sobre la posición hidrodinámica más idónea durante las acciones propulsivas de los segmentos corporales, y sobre un correcto rolido que facilite la correcta aplicación de fuerzas propulsivas (Hay, Liu, & Andrews, 1993).

Los movimientos de rotación que se realizan por parte de la cabeza para respirar acompañan al rolido del cuerpo y de los brazos, cuyo ritmo de respiración varía en función de cada nadador, el ritmo más básico es respirar cada ciclo completo de brazos, es decir después de una acción con un brazo y otra con el contrario, pero existe la posibilidad de respirar cada 1,5, 2 o 2,5 ciclos completos de brazos. Según diversos autores (Payton, Bartlett, & Baltzopoulos, 1999; Payton, Bartlett, Baltzopoulos, & Coombs, 1999) en el momento de girar la cabeza para respirar, el rolido del cuerpo aumenta. Otros autores cuantifican este incremento entre 9° y 10° (López, Gutiérrez, & Arellano, 2002).

Así las acciones de brazos y piernas, los cambios de posición del cuerpo y sus coordinaciones tendrán como resultado una serie de movimientos propulsivos que determinarán la eficacia durante el nado.

En la tabla 2 se muestra un ejemplo de coordinación temporal de los movimientos de propulsión de brazos y piernas en el nado a crol en el que se distinguen tres acciones propulsivas por brazada. Estos 3 momentos propulsivos son:

- El primer momento corresponde a la acción de propulsión del movimiento arriba del brazo izquierdo y el batido abajo de la pierna derecha de forma, ambas de forma simultánea, con una posición de escasa resistencia durante la fase de entrada y deslizamiento.
- El segundo momento describe el movimiento hacia abajo de la mano derecha que coincide con el batido debajo de la pierna izquierda, mientras el brazo izquierdo está en la fase de descarga e inicio del recobro.
- El tercer momento de propulsión describe el movimiento hacia dentro del brazo derecho al mismo tiempo que se realiza el batido hacia abajo de la pierna derecha mientras que el brazo izquierdo efectúa el recobro.

Teniendo en cuenta que lo descrito se refiere a un solo brazo, el total de acciones propulsivas durante un ciclo completo sería de seis, al completarse la secuencia con los momentos coordinados de las acciones inversas entre brazos y piernas.

Tabla 2. Relación de los movimientos de los brazos y de las piernas en el estilo crol

Brazo derecho	Brazo izquierdo	Pierna derecha	Pierna izquierda
Entrada y estiramiento	Movimiento hacia arriba	Batido abajo	Batido arriba
Movimiento hacia abajo	Inicio recobro	Batido arriba	Batido abajo
Movimiento hacia dentro	Recobro	Batido abajo	Batido arriba

Estilo crol y aceleración

Se podría definir la aceleración como la variación de velocidad con respecto al tiempo, tratándose además, de una magnitud vectorial (Gutiérrez, 1999).

Durante la fase de nado se producen aceleraciones y desaceleraciones como resultado de las acciones propulsivas del nadador y de su frecuencia tal como indicaba Holmér (1979), y de las fuerzas de resistencia (Ungerechts, 1988). El carácter tridimensional del desplazamiento de los segmentos del nadador determinará las aceleraciones que se producen durante el nado (Bixler, 2005) como resultado de las fuerzas de propulsión y de resistencia que generan (Miller, 1975).

Las aceleraciones y desaceleraciones durante el nado están producidas por los movimientos de los segmentos corporales del nadador y la diferente aplicación de fuerzas sobre el agua, tanto temporal como frecuencial. El análisis de la relación entre la aceleración del nadador con el tiempo muestra información sobre la forma en la que los diferentes movimientos contribuyen a los cambios en la velocidad (Holmér, 1979).

Durante el nado, desde que un impulso acaba hasta que comienza el siguiente, el cuerpo del nadador sufre una desaceleración debido a las fuerzas de resistencia hidrodinámica, necesitando volver a acelerar su masa (Vilas-Boas, 1997). El nado implica grandes aceleraciones y deceleraciones y los patrones de movimiento y las velocidades resultantes son muy diferentes de un estilo a otro (Craig, Termin, & Pendergast, 2006).

La aceleración intraciclo durante el nado es la suma resultante de las fuerzas propulsivas y de frenado, y se puede considerar como la base de la velocidad de nado (Ungerechts, 1988). Las acciones de los segmentos corporales son fácilmente identificables con las correspondientes curvas de los datos obtenidos (Holmér, 1979), y ofrecen información importante de la biomecánica del ciclo de nado (figura 1).

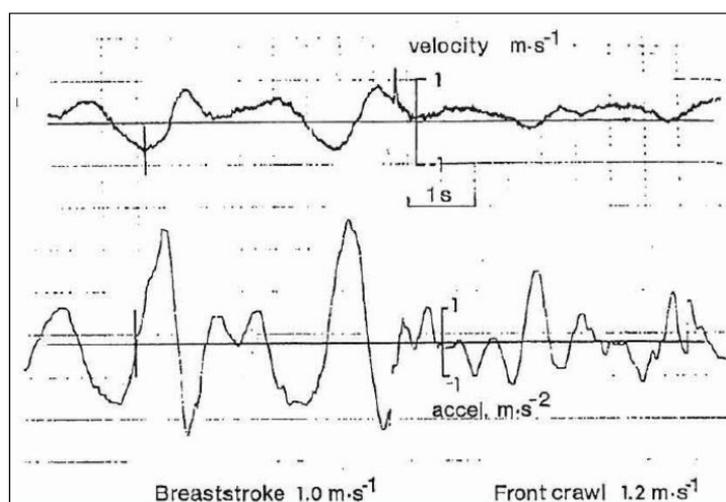


Figura 1: Curvas de velocidad (arriba) y aceleración (abajo) de un nadador en braza y crol (Holmér, 1979)

El centro de masas es el punto del cuerpo del nadador en el que se representan las aceleraciones y desaceleraciones resultantes que actúan durante el nado (Fernandes, Ribeiro,

Figueiredo, Seifert, & Vilas-Boas, 2012). Sin embargo, los puntos de referencia utilizados para el análisis del nado han diferido en función de la metodología utilizada. La cadera, punto de referencia utilizado por Maglischo et al. (1987), Craig et al. (2006) y Schnitzler, Seifert, Alberty y Chollet (2010); un punto próximo entre la cintura y la zona lumbar utilizado por Holmér (1979), Tella et al. (Tella et al., 2008) y Slawson, Justham, West, Conway, Caine y Harrison (Slawson et al., 2008) (figura 2); y el centro de masas 2D y 3D utilizado por Barbosa et al. (Barbosa, Fernandes, Keskinen, & Vilas-Boas, 2008) y Psycharakis y Sanders. (Psycharakis, Naemi, Connaboy, McCabe, & Sanders, 2010) han sido los que se han utilizado más frecuentemente.

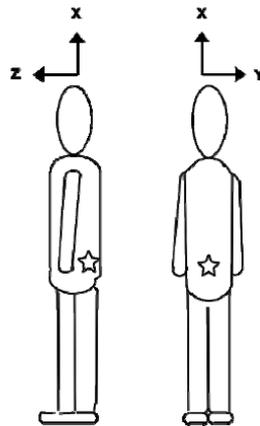


Figura 2. Colocación del acelerómetro y ejes de movimiento de Slawson et al. (2008).

Recientes estudios (Psycharakis & Sanders, 2009) muestran que el movimiento de la cadera (figura 3) no debería usarse como punto de referencia para analizar los cambios que se producen durante el nado de crol en 3D. Entre otros aspectos, la rotación de la cadera y los efectos inerciales son las causas por lo que este punto del cuerpo dista de los valores que se obtienen con respecto al centro de masas. Sin embargo Fernandes et al.(2012) sugieren que al comparar los datos de velocidad de la cadera con los del centro de masas cuando el análisis del nado se realiza en 2D, ambos puntos de referencia presentan unos registros similares (figura 4). Así pues, el análisis de datos obtenidos de la cadera como punto de referencia del desplazamiento del nadador debería limitarse a estudios en 2D.

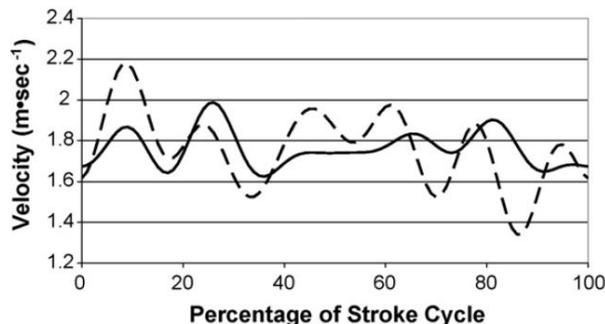


Figura 3. Velocidad horizontal intraciclo medida en la cadera (línea discontinua) y en el centro de masas (línea continua) en un análisis 3D.(Psycharakis & Sanders, 2009).

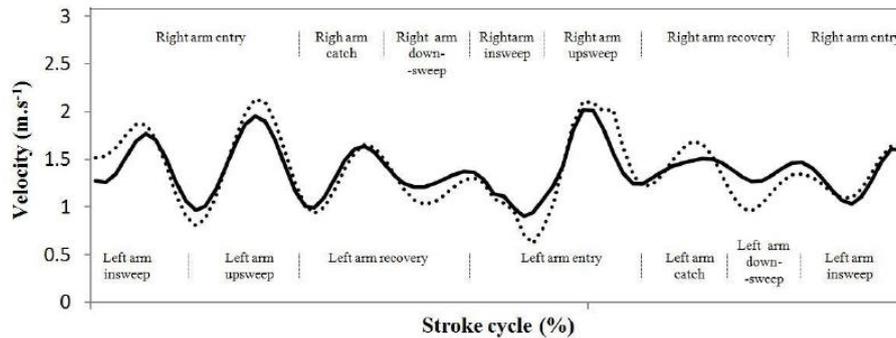


Figura 4. Velocidad horizontal intraciclo de la cadera y del centro de masas en un análisis 2D (Fernandes et al., 2012).

El registro de la aceleración durante el nado se ha realizado a través de uno o varios acelerómetros (Holmér, 1979; Ichikawa, Yuji, Miyaji, & Nomura, 2003; Ohgi & Ichikawa, 2002; Ohgi, Yasumura, Ichikawa, & Miyaji, 2002; Rouboa, Silva, Leal, Rocha, & Alves, 2006; Wright, Hinman, & Stager, 2010) o mediante la derivación de los datos de velocidad obtenidos con filmación o velocímetro (Leblanc, Seifert, Tourny-Chollet, & Chollet, 2007; Madera et al., 2010; Madera, 2012; Tella et al., 2008).

El uso de sensores inerciales para estudios biomecánicos en cualquier ámbito científico se ha universalizado en poco tiempo, debido a los avances técnicos y al uso de aparataje más complejo, capaz de utilizarse en condiciones muy extremas, para su análisis en actividades físicas (Mathie, Coster, Lovell, & Celler, 2004; Menz, Lord, & Fitzpatrick, 2003; Pelham, Robinson, & Holt, 2006; Tan, Wilson, & Lowe, 2008) como en el medio acuático en estudios donde se analiza la aceleración del nadador en la dirección del desplazamiento (Buchner & Reischle, 2003; Madera et al., 2010; Tella et al., 2008), o estudios donde se analizan las tres direcciones movimiento (Slawson et al., 2008; Tella et al., 2010; Vannozzi, Donati, Gatta, & Cappozzo, 2010).

Lee, Burkett, Thiel y James (2011) muestran la validez de los sensores inerciales con respecto a los registros obtenidos mediante fotogrametría 2D y 3D para los análisis de los movimientos de brazos crol. Por el contrario, no hemos encontrado trabajos que validen el uso de estos sensores cuando se colocan en un punto próximo al centro de masas como puede ser la zona lumbar utilizada por Holmér (1979) y Tella et al. (2010) para el análisis del desplazamiento del nadador.

Los principales parámetros obtenidos en los diferentes estudios que han analizado la aceleración del desplazamiento del nadador son (figura 5):

- RMS (root mean square o valor eficaz de la aceleración). Holmér (1979) lo considera un indicador de la economía de nado.
- El valor máximo (Max) y mínimo (Min) de la aceleración.
- El pico de potencia (PP) o valor más alto del espectro de potencia.
- La frecuencia del PP (PPF) o frecuencia asociada con el PP.

- La potencia contenida en el área espectral (SA), que es la potencia total del espectro total

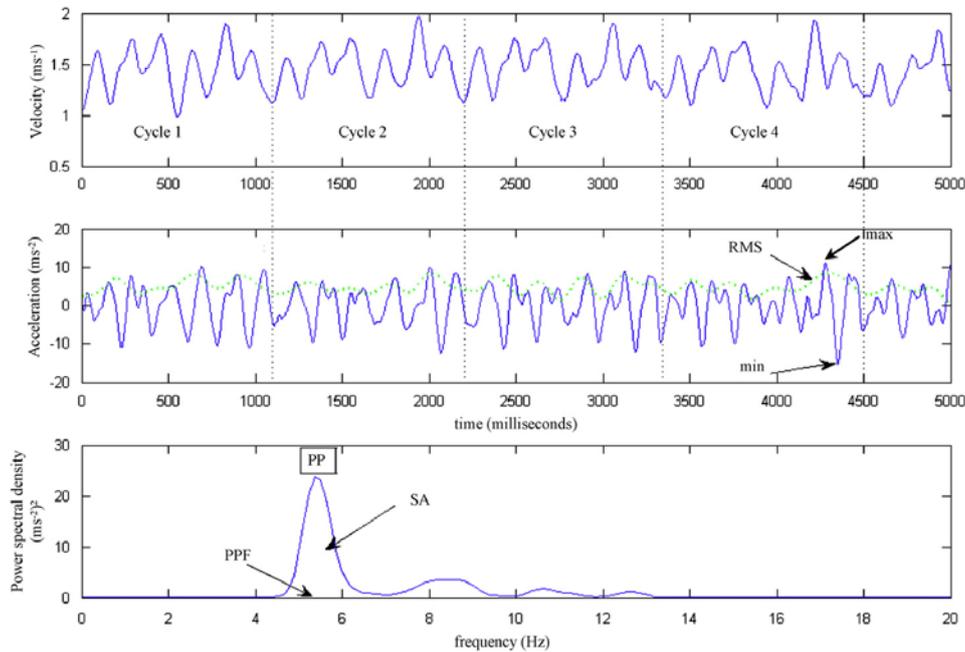


Figura 5: Ejemplo de la señal de la aceleración de un sujeto, donde se puede apreciar la RMS, Max y Min de la señal. Muestra de análisis efectuado en la señal de posición al relación al tiempo. La gráfica superior representa la velocidad intraciclo de nado. La gráfica central representa un ejemplo de cambios intraciclo con respecto a la aceleración. La gráfica inferior, muestra el análisis frecuencial de la aceleración, donde se observan el pico de potencia (PP), frecuencia del pico de potencia (PPF) y área bajo la curva del espectro o área espectral (SA) (Tella et al., 2008).

Asimismo se han analizado diferentes tipos de espectro frecuencial en función del número de picos que presentaban. Tella et al. (2008) los clasifica en tres tipos para el nado crol (figura 6) y Madera (2012) en dos tipos (figura 7). Ambos trabajos los justifican en función de una mayor o menor concentración, a una determinada frecuencia, de las aceleraciones producidas durante el nado.

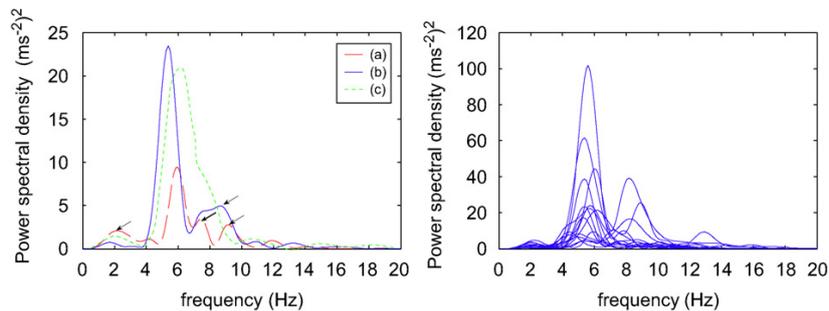


Figura 6: diferentes espectros frecuenciales obtenidos durante el nado sin fatiga. En la parte izquierda se muestran tres tipos diferentes de espectros. Los picos submáximos se han señalado con flechas. En la parte derecha se muestran todos los espectros obtenidos en la prueba (Tella et al., 2008).

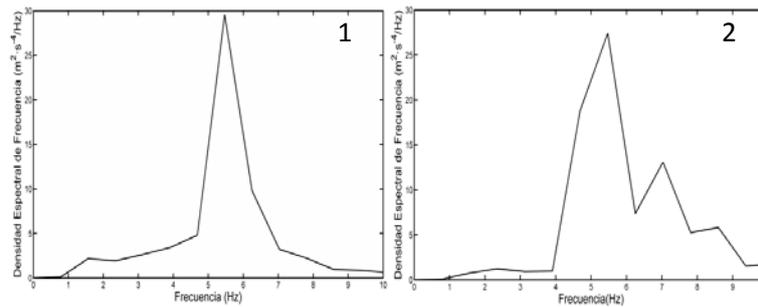


Figura 7: ejemplo de los dos tipos (1 y 2) de espectros frecuenciales encontrados en el estilo crol (Madera, 2012)

En función del ancho de banda utilizado en el filtro para el análisis de la aceleración, los resultados obtenidos han mostrado las aceleraciones cíclicas y/o acíclicas que se producen en el nado. Holmér (1979) optó por el uso de un ancho de banda de 0'25-10 Hz, dando importancia a las aceleraciones que se producen durante el nado de manera cíclica. En el otro lado se encuentran Tella et al. (2008) y Madera et al. (2010) que filtran la señal a partir de un ancho de banda superior a 1Hz, destacando de esta manera las aceleraciones que se producen durante el nado de manera intracíclica. En general, todos estos autores no encuentran aceleraciones relevantes superiores a una frecuencia de 10Hz.

Estilo crol y análisis de la aceleración con la velocidad

Según Holmér (1979), durante un test progresivo de nado en crol, según aumenta la velocidad de nado, se incrementa el valor de la RMS (figura 8). Además otros estudios que analizan la señal de la aceleración en este mismo estilo muestran correlaciones positivas entre la velocidad y la RMS, Max, Min y SA durante el nado en estilo crol (Tella et al., 2008). Además, según Tella et al. (2010) los resultados de la RMS de la aceleración en la dirección de desplazamiento del nadador también obtienen una alta correlación ($r > 0,50$) en un análisis 3D.

En un trabajo reciente que relaciona la velocidad con las variables temporales y frecuenciales, Madera (2012) muestra que las relaciones obtenidas (RMS, Máximo, Mínimo, PP y SA) sólo obtienen valores medios ($r > 0,5$) en una muestra de 51 sujetos (31 hombres y 20 mujeres). En el mismo trabajo, al segmentar a los nadadores en 2 grupos en función del tipo de espectro frecuencial determinan que los nadadores con un único pico principal son más rápidos que los nadadores dos o más picos principales. Además obtienen mayores valores de aceleración en la RMS, el PP y el SA.

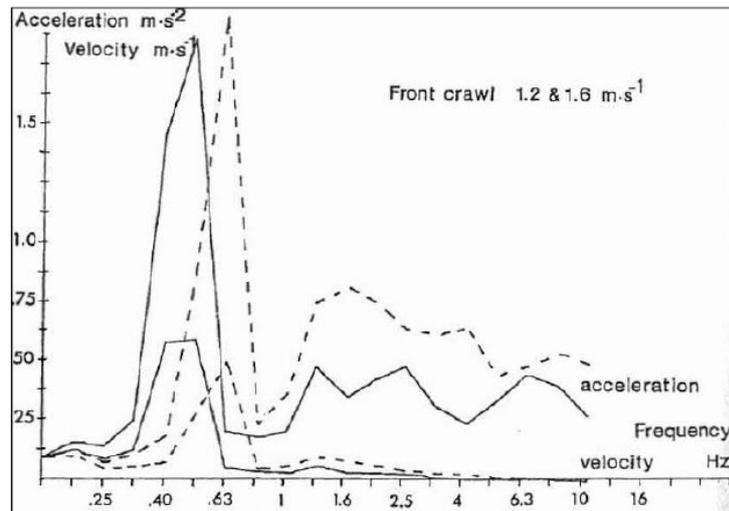


Figura 8: Espectro frecuencial de la aceleración y la velocidad de un nadador durante el nado de crol (Holmér, 1979).

Para Holmér (1979), que analiza el aumento de la velocidad comparándolo con el perfil del espectro frecuencial de la aceleración, indica que un incremento de la velocidad de nado provoca directamente un aumento en el pico principal de la aceleración, tal como se puede observar en la figura 6. Además el incremento de la velocidad de nado estimula a la acción de piernas dando lugar a otro pico de aceleraciones a una frecuencia superior a la de los brazos. Madera et al. 2012 consideran que el pico principal obtenido por Holmér (1979), dada que su frecuencia es inferior a 1 Hz, responde a las aceleraciones que se producen por las acciones cíclicas durante el nado (rolido y acción alternativa de brazos) y que los picos del espectro que se producen a frecuencias superiores responden a las aceleraciones intraciclo generadas, fundamentalmente, por las acciones de brazos y de piernas durante un ciclo completo de nado. Por ello, Tella et al. (2008), Madera et al. (2010) y Madera (2012) realizan un filtrado de los registros de aceleración con anchos de banda superiores a 1Hz con el objetivo de resaltar las frecuencias asociadas a esas aceleraciones intraciclo.

Estilo crol, parámetros cinemáticos y diferencias en función del género

En general, los parámetros cinemáticos cíclicos que determinan la cinemática del desplazamiento del nado en crol son diferentes en función del sexo.

Así los nadadores obtienen FC más altas que las nadadoras aunque sus diferencias no sean siempre significativas (Takagi, Sugimoto, Nishijima, & Wilson, 2004; Zamparo, 2006). En un estudio realizado con nadadores y nadadoras de 100 metros (Morales, 2006) sólo se muestran diferencias significativas en los estilos de espalda y braza.

Algunos estudios han mostrado que las diferencias de la FC entre géneros pueden deberse a las diferencias antropométricas (Chatard, Lavoie, & Lacour, 1991; Grimston & Hay, 1986; Pelayo, Sidney, Kherif, Chollet, & Tourny, 1996).

También los valores de la longitud de ciclo son mayores en las pruebas del sexo masculino en los cuatro estilos de nado (Arellano, Brown, Cappart, & Nelson, 1994; Chengalur & Brown, 1992; Chollet et al., 2000; Kennedy, Brown, Chengalur, & Nelson, 1990; Letzelter & Freitag,

1983; Pai, Hay, Wilson, & Thayer, 1984; Pelayo et al., 1996; Seifert, Chollet, & Bardy, 2004; Sánchez-Molina & Arellano, 2002). Cabe destacar que para el estilo crol esta diferencia puede ser de hasta el 12% (Arellano et al., 1994; Sánchez-Molina & Arellano, 2002).

Con respecto a los parámetros cinemáticos intraciclo los estudios que se han realizado en función del sexo no muestran diferencias importantes en relación a las variaciones de la velocidad. Schnitzler et al. (2008) (Schnitzler et al., 2010) sólo muestran que las nadadoras tienen menor fluctuación de la velocidad intraciclo que los nadadores sobre una distancia de 50 metros en el estilo braza aunque las diferencias no son significativas. Manley y Atha (1992) corroboran estas diferencias, y las relacionan con parámetros antropométricos y de generación de fuerza. Sin embargo, Capitão (2005) y Capitão, Lima, Gonçalves, Morouço, Silva, Fernandes y Vilas-Boas,(2006) no encuentran diferencias entre ambos géneros para el mismo estilo.

Sobre la aceleración, Madera (2012) muestra que la RMS, el valor máximo y el valor mínimo como variables temporales de la aceleración son superiores en los nadadores mientras que sólo el área espectral, como variable frecuencial de la aceleración, es superior en los nadadores de crol.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

La revisión bibliográfica realizada ha dejado patente que el conocimiento que se tiene sobre el comportamiento de la aceleración en el dominio temporal y frecuencial es escasa. Asimismo la metodología utilizada ha ido cambiando en función del equipo de registro utilizado y del análisis realizado (1D, 2D, 3D).

Así, la relación de la velocidad con los parámetros temporales y frecuenciales de la aceleración sólo ha sido estudiada con muestras de nadadores heterogéneas si se considera su género.

También, de la revisión realizada, sólo se ha encontrado un estudio en 1D que caracterice los parámetros temporales y frecuenciales de la aceleración en función del género. Si bien, los parámetros cinemáticos revisados muestran diferencias de manera general diferencias entre géneros parece razonable mejorar la caracterización de los parámetros temporales y frecuenciales a través de un análisis 3D.

Por ello, este trabajo plantea los siguientes objetivos con respecto a la aceleración y al estilo crol:

- Analizar la aceleración 3D en una banda amplia de frecuencias que permita recoger todas las aceleraciones que se producen durante el nado
- Analizar las diferencias que se encuentren entre nadadores de diferente sexo en los parámetros temporales y frecuenciales de la aceleración
- Analizar la relación de la velocidad con los parámetros temporales y frecuenciales de la aceleración en cada género

Basados en las siguientes hipótesis:

- El análisis 3D de la aceleración permite diferenciar las aceleraciones en función de la dirección en que se producen.
- Las aceleraciones que producen los nadadores son diferentes en función del género
- Los parámetros temporales y frecuenciales de la aceleración se relacionan con la velocidad de nado.

MATERIAL Y MÉTODOS

1- Diseño

Este estudio pretende analizar la aceleración producida en las 3 direcciones: (superior-inferior o X, medio-lateral o Y y anterior-posterior o Z) durante el nado del estilo crol en función del género. Para ello se utilizó una muestra de nadadores de diferentes clubs de natación de la Comunidad Valenciana, a los que se les analizó las aceleraciones producidas durante una prueba de 25 metros a máxima velocidad.

El diseño empleado en el estudio es descriptivo-comparativo. A continuación se explicitan las variables dependientes e independientes empleadas:

- Las variables dependientes estudiadas en el dominio temporal han sido:
 - o Frecuencia de ciclo: (FC: número de ciclos completos de nado por segundo)
 - o Velocidad de nado: (V: metros nadados por segundo)
 - o Root Mean Square (RMS: valor cuadrático medio de la aceleración).
 - o Mínimo (Min; mínimo valor de la aceleración).
 - o Máximo (Max; máximo valor de la aceleración).
- Con respecto al análisis de las variables frecuenciales se calculó:
 - o Pico de potencia (PP: el valor más alto del espectro de potencia).
 - o Frecuencia del pico de potencia (PPF: frecuencia asociada al PP).
 - o Potencia total contenida en el área espectral (AS; valor que refleja la potencia total del espectro).
- Las variables independientes utilizadas fueron el género de los nadadores (hombres, mujeres) y las direcciones de nado (X, superior-inferior; Y, medio-lateral; Z, anterior-posterior).

2- Muestra

La muestra del estudio está formada por 39 nadadores y 36 nadadoras pertenecientes a clubes de natación de la Comunidad Valenciana (tabla 3). Los nadadores participan regularmente y en función de sus marcas en competiciones de ámbito nacional, autonómico y/o provincial. En la tabla 3 se muestran los descriptivos que caracterizan ambos géneros en función de la edad (años), de su antropometría (talla y peso) y de su experiencia previa (años de entrenamiento).

Tabla 3. Descripción de la muestra con sus valores medios y su desviación típica.

	Hombres (N=39)	Mujeres (N=36)
Edad (años)	17,21±3,84	15,67±2,65
Talla (cm)	171'6±10'16	163'3±9'18
Peso (Kg)	64'61±11'66	53,27±10'40
Años Entrenamiento.	7,70 ±3'07	7,30±2'72

Los criterios de inclusión que se establecieron para poder formar parte de la muestra fueron: llevar un mínimo de 2 años de entrenamiento para competiciones organizadas por las federaciones (provinciales, autonómicas y/o nacional) y haber realizado un mínimo de 5 sesiones semanales durante la temporada en curso. Como criterios de exclusión se estableció el padecer cualquier tipo de minusvalía o patología transitoria tanto a nivel físico como psicológico.

3- Procedimiento general

Todos los procedimientos descritos en este apartado se realizaron bajo el consentimiento informado de los sujetos de la muestra. Los nadadores fueron reclutados a través de sus entrenadores teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión descritos en el apartado anterior. Antes del comienzo de las mediciones se realizó una reunión en la que los nadadores fueron informados del protocolo al que se tenían que someter durante la prueba.

Con anterioridad al día de la prueba, a los nadadores menores de edad se les entregó una carta con información acerca de los detalles de la prueba que se iban a realizar y en la que se solicitaban los permisos paternos o de los tutores legales. La carta debía ser devuelta a los investigadores con la rúbrica de los padres/tutores legales autorizando la participación de los sujetos en el trabajo de investigación.

El día de la sesión de medición los sujetos fueron citados en la piscina correspondiente donde se realizó la prueba, donde se realizó la siguiente secuencia:

1. recogida de datos básicos y antropometría.
2. calentamiento estándar.
3. colocación del aparataje.
4. medición de los parámetros cinemáticos durante el nado.

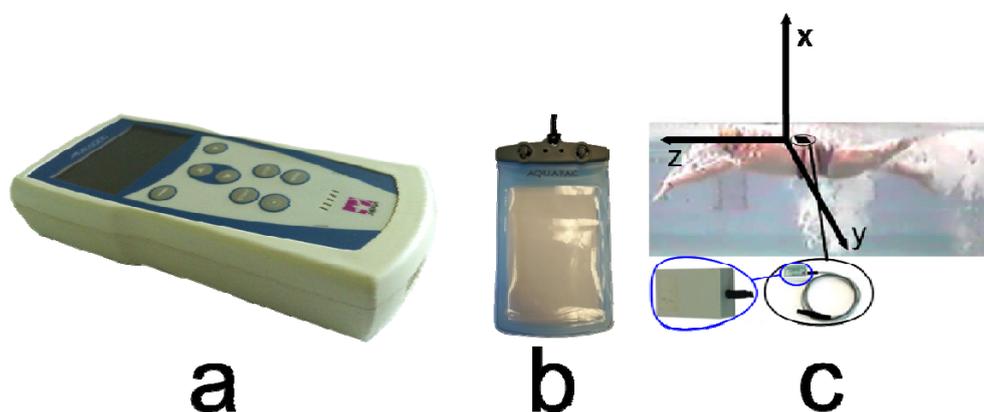


Figura 7: Instrumental empleado para el registro de la aceleración y posición en la que se situó el nadador durante el nado (a: Mega 6000; b: Aquapac; c: Acelerómetro)

4- Material empleado

Para el registro de la aceleración se utilizó el acondicionador de señales MEGA 6000 T4 (181 x 85 x 35 mm, 344 g) conectado a una tarjeta de memoria (2GB de almacenamiento) y a un acelerómetro MEGA de 3 ejes con un rango de $\pm 10G$ y una frecuencia de muestreo de 1000 Hz (31x18x45 mm, 45 g), equipo utilizado para registrar la aceleración del nadador en tiempo real. Para su estanqueidad fue introducido en una bolsa AQUAPAC (250x135x265 mm). La bolsa AQUAPAC con el equipo de registro fue sujetado con una faja lumbar de nylon ajustable a la cintura de cada nadador con velcro y que permitió fijar el acelerómetro entre la primera y tercera vértebra lumbar con el objetivo de registrar las direcciones superior-inferior (X), medio-lateral (Y) y anterior-posterior (Z) de su nado durante el test (figura 7).

Una cámara se utilizó para grabar los 5 metros centrales. Para ello, se señaló 1 punto de referencia en cada corchera a 10 metros de distancia de la pared de salida y 1 punto de referencia en cada corchera a los 10 metros de la pared de llegada. Las imágenes obtenidas se utilizaron para el cálculo de la velocidad de nado (m/s) y de la frecuencia de ciclo (c/m). La cámara posee un sensor de 1/3 CCD con una resolución de 512x582 píxeles. La resolución horizontal es de 350 líneas y la relación señal/ruido de 40 dB. La temperatura de uso abarca de $-10^{\circ}C$ a $45^{\circ}C$. La frecuencia de obtención de imágenes es de 25 Herzios o fotogramas por segundo. La cámara se sujetó con un trípode y se situó a la distancia de 10 metros de la dirección de nado y a un 1 metro de altura sobre la superficie del agua.

5- Recogida de datos básicos, mediciones antropométricas y protocolo

Con anterioridad al día de la prueba, a los nadadores menores de edad se les entregó una carta con información acerca de los detalles de la prueba que se iban a realizar y en la que se solicitaban los permisos paternos o de los tutores legales. La carta debía ser devuelta a los investigadores con la rúbrica de los padres/tutores legales autorizando la participación de los sujetos en el trabajo de investigación.

Con un cuestionario, se anotaron el nombre, la fecha de nacimiento y los años de entrenamiento a nivel competitivo de los sujetos, y las mediciones posteriores.

Se realizaron mediciones tanto de talla como de masa y se utilizaron los siguientes instrumentos para las mediciones antropométricas: la masa con una balanza SECA modelo 713 con una precisión de 200 gramos; la talla con un tallímetro marca SECA (incorporado a la báscula) con una precisión de 1 milímetro.

La recogida de los datos fue realizada por dos personas: un medidor y un anotador, ambos experimentados. Los datos fueron recogidos en la plantilla ya mencionada y posteriormente fueron utilizados para su análisis.

Con el visto bueno de los respectivos entrenadores, se informó a los nadadores que debían realizar un calentamiento previo de 30 minutos que debía contener tres partes: una primera parte de una duración aproximada de 15 min en la que se nadaba de forma libre y variada sobre los cuatro estilos y a una intensidad moderada¹, la segunda parte de una duración aproximada de 8 min combinando ejercicios de técnica a intensidad moderada y nado completo a intensidad submáxima², y la última parte de una duración de 7 min aproximadamente realizando cambios de ritmo a intensidad moderada y máxima³ y repeticiones sobre los cuatro estilos de nado. Al finalizar el calentamiento, se estableció un descanso mínimo de 15 minutos antes de la primera serie.

6- Procedimiento de toma de datos cinemáticos

Inicialmente se colocaba el instrumental fuera del agua y se iniciaba el registro de la señal de la aceleración. A continuación se introducían en el agua y cuando estaban preparados, es decir sujetos al borde de la piscina con un brazo y con apoyo de piernas subacuático en la pared se les daba la salida para que comenzaran el nado de 25 metros crol a la máxima velocidad.

Así, cada nadador realizó 25 metros a máxima velocidad saliendo desde el agua para evitar la inercia del salto en la salida. A los nadadores se les indicó que no debían de respirar durante los 25 metros para evitar el efecto del movimiento de la cabeza durante este gesto y del correspondiente aumento del ruido en la velocidad (Pedersen & Kjendlie, 2006; Vezos et al., 2007). Además, la velocidad de nado es mayor cuando no se respira al compararla con el nado con respiración en el estilo crol (Psycharakis & McCabe, 2011). También se les indicó que el ritmo de batidos durante la ejecución de la prueba debía ser de 6 por ciclo de brazos, que es el más común en distancias cortas (Chollet et al., 2000). En el caso de que no se realizara este tipo de coordinación, se repetía la prueba tras un descanso suficiente.

Al finalizar la prueba de 25 m, el nadador se desprendía del aparataje y este era recogido para dar por finalizado el registro.

¹ 3 en escala de Borg

² 7 en escala de Borg

³ 10 en escala de Borg

7- Análisis de datos

7.1. Selección de la zona de interés.

De la señal X, Y y Z de aceleración de cada test de 25 metros, se seleccionaron los 6 segundos posteriores al segundo ciclo completo de nado (figura 8).

7.2. Filmación, velocidad de nado y frecuencia de ciclo

Las imágenes obtenidas a través de la cámara se utilizaron para el cálculo de la velocidad de nado y de la frecuencia de ciclo (FC). A través del programa Signal Frame (SportMetrics, ESP, Valencia), que posee la función de coordinación de imágenes y contador de tiempo, se calculó el tiempo empleado en el nado de los 10 metros centrales y en dos ciclos completos de nado. En estudios previos (D'Acquisto, Costill, Gehlsen, Young, & Lee, 1988) se ha comprobado que la filmación de un solo ciclo de nado a 50 Hz es suficiente para realizar los cálculos sobre la frecuencia de ciclo.

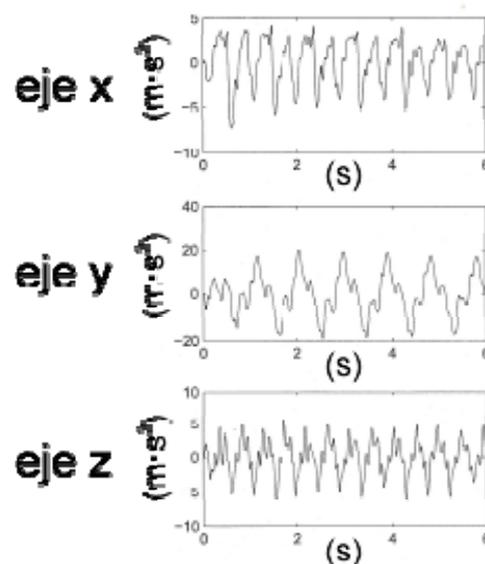


Figura 8: Representación gráfica de la señal de aceleración analizada.

Se puede considerar un ciclo de nado cuando una extremidad realiza un recorrido completo de forma simultánea o alternativa (Morales, Arellano, & Femia, 2006). Así para el cálculo del tiempo que utilizaba el nadador para realizar dos ciclos completos se tomó la entrada de la mano derecha en el agua al final del recobro de brazos y la entrada de la misma mano dos ciclo después (Mason & Cossor, 2000).

Así, la velocidad de nado se calculó en función de la siguiente ecuación:

$$V = 5 \text{ m} / \text{tiempo invertido en los 5 m}$$

Y la frecuencia de ciclo (ciclos/minuto) se calculó en función de la siguiente ecuación:

$$FC = (2 \text{ ciclos} / \text{tiempo de 2 ciclos}) * 60$$

Los registros de la aceleración fueron almacenados durante el nado y posteriormente fueron analizados a través de una función específica, basada en Matlab 7.1 (R14) (Mathworks Inc., Natick, USA). Las señales se filtraron para mantener solo aquellas frecuencias de interés para el estudio. Para esto se utilizó un filtro digital Butterworth de cuarto orden pasabanda de 0-20 Hz. La señal se analizó entonces en los dominios temporal y frecuencial.

Se analizó la amplitud del espectro con el método de periodograma (Pollock, 1999) que permite descubrir las frecuencias ocultas de una señal. Este proceso se realizó usando la función SPECTRUM de Matlab®, y se promedió con el método de Welch. Empleando para ello una ventana Hamming con una amplitud de 256 puntos. Sobre el espectro hallado se calcularon las variables dependientes PP, PPF y AS

En la figura 9 Se puede observar un ejemplo de los espectros frecuenciales obtenidos por un nadador en cada dirección.

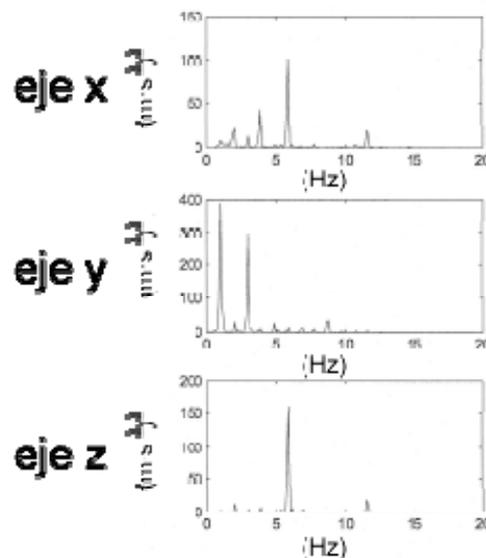


Figura 9: Representación gráfica de los espectros frecuenciales obtenidos en función del análisis realizado.

8. Análisis estadístico

El análisis estadístico fue realizado con el software SPSS®, versión 15.0 (SPSS® Inc., Chicago, IL, USA). La normalidad asumida (test de normalidad K-S) se verificó para todas las variables con antelación a los análisis. Para obtener los estadísticos descriptivos (media, desviación típica de la media) se utilizaron métodos estadísticos estándar.

Se realizó un ANOVA de un factor para establecer las diferencias entre sexos y entre las direcciones en cada sexo para todas las variables temporales y frecuenciales. Se utilizó un "*post-hoc de Bonferroni*" para determinar las diferencias específicas entre direcciones.

Para establecer las correlaciones entre variables dependientes y la velocidad de nado, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r). La magnitud de las correlaciones (Cohen, 1992) se interpretó como: trivial o baja ($r < 0,10$), media ($r \geq 0,10$; $r < 0,50$) y alta ($r \geq 0,50$).

Para todos los análisis, se aceptaron aquellas diferencias cuya probabilidad estaba por debajo del 5% ($P \leq 0,05$).

RESULTADOS

Las diferencias entre géneros de las variables temporales se muestran en la tabla 4. Así V ($F_{1,73}=16,613$; $p<0,000$), FC ($F_{1,73}=15,461$; $p<0,000$), RMS_x ($F_{1,73}=17,944$; $p<0,000$), RMS_y ($F_{1,73}=8,581$; $p=0,005$), RMS_z ($F_{1,73}=36,875$; $p<0,000$), Min_x ($F_{1,73}=8,230$; $p=0,005$), Min_y ($F_{1,73}=12,753$; $p=0,001$), Min_z ($F_{1,73}=33,290$; $p<0,000$), Max_x ($F_{1,73}=20,890$; $p<0,000$), Max_y ($F_{1,73}=10,525$; $p=0,002$), Max_z ($F_{1,73}=33,376$; $p<0,000$), han mostrado diferencias significativas.

El análisis de las diferentes direcciones de las variables temporales muestra diferencias tanto en los nadadores como en las nadadoras. Concretamente en las nadadoras, tanto la variable RMS ($F_{2,150}=147,986$; $p<0,000$) como la Min ($F_{2,150}=113,140$; $p<0,000$) y la Max ($F_{2,150}=125,904$; $p<0,000$) mostraron diferencias significativas. En los nadadores, la variable RMS ($F_{2,150}=131,26$; $p<0,000$), la Min ($F_{2,150}=96,726$; $p<0,000$) y la Max ($F_{2,150}=89,694$; $p<0,000$) también mostraron diferencias significativas.

En la tabla 4 se puede observar los resultados descriptivos en función del género para las variables en el dominio temporal. Asimismo se señalan las comparaciones entre direcciones a través de un test post-hoc de Bonferroni.

Tabla 4. Diferencias entre género y entre direcciones de los parámetros temporales de la aceleración.

Variables temporales	Hombres (N=39)	Mujeres (N=36)	Género (p)	Comparación Direcciones Post-Hoc Bonferroni (p)		
				Hombres	Mujeres	Diferencias
				V (m/s)	1,51 ± 0,19	1,35 ± 0,14
FC (hz)	0,88 ± 0,09	0,80 ± 0,09	0,000	-	-	
RMS_x (m·s ⁻²)	1,90 ± 0,40	1,54 ± 0,31	0,000	0,000	0,000	RMS_x vs RMS_y
RMS_y (m·s ⁻²)	5,41 ± 1,40	4,51 ± 1,30	0,005	0,000	0,000	RMS_y vs RMS_z
RMS_z (m·s ⁻²)	2,90 ± 0,94	1,80 ± 0,52	0,000	0,000	NS	RMS_z vs RMS_x
Min_x (m·s ⁻²)	-6,32 ± 1,50	-5,45 ± 1,10	0,005	0,000	0,000	Min_x vs Min_y
Min_y (m·s ⁻²)	-15,00 ± 3,9	-12,13 ± 3,03	0,001	0,000	0,000	Min_y vs Min_z
Min_z (m·s ⁻²)	-8,85 ± 2,69	-5,80 ± 1,76	0,000	0,000	NS	Min_z vs Min_x
Max_x (m·s ⁻²)	6,11 ± 1,41	4,79 ± 1,04	0,000	0,000	0,000	Max_x vs Max_y
Max_y (m·s ⁻²)	14,63 ± 4,00	11,88 ± 3,30	0,002	0,000	0,000	Max_y vs Max_z
Max_z (m·s ⁻²)	8,02 ± 2,90	4,94 ± 1,44	0,000	0,015	NS	Max_z vs Max_x

Los datos están expresados en media ± desviación típica. RMS_{eje} : root mean square de la aceleración; Min_{eje} : valor mínimo de la aceleración; Max_{eje} : valor máximo de la aceleración; p: nivel de significancia; NS: no significativa

Las diferencias entre géneros de las variables frecuenciales se muestran en la tabla 5. Así PP_z ($F_{1,73}=19,148$; $p<0,000$), PPF_z ($F_{1,73}=4,475$; $p=0,038$), SA_x ($F_{1,73}=16,280$; $p<0,000$), SA_y ($F_{1,73}=7,699$; $p=0,007$), SA_z ($F_{1,73}=30,287$; $p<0,000$), han mostrado diferencias significativas

El análisis de las diferentes direcciones de las variables frecuenciales muestra diferencias tanto en los nadadores como en las nadadoras. Concretamente en las nadadoras, tanto la variable PP ($F_{2,150}=42,781$; $p<0,000$) como la PPF ($F_{2,150}=12,246$; $p<0,000$) y el SA ($F_{2,150}=73,842$; $p<0,000$) mostraron diferencias significativas. En los nadadores, la variable

RESULTADOS

PP ($F_{2,150}=52,389$; $p<0,000$), la PPF ($F_{2,150}=23,937$; $p<0,000$) y el SA ($F_{2,150}=86,315$; $p<0,000$) también mostraron diferencias significativas.

En la tabla 5 se puede observar los resultados descriptivos en función del género para las variables en el dominio temporal. Asimismo se señalan las comparaciones entre direcciones a través de un test post-hoc de Bonferroni.

Tabla 5. Diferencias entre género y entre direcciones de los parámetros frecuenciales de la aceleración.

Variables frecuenciales	Hombres (N=39)	Mujeres (N=36)	Género (p)	Comparación Direcciones Post-Hoc Bonferroni (p)		
				Hombres	Mujeres	Diferencias
$PP_x (m \cdot s^{-2})^2$	16,14 ± 10,15	13,31 ± 8,20	NS	0,000	0,000	PP _x vs PP _y
$PP_y (m \cdot s^{-2})^2$	258,31 ± 191,34	183,10 ± 151,60	NS	0,000	0,000	PP _y vs PP _z
$PP_z (m \cdot s^{-2})^2$	51,10 ± 39,41	20,62 ± 14,35	0,000	NS	NS	PP _z vs PP _x
PPF _x (Hz)	3,42 ± 2,03	3,15 ± 1,62	NS	0,000	0,003	PPF _x vs PPF _y
PPF _y (Hz)	1,96 ± 0,83	2,08 ± 0,61	NS	0,000	0,000	PPF _y vs PPF _z
PPF _z (Hz)	3,40 ± 1,56	3,62 ± 1,56	0,038	0,022	NS	PPF _z vs PPF _x
$SA_x (m \cdot s^{-2})^2$	88,95 ± 37,50	59,73 ± 22,86	0,000	0,000	0,000	SA _x vs SA _y
$SA_y (m \cdot s^{-2})^2$	731,20 ± 374,00	511,61 ± 304,45	0,007	0,000	0,000	SA _y vs SA _z
$SA_z (m \cdot s^{-2})^2$	206,96 ± 131,00	80,65 ± 44,03	0,000	NS	NS	SA _z vs SA _x

Los datos están expresados en media ± desviación típica. PP_{aje}: pico de potencia; PP_{aje}: frecuencial del pico de potencia; SA_{aje}: área espectral; p: nivel de significancia; NS: no significativa

El análisis correlacional entre la velocidad y las variables temporales (tabla 6) muestra como los nadadores obtienen relaciones medias ($r \geq 0,10$; $r < 0,50$) en RMS_x, Min_z, Max_x y Max_y; y relaciones altas ($r \geq 0,50$) en RMS_z y Max_z.

Tabla 6. Relación entre la velocidad y los parámetros temporales en función del género.

Variables temporales	Velocidad	
	Masculino	Femenino
RMS _x	0,42**	0,24
RMS _y	0,29	0,27
RMS _z	0,66**	0,11
Min _x	-0,19	-0,20
Min _y	-0,29	-0,15
Min _z	-0,49**	-0,30
Max _x	0,35*	0,15
Max _y	0,46**	0,22
Max _z	0,62**	-0,22

RMS_{aje}: root mean square de la aceleración; Min_{aje}: valor mínimo de la aceleración; Max_{aje}: valor máximo de la aceleración

$p < 0,05$ *; $p < 0,01$ **

La tabla 7 muestra las relaciones entre la velocidad y los parámetros frecuenciales de la aceleración. También, sólo los nadadores obtienen relaciones medias ($r \geq 0,10$; $r < 0,50$) en PPF_x y en SA_x y relaciones altas ($r \geq 0,50$) en PP_z, PPF_z y AS_z.

Tabla 7. Relación entre la velocidad y los parámetros frecuenciales en función del género.

Variables frecuenciales	Velocidad	
	Masculino	Femenino
PP_x	0,22	0,27
PP_y	0,23	0,30
PP_z	0,53**	0,14
PPF_x	0,38*	-0,02
PPF_y	0,24	-0,08
PPF_z	0,53**	-0,06
SA_x	0,37*	0,28
SA_y	0,30	0,28
SA_z	0,64**	0,14

PP_{eje}: pico de potencia; *PP_{eje}*: frecuencial del pico de potencia;

SA_{eje}: área espectral

p<0,05*; *p*<0,01**

DISCUSIÓN

Este trabajo presenta por primera vez un análisis 3D de las aceleraciones que se producen en los nadadores, en el que se muestran diferencias en función del sexo, diferencias entre las aceleraciones que se producen en cada dirección y en el que se obtienen relaciones de la velocidad de nado con los parámetros temporales (RMS, Max y Min) y frecuenciales (PP, PPF, SA) estudiados de la aceleración.

El análisis de los resultados muestra que los nadadores obtienen mayores valores en todos los parámetros temporales mientras que en los parámetros frecuenciales las diferencias se delimitan a aquellos valores que se obtienen en la dirección antero-posterior y a todas las direcciones del SA.

La comparación entre direcciones de los parámetros temporales muestra en los nadadores que los valores en la dirección superior-inferior son menores que los obtenidos en la dirección anterior-posterior, y éstos a su vez son inferiores a los de la dirección medio-lateral. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Tella et al. (2010) con una muestra compuesta por nadadores de ambos sexos. Sin embargo, las diferencias en las nadadoras sólo se muestran entre los resultados obtenidos en la dirección medio-lateral con el resto de direcciones siendo sus valores mayores que los del resto de direcciones.

La comparación entre direcciones de los parámetros frecuenciales muestra, en ambos sexos, que los valores en la dirección medio-lateral son diferentes a los del resto de direcciones, a excepción del parámetro PPF en los nadadores cuyas magnitudes son diferentes en todas las direcciones. En concreto, los valores obtenidos en PP y SA en ambos sexos son superiores para la dirección medio-lateral. El parámetro PPF muestra sus valores más bajos en la dirección medio-lateral en ambos géneros. Si bien sólo en los nadadores los valores de la dirección antero-posterior son superiores a los obtenidos en la dirección superior-inferior.

Uno de los hallazgos de este trabajo es la relación obtenida en cada sexo entre la velocidad de nado con los parámetros temporales y frecuenciales. Los resultados sólo muestran relaciones en el grupo de nadadores siendo altas en RMS_z , Max_z , PP_z , PPF_z y SA_z).

Sobre la muestra

En comparación con otros trabajos, la muestra utilizada en este trabajo para el análisis de la aceleración está segmentada en función del sexo e integrada por un número amplio de sujetos. Respecto al número de sujetos, solo el trabajo de Tella et al. (2010), muestra un número de sujetos superior ($n=70$) pero la muestra no está segmentada en función del sexo. Con respecto a la segmentación de la muestra en función del sexo, sólo la tesis doctoral de Madera (2012) y la publicación derivada de esta tesis (Madera, Gonzalez, Benavent, & Tella, 2012) utiliza muestras en función del género (31 nadadores y 20 nadadoras), llevando a cabo un análisis de la aceleración similar al realizado en el presente trabajo. Sin embargo su análisis es en 1D y sus datos derivados de los registros espacio-temporales obtenidos a través de un transductor de posición.

Si bien la muestra utilizada ha permitido caracterizar la aceleración en función del género, próximos estudios deberían concretar muestras amplias y más homogéneas en cuanto a su

edad, experiencia o nivel de rendimiento físico y técnico con el objetivo de conocer como gestionan sus aceleraciones durante el nado.

Sobre la metodología

En este estudio se ha registrado la aceleración a través de un acelerómetro 3D colocado en la zona lumbar. Una de las líneas de investigación que permanecen abiertas para determinar la validez de los registros obtenidos es aquella que analiza cuales son los puntos antropométricos que permiten representar la aceleración del cuerpo del nadador (Fernandes et al., 2012; Psycharakis & Sanders, 2009). Así, el centro de masas es el punto antropométrico más adecuado para calcular las modificaciones cinemáticas durante el nado. En este trabajo el punto antropométrico en el que se ajustó el acelerómetro se situó en la zona lumbar a una altura entre la 1ª y la 3ª vértebra lumbar, estando este punto próximo al teórico centro de masas. Además la rapidez que supone la utilización de acelerómetros 3D para obtener los datos de la aceleración han sido los argumentos utilizados para su colocación y uso. Este tipo de registros debería validarse con respecto a los obtenidos a través de la fotogrametría 3D que permite obtener con mayor precisión el centro de masas pero que requieren altos niveles de exigencia con respecto a las condiciones de filmación y de tiempo para su análisis (Fernandes et al., 2012).

Sobre el ancho de banda de las frecuencias en las que actúan las aceleraciones, se ha analizado las frecuencias iguales o inferiores a 20 Hz (0-20 Hz) por considerar que en frecuencias superiores no se producen aceleraciones relevantes durante el nado de crol (figura 9). Los trabajos que hasta ahora habían analizado la aceleración en 1D habían utilizado criterios diferentes. Mientras Tella et al. (2008) y Madera et al. (2010) centraban su análisis en un rango de frecuencias superior a 1Hz (1-10 Hz o 1-20 Hz) (figuras 6 y 7) con el objetivo de caracterizar las aceleraciones intracíclicas, Holmér (1979) caracterizaba las aceleraciones cíclicas analizando el rango de frecuencias de 0,25-10 Hz (figura 8).

Posiblemente, las aceleraciones registradas en 1D estarían representando la resultante final de las aceleraciones que se producen en las tres direcciones del nadador durante el nado, por lo que las metodologías utilizadas para el análisis de la aceleración en función de un diferente rango de frecuencias tendrían las diferentes justificaciones mencionadas anteriormente.

Así para el análisis de la aceleración 3D realizado en el presente trabajo se optó por realizar los cálculos en un rango de frecuencias de 0-20 Hz por considerar que la dirección medio-lateral podría caracterizar las principales aceleraciones que se producen de manera cíclica y derivadas de la acción alterna de los brazos y del rolo del cuerpo a frecuencias próximas a 1 Hz, mientras que la dirección antero-posterior podría caracterizar aquellas aceleraciones intracíclicas derivadas de las acciones propulsivas de los brazos y de las piernas.

Sobre los resultados

En relación a las variables temporales, los resultados obtenidos muestran como los hombres consiguen mayores valores de aceleración que las mujeres en las variables (RMS, Max, Min) al igual que los resultados de Madera (2012). Según Vilas-Boas (1996) las aceleraciones y en consecuencia la fuerzas que las producen estén más condicionadas por la capacidad de

coordinar las acciones propulsivas, y si se considera que la RMS es el valor eficaz de la aceleración (Tella et al., 2008) los nadadores obtendrían mayores valores eficaces de la aceleración debido a la mejor resultante entre la interacción de las fuerzas propulsivas y de frenado (Ungerechts, 1988).

Sin embargo, no se pueden comparar estos datos con los de otros estudios, ya que no se han encontrado referencias bibliográficas que caractericen la aceleración 3D durante el nado en nadadores y nadadoras. En todo caso, se podría justificar que los menores valores obtenidos en la dirección antero-superior con respecto a la analizada en la misma dirección pero en estudios en 1D, serían debidos a que las aceleraciones registradas en análisis en una sola dirección serían la resultante de las aceleraciones que se producen en las tres direcciones. Así, se aprecia en los trabajos que estudian esta variable, que los valores medios de la RMS de la aceleración para el estilo crol fueron de $7,95 \pm 0,62$ (Tella et al., 2008) con una muestra de sujetos compuesta por nadadores y nadadoras y en un nado de 25 metros a crol similar al realizado en nuestro estudio, y Madera (2012) con otro protocolo similar también presenta valores de 5,9 para los nadadores y de 4,84 para las nadadoras en RMS. Ambos trabajos estarían mostrando valores superiores a los obtenidos en este trabajo (1,90 y 1,54) dando soporte a la justificación planteada.

En relación a las variables frecuenciales, los resultados muestran diferencias entre géneros en la dirección antero-posterior para los parámetros PP y PPF. Esta diferencia no se obtuvo en el trabajo de Madera (2012), quizá porque en sus resultados se mostraba el comportamiento de la aceleración en una única dirección antero-posterior (1D) como resultado a todas las aceleraciones que se producen en todas las direcciones. Así, el análisis en 3D del comportamiento de la aceleración nos ofrece información más precisa sobre las diferencias entre géneros de estos parámetros. En el parámetro SA tanto el trabajo de Madera (2012) como en los resultados 3D obtenidos se muestran diferencias entre géneros

Uno de los hallazgos de este trabajo es el diferente comportamiento que tienen nadadores y nadadoras en cuanto a la magnitud de las aceleraciones que producen en cada dirección. Que los nadadores muestren magnitudes diferentes de la aceleración entre cada uno de las direcciones y que las nadadoras sólo muestren diferencias de la dirección medio lateral con el resto de direcciones podría ser una de las causas de las mayores fluctuaciones de velocidad que realizan los nadadores sobre la nadadoras (Schnitzler et al., 2008). Así en próximos trabajos y con el objetivo de analizar el comportamiento de la aceleración entre direcciones en función del sexo, se podría incluir algún parámetro que caracterice las variaciones de la velocidad intraciclo y de esta manera analizar sus posibles causas.

Los estudios que han analizado el espectro frecuencial de la aceleración como resultado del nado han dado a conocer magnitudes y valores de parámetros ligados a su pico principal (PP y PPF) y al total de la aceleración contenida en él (SA) (Madera, 2012; Tella et al., 2008; Tella et al., 2010). Además se han definido diferentes tipos de espectro dependiendo de si se dibuja un único pico de potencia (PP) o más picos de potencia relevantes en el espectro (Holmér, 1979; Madera, 2012; Tella et al., 2008). Así, el trabajo presenta los valores frecuenciales de la aceleración 3D obtenidos en función del género y en función de la

dirección en que se han producido dicha aceleración. Sin embargo la gran variabilidad sobre los registros obtenidos en ambos géneros con desviaciones típicas superiores al 30% del valor medio de cada variable no aconseja generalizar estos resultados ni extrapolar su frecuencia al número de aceleraciones que se producen por ciclo de nado como se ha realizado en trabajos previos (Madera et al., 2012; Tella et al., 2008) . Más bien muestra que las aceleraciones que producen, estando sujetas a la eficacia de los movimientos y a las acciones propulsivas que los nadadores realizan, es muy diferente en función de su técnica individual. A modo de ejemplo analizamos a dos nadadores que presentan un PPF diferente en el espectro frecuencial de la dirección antero-posterior (figura 10).

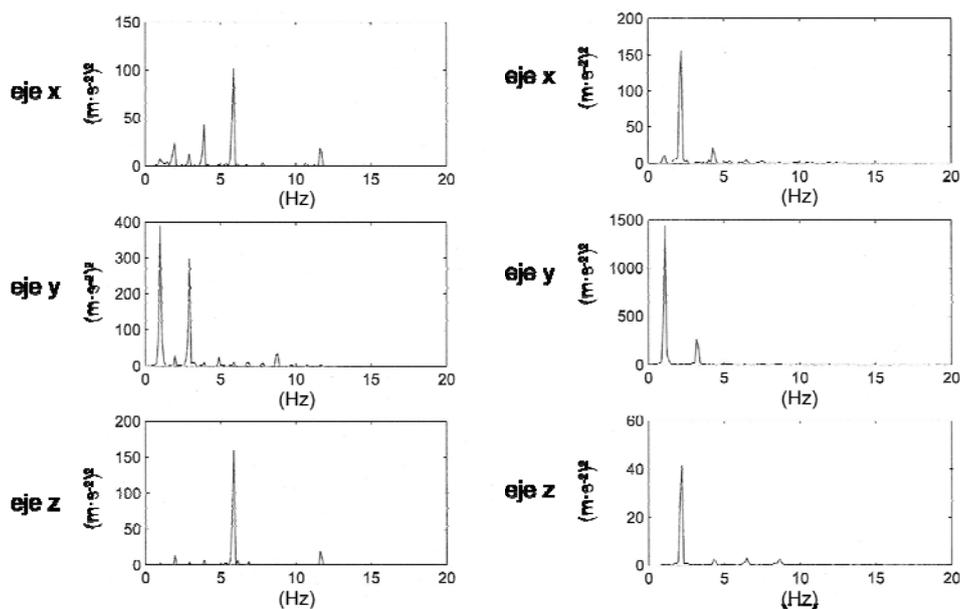


Figura 10: Espectros frecuenciales de dos nadadores que muestran diferente PPF.

Un nadador obtiene en la dirección antero-posterior un PPF de 5,49 Hz y su frecuencia de ciclo es 0,88 Hz y otro nadador ha obtenido un PPF de 1,59 Hz y su frecuencia de ciclo ha sido de 0,75 Hz. La extrapolación de sus valores de PPF para calcular el número de aceleraciones importantes que realizarían por ciclo de nado nos da que el primero de los sujetos realizaría 6,24 aceleraciones importantes por ciclo de nado y el segundo de los nadadores 2,12 aceleraciones importantes por ciclo de nado. Quizá esta alta variabilidad esté mostrando una limitación para caracterizar la aceleración frecuencial de los nadadores. Pero por el contrario su análisis está mostrando una capacidad para identificar como gestionan las aceleraciones cada uno de los nadadores. Así, el nadador que realiza aceleraciones con una frecuencia próxima a 6 aceleraciones por ciclo de nado estaría mostrando su capacidad de producir las aceleraciones intraciclo que se definen en la literatura como resultado de las acciones de brazos y de piernas. Mientras que el nadador que realiza aceleraciones a una frecuencia próxima a 2 por ciclo completo de nado estaría produciendo una única aceleración por cada acción de brazos y su correspondiente coordinación con las piernas, mostrando una eficacia diferente sobre las acciones propulsivas realizadas durante el nado de crol. De esta manera si el análisis frecuencial determina un patrón técnico de nado relativo a la gestión de las aceleraciones durante el nado de crol, su evaluación podría detectar los cambios que se producen a lo largo de una prueba o después de un proceso de entrenamiento técnico o físico.

Estas gráficas que representan, a través de los espectros frecuenciales de la aceleración 3D, la gestión de las aceleraciones deberán ser estudiadas en próximos trabajos, sumándose los trabajos previos que han analizado los diferentes tipo de espectro de la aceleración en 1D (Madera et al., 2012; Tella et al., 2008) y así ampliar el conocimiento y las posibles aplicaciones que de ellos se deriven.

El análisis de la relación de la velocidad con los diferentes parámetros temporales y frecuenciales de la aceleración muestra otro de los hallazgos del presente estudio, mientras que los nadadores presentan relaciones altas de la aceleración con la velocidad (RMS_z , Max_z , PP_z , PPF_z) las nadadoras no presentan ninguna relación de la aceleración con la velocidad. Trabajos previos (Madera et al., 2012; Tella et al., 2008) mostraban relaciones de la velocidad con los parámetros temporales y frecuenciales de la aceleración siendo altas en el trabajo de Tella et al. (2008) (PP, PPF y SA) y medias en la tesis de Madera (2012) (RMS, Min, Max, PP y SA). Si bien estas relaciones estaban obtenidas con muestras no segmentadas en función del género (Madera, 2012; Tella et al., 2008) y con una muestra pequeña de sujetos ($n=7$) en el caso de Tella et al. (2008).

Posiblemente esta relación desigual que los nadadores presentan con respecto a las nadadoras esté poniendo de relieve patrones de rendimiento diferentes entre sexos y que deberían ser objeto de estudio en futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

Este trabajo confirma las hipótesis planteadas en su inicio, a excepción de la relación que se esperaba encontrar con las nadadoras entre los parámetros temporales y frecuenciales de la aceleración y la velocidad de nado. Así se presentan las siguientes conclusiones:

- 1- El análisis de la aceleración en el dominio temporal muestra diferencias entre las direcciones superior-inferior, medio-lateral y antero-superior en los nadadores. Sin embargo el análisis frecuencial de la aceleración permite detectar que estas diferencias se delimitan a la dirección antero-posterior para los parámetros PP y PPF, y en todas las direcciones para el parámetro SA.
- 2- La aceleración de los nadadores en el dominio temporal es mayor en la dirección medio-lateral y menor en la dirección superior-inferior. En las nadadoras los valores en la dirección medio-lateral son mayores a los que se producen en el resto de direcciones.
- 3- La aceleración en la dirección medio-lateral de los nadadores y de las nadadoras en el dominio frecuencial es mayor en PP y SA que en el resto de direcciones. Por el contrario, en ambos géneros el parámetro PPF registra su frecuencia más baja en la dirección medio-lateral.
- 4- El análisis de la aceleración en el dominio temporal y frecuencial muestra que los nadadores registran mayores valores a excepción del parámetro PPF en la dirección medio-lateral.
- 5- La aceleración en la dirección antero-posterior se muestra como predictor del rendimiento en los nadadores al obtener relaciones positivas y altas con la velocidad de nado con todos los parámetros temporales y frecuenciales en la dirección antero-posterior, a excepción de Min. Por el contrario la aceleración 3D en las nadadoras no muestra ninguna capacidad de predicción en su rendimiento al no existir ninguna relación entre la velocidad de nado y los parámetros temporales y frecuenciales.

**LIMITACIONES, APLICACIONES Y
POSIBLES LÍNEAS DE
INVESTIGACIÓN**

Como ya se ha comentado una de las limitaciones de este trabajo es la validez de los resultados obtenidos, que requerirá en próximos trabajos de la comparación de los registros obtenidos con acelerómetros 3D en la zona lumbar con los resultados obtenidos de la aceleración del centro de masas con fotogrametría en las tres direcciones.

En base a los resultados obtenidos y más allá de la capacidad que tienen los perfiles de la aceleración para identificar a los diferentes estilos de nado o a las diferentes perfiles de que se obtienen en cada dirección hacia donde se aplican, el análisis temporal y frecuencial de la aceleración permite analizar la eficacia de las aceleraciones realizadas y por tanto pueden ser interesantes para la evaluación del proceso de entrenamiento de los nadadores en sus diferentes etapas. De esta manera futuros estudios que analicen los cambios de aceleración en función de la gestión de una prueba de competición o de la aplicación de programas de entrenamiento, físico o técnico serán necesarios para comprender mayor el comportamiento de la aceleración 3D durante el nado.

BIBLIOGRAFÍA

-
- Adrian, M. J., Singh, M., & Karpovich, P. V. (1966). Energy cost of leg kick, arm stroke, and whole crawl stroke. *Journal of Applied Physiology*, *21*(6), 1763-1766.
- Arellano, R., Brown, P., Cappaert, J., & Nelson, R. C. (1994). Analysis of 50-, 100-, and 200-m freestyle swimmers at the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics*, *10*(2), 189-199.
- Barbosa, T. M., Fernandes, R. J., Keskinen, K. L., & Vilas-Boas, J. P. (2008). The influence of stroke mechanics into energy cost of elite swimmers. *European Journal of Applied Physiology*, *103*(2), 139-149.
- Bixler, B. (2005). Resistance and propulsion. In J. M. Stager, & D. A. Tanner (Eds.), *Swimming* (2nd ed., pp. 59-101). Bloomington, USA: Blackwell Science.
- Buchner, M., & Reischle, K. (2003). Measurements of the intracyclical acceleration in competitive swimming with a newly developed accelometer-goniometer-device. *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*, St. Etienne, FRA. 57-62.
- Capitão, F. (2005). *Variações intracíclicas da velocidade na Técnica de Bruços*. Porto, POR: Faculdade de Desporto, Universidade do Porto.
- Capitão, F., Lima, A. B., Gonçalves, P., Morouço, P., Silva, M., Fernandes, R., & Vilas-Boas, J. P. (2006). Videogrametrically and velocimetrically assessed intra-cyclic variations of the velocity in breaststroke. *Revista Portuguesa De Ciências do Desporto*, *6*(2), 212-214.
- Chatard, J. C., Lavoie, J. M., & Lacour, J. R. (1991). Energy cost of front-crawl swimming in women. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *63*(1), 12-16.
- Chengalur, S. N., & Brown, P. L. (1992). An analysis of male and female Olympic swimmers in the 200-meter events. *Canadian Journal of Sport Sciences*, *17*(2), 104-109.
- Chollet, D. (2004). *Natacion deportiva* (2ª ed.). Barcelona, ESP: Inde.
- Chollet, D., Chabies, S., & Chatard, J. C. (2000). A new index of coordination for the crawl: description and usefulness. *International Journal of Sports Medicine*, *21*(1), 54-59. doi:10.1055/s-2000-8855
- Cohen, J. (1992). Statistical power analysis. *Current Directions in Psychological Science*, *1*(3), 98-101.
- Colwin, C. M. (1992). *Swimming into the 21st century*. Champaign, USA: Leisure Press.
- Costill, D. L., Maglischo, E. W., & Richardson, A. B. (1992). *Swimming* (4th ed.). Bodmin, UK: Blackwell Science Ltd.
-

- Counsilman, J. E. (1968). *The science of swimming* (2nd ed.). Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall.
- Counsilman, J. E. (1983). *La Natación: Ciencia y Técnica para la preparación de campeones* (E. Alonso Trans.). (3ª ed.). Barcelona: Edit. Científico Técnica.
- Craig, A. B., Termin, B., & Pendergast, D. R. (2006). Simultaneous recordings of velocity and video during swimming. *Revista Portuguesa De Ciências do Desporto*, 6(2), 32-35.
- D'Acquisto, L. J., Costill, D. L., Gehlsen, G. M., Young, W. T., & Lee, G. (1988). Breaststroke economy, skill, and performance: study of breaststroke mechanics using a computer based "velocity-video" system. *Journal of Swimming Research*, 4(2), 9-13.
- Faulkner, J. A. (1968). Physiology of swimming and diving. In H. B. Falls (Ed.), *Exercise physiology* (pp. 415-445). Baltimore, USA: Academic Press.
- Fernandes, R. J., Ribeiro, J., Figueiredo, P., Seifert, L., & Vilas-Boas, J. P. (2012). Kinematics of the hip and body center of mass in front crawl. *Journal of Human Kinetics*, 33(-1), 15-23.
- FINA. (2012). *Federation Internationale de Natation*. Retrieved 9 de agosto, 2012, from <http://www.fina.org>
- Grimston, S. K., & Hay, J. G. (1986). Relationships among anthropometric and stroking characteristics of college swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 18(1), 60-68.
- Gutiérrez, M. (1999). *Biomecánica deportiva*. Madrid, ESP: Síntesis.
- Hay, J. G., Liu, Q., & Andrews, J. G. (1993). Body roll and handpath in freestyle swimming: a computer simulation study. *Journal of Applied Biomechanics*, 9(3), 227-237.
- Holmér, I. (1979). Analysis of acceleration as a measure of swimming proficiency. *Swimming III*, Baltimore, USA. 118-124.
- Ichikawa, H., Yuji, O., Miyaji, C., & Nomura, T. (2003). Estimation of arm motion in front crawl swimming using accelerometer. *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*, St. Etienne, FRA. 133-138.
- Kennedy, P., Brown, P., Chengalur, S. N., & Nelson, R. C. (1990). Analysis of male and female Olympic swimmer's in the 100-meter events. *International Journal of Sports Biomechanics*, 6, 187-197.
- Leblanc, H., Seifert, L., Tourny-Chollet, C., & Chollet, D. (2007). Intra-cyclic distance per stroke phase, velocity fluctuations and acceleration time ratio of a breaststroker's hip: a

-
- comparison between elite and nonelite swimmers at different race paces. *International Journal of Sports Medicine*, 28(2), 140-147. doi:10.1055/s-2006-924205
- Lee, J., Burkett, B., Thiel, D., & James, D. (2011). Inertial sensor, 3D and 2D assessment of stroke phases in freestyle swimming. *Procedia Engineering*, 13, 148-153.
- Letzelter, H., & Freitag, W. (1983). Stroke length and stroke frequency variations in men's and women's 100-m freestyle swimming. *Biomechanics and Medicine in Swimming IV*, Champaign, USA. , 14 315-322.
- López, G., Gutiérrez, M., & Arellano, R. (2002). Upper extremity kinematics during different breathing pattern and selected stroke drills in front crawl swimming. *20 International Symposium on Biomechanics in Sports*, Cáceres, ESP. 48-51.
- Madera, J. (2012). *Análisis en el dominio temporal y frecuencial de la aceleración en los cuatro estilos de competición de natación*. Universidad de Valencia.
- Madera, J., Gonzalez, L. M., Benavent, J., & Tella, V. (2012). Analysis on the time and frequency domains of the acceleration in front crawl stroke. *Journal of Human Kinetics*, 32, 109-120.
- Madera, J., González, L. M., García Massó, X., Benavent, J., Colado, J. C., & Tella, V. (2010). Different frequential acceleration spectrums in front crawl. *XI International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming*, Oslo, NOR. 119-122.
- Maglischo, C. W., Maglischo, E. W., & Santos, T. R. (1987). The relationship between the forward velocity of the center of gravity and the forward velocity of the hip in the four competitive strokes. *Journal of Swimming Research*, 3(2), 11-17.
- Maglischo, C. W., Maglischo, E. W., Sharp, R. L., Zier, D. J., & Katz, A. (1984). Tethered and nontethered crawl swimming. *2 International Symposium on Biomechanics in Sports*, Colorado Springs, USA. 163-176.
- Maglischo, E. W. (1982). *Swimming faster: a comprehensive guide to the science of swimming*. Mountain View, USA: Mayfield.
- Maglischo, E. W. (1993). *Swimming even faster* (2nd ed.). Mountain View, USA: Mayfield Pub. Co.
- Maglischo, E. W. (2003). *Swimming fastest* (5th ed.). Champaign, USA: Human Kinetics Publishers.
- Manley, P. K., & Atha, J. (1992). Intra-stroke velocity fluctuations in paced breaststroke swimming. *Biomechanics and Medicine in Swimming, Swimming Science VI*, London, UK. 151-159.
-

- Mason, B. R., & Cossor, J. (2000). What can we learn from competition analysis at the 1999 pan pacific swimming championships? *18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, , 1(1) 75-82.
- Mathie, M. J., Coster, A. C. F., Lovell, N. H., & Celler, B. G. (2004). Accelerometry: providing an integrated, practical method for long-term, ambulatory monitoring of human movement. *Physiological Measurement*, 25(2), R1-20.
- Menz, H. B., Lord, S. R., & Fitzpatrick, R. C. (2003). Acceleration patterns of the head and pelvis when walking on level and irregular surfaces. *Gait and Posture*, 18(1), 35-46.
- Miller, D. I. (1975). Biomechanics of swimming. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 3(1), 219-248.
- Morales, E. (2006). *Estudio de la evolución de las características antropométricas, condicionales y técnicas de nadadores andaluces de grupos de edad*. Universidad de Granada.
- Morales, E., Arellano, R., & Femia, J. (2006). Estudio de la evolución de las características antropométricas, condicionales y técnicas de nadadores andaluces de grupos de edad.
- Ohgi, Y., & Ichikawa, H. (2002). Microcomputer-based data logging device for accelerometry in swimming. *The Engineering of Sport*, 4, 699-704.
- Ohgi, Y., Yasumura, M., Ichikawa, H., & Miyaji, C. (2002). Analysis of stroke technique using acceleration sensor IC in freestyle swimming. *Engineering of Sport*, 7, 503-511.
- Pai, Y. C., Hay, J. G., Wilson, B. D., & Thayer, A. L. (1984). Stroking techniques of elite swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 2(3), 225-239.
- Payton, C. J., Bartlett, R. M., & Baltzopoulos, V. (1999). The contribution of body roll to hand speed in front crawl swimming-an experimental study. *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*, Jyväskylä, FIN. , 1 65-70.
- Payton, C. J., Bartlett, R. M., Baltzopoulos, V., & Coombs, R. (1999). Upper extremity kinematics and body roll during preferred-side breathing and breath-holding front crawl swimming. *Journal of Sports Sciences*, 17(9), 689-696.
- Pedersen, T., & Kjendlie, P. L. (2006). The effect of the breathing action on velocity in front crawl sprinting. *Revista Portuguesa De Ciências do Desporto*, 6(1), 75-79.
- Pelayo, P., Sidney, M., Kherif, T., Chollet, D., & Tourny, C. (1996). Stroking characteristics in freestyle swimming and relationships with anthropometric characteristics. *Journal of Applied Biomechanics*, 12(2), 197-206.

- Pelham, T. W., Robinson, M. G., & Holt, L. E. (2006). Assessing human movement with accelerometry. *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, 27(1), 21-28.
- Pollock, D. S. G. (1999). *A handbook of time-series analysis, signal processing and dynamics* (1st ed.). London, UK: Academic Press.
- Psycharakis, S. G., & McCabe, C. (2011). Shoulder and hip roll differences between breathing and non-breathing conditions in front crawl swimming. *Journal of Biomechanics*, 44(9), 1752-1756.
- Psycharakis, S. G., Naemi, R., Connaboy, C., McCabe, C., & Sanders, R. H. (2010). Three-dimensional analysis of intracycle velocity fluctuations in frontcrawl swimming. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20(1), 128-135. doi:10.1111/j.1600-0838.2009.00891.x
- Psycharakis, S. G., & Sanders, R. H. (2009). Validity of the use of a fixed point for intracycle velocity calculations in swimming. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(2), 262-265.
- Rouboa, A., Silva, A., Leal, L., Rocha, J., & Alves, F. (2006). The effect of swimmer's hand/forearm acceleration on propulsive forces generation using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics*, 39(7), 1239-1248.
- Sánchez-Molina, J. A., & Arellano, R. (2002). Stroke index values according to level, gender, swimming style and event race distance. *20 International Symposium on Biomechanics in Sports*, Cáceres, SPA. 56-59.
- Schnitzler, C., Seifert, L., Alberty, M., & Chollet, D. (2010). Hip Velocity and Arm Coordination in Front Crawl Swimming. *International Journal of Sports Medicine*, 31(12), 875-881.
- Schnitzler, C., Seifert, L., Ernwein, V., & Chollet, D. (2008). Arm coordination adaptations assessment in swimming. *International Journal of Sports Medicine*, 29(6), 480-486.
- Seifert, L., Chollet, D., & Bardy, B. G. (2004). Effect of swimming velocity on arm coordination in the front crawl: a dynamic analysis. *Journal of Sports Sciences*, 22(7), 651-660.
- Slawson, S. E., Justham, L. M., West, A. A., Conway, P. P., Caine, M. P., & Harrison, R. (2008). Accelerometer profile recognition of swimming strokes. *The Engineering of Sport* 7, , 81-87.

- Takagi, H., Sugimoto, S., Nishijima, N., & Wilson, B. (2004). Differences in stroke phases, arm-leg coordination and velocity fluctuation due to event, gender and performance level in breaststroke. *Sports Biomechanics*, 3(1), 15-27.
- Tan, H., Wilson, A. M., & Lowe, J. (2008). Measurement of stride parameters using a wearable GPS and inertial measurement unit. *Journal of Biomechanics*, 41(7), 1398-1406.
- Tella, V., Madera, J., Colado, J. C., Mateu, J., García Massó, X., & González, L. M. (2010). A study about the 3D acceleration in front crawl and its relation with performance. *XI International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming*, Oslo, NOR. 173-174.
- Tella, V., Toca-Herrera, J. L., Gallach, J. E., Benavent, J., González, L. M., & Arellano, R. (2008). Effect of fatigue on the intra-cycle acceleration in front crawl swimming: A time-frequency analysis. *Journal of Biomechanics*, 41(1), 86-92.
doi:10.1016/j.jbiomech.2007.07.012
- Ungerechts, B. E. (1988). The relation of peak body acceleration to phases of movements in swimming. *Swimming Science V*, Champaign, USA. 61-66.
- Vannozzi, G., Donati, M., Gatta, G., & Cappozzo, A. (2010). Analysis of swim turning, underwater gliding and stroke resumption phases in top division swimmers using a wearable inertial sensor device. *XI International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming*, Oslo, NOR. 178-180.
- Vezeos, N., Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Kasimatis, P., Christoforidis, C., & Mavromatis, G. (2007). Underwater stroke kinematics during breathing and breath-holding front crawl swimming. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6(Dic), 58-62.
- Vilas-Boas, J. P. (1996). Speed fluctuations and energy cost of different breaststroke techniques. *Biomechanics and Medicine in Swimming VII*, London, UK. , 7 167-171.
- Vilas-Boas, J. P. (1997). Estado actual da investigação científica sobre técnica desportiva em natação. *17º Congreso Da Asociacion Española De Técnicos De Natación y 4ª Congreso Ibérico*, Camargo, ESP. 1-44.
- Wright, B. V., Hinman, M. G., & Stager, J. M. (2010). Accelerometry as a means of quantifying training distance and speed in competitive swimmers. *XI International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming*, Oslo, NOR. 305-307.
- Zamparo, P. (2006). Effects of age and gender on the propelling efficiency of the arm stroke. *European Journal of Applied Physiology*, 97(1), 52-58. doi:10.1007/s00421-006-0133-9