



Determinació de les variacions d'acceleració intracíclica a diferents ritmes de competició en nedadors de fons d'alt rendiment

Gemma Company Badia

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



Facultat de Formació del Professorat



INEFC

Institut Nacional
d'Educació Física
de Catalunya



Generalitat
de Catalunya

Centre de Barcelona

Programa de Doctorat EEES
“Activitat Física, Educació Física i Esport”
Línia de recerca:
“Entrenament Esportiu”

**DETERMINACIÓ DE LES VARIACIONS D'ACCELERACIÓ
INTRACÍCLICA A DIFERENTS RITMES DE COMPETICIÓ EN
NEDADORS DE FONS D'ALT RENDIMENT**

Tesi doctoral presentada per:
Gemma Company Badia

Dirigida i tutoritzada per:
Mario Lloret Riera

Per a optar al títol de:
Doctora per la Universitat de Barcelona

Barcelona, 2014

"The real problem is not whether machines think but whether men do".

-B. F. Skinner

"Tiny details imperceptible to us decide everything!"

— W.G. Sebald, *Vertigo*

ÍNDEX

| | |
|--|-----|
| AGRAÏMENTS | V |
| INDEX DE FIGURES | VII |
| ÍNDIX DE TAULES | XI |
| 1. RESUM / ABSTRACT | 1 |
| 2. INTRODUCCIÓ | 5 |
| 3. LA PROPULSIÓ EN NATACIÓ | 11 |
| 3.1 HIDRODINÀMICA APLICADA A LA PROPULSIÓ EN NATACIÓ | 11 |
| 3.1.1 RESISTÈNCIA DE L'AIGUA I FORÇA D'ARROSSEGAMENT | 11 |
| 3.1.1.1 Conceptes bàsics de la resistència d'arrossegament | 11 |
| 3.1.1.2 Teories propulsives basades en la força d'arrossegament | 17 |
| 3.1.2 PRINCIPI DE BERNOUILLI I FORCES DE SUSTENTACIÓ | 20 |
| 3.1.2.1 Conceptes bàsics de la generació de forces de sustentació | 20 |
| 3.1.2.2 Teories propulsives basades en la sustentació | 22 |
| 3.1.3 GENERACIÓ DE FORCES EN FLUIDS INESTABLES | 25 |
| 3.1.3.1 Diferència entre la generació de propulsió en un fluid estable i en un inestable i efectes associats | 25 |
| 3.1.3.2 Conceptes bàsics associats a la hidrodinàmica de fluids inestables | 26 |
| 3.1.3.3 Teories propulsives basades en la hidrodinàmica de fluids inestables | 33 |
| 3.1.4 PROPOSTA ALTERNATIVA DE MAGLISCHO | 39 |
| 3.2 TÈCNICA DE L'ESTIL LLIURE O CROL | 43 |
| 3.2.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DE LA TÈCNICA | 43 |
| 3.2.1.1 Fases principals de la braçada | 45 |
| 3.2.1.2 Fases principals de la batuda | 47 |
| 3.2.1.3 Coordinacions de l'estil crol | 48 |
| 3.2.2 ASPECTES BIOMECÀNICS A CONSIDERAR PER A OPTIMITZAR LA PROPULSIÓ | 50 |

| | |
|---|------------|
| 4. DETERMINACIÓ DELS FACTORS DE RENDIMENT EN NATACIÓ | 55 |
| 4.1 ANÀLISI DELS DIFERENTS FACTORS QUE AFECTEN A LA PROPULSIÓ | 56 |
| 4.1.1 DETERMINACIÓ DE LA RESISTÈNCIA DE L'AIGUA | 56 |
| 4.1.1.1 Estudis sobre la resistència passiva | 56 |
| 4.1.1.2 Estudis sobre la resistència activa | 58 |
| 4.1.2 DETERMINACIÓ DE LA FORÇA APLICADA | 61 |
| 4.1.2.1 Determinació de la força general | 61 |
| 4.1.2.2 Mesures indirectes | 63 |
| 4.1.2.3 Mesures directes | 64 |
| 4.1.3 INTERACCIÓ DELS DIFERENTS FACTORS BIOMECÀNICS I ENERGÈTICS | 68 |
| 4.2 DETERMINACIÓ DE LES VARIABLES CINEMÀTIQUES DEL CICLE | 74 |
| 4.2.1 FREQUÈNCIA I LONGITUD DE CICLE | 74 |
| 4.2.2 FASES DE LA BRAÇADA | 78 |
| 4.2.3 ÍNDEX DE COORDINACIÓ | 79 |
| 4.2.4 DETERMINACIÓ DE LES VARIACIONS INTRACÍCLIQUES | 82 |
| 4.2.4.1 Variacions de velocitat intracíclics | 82 |
| 4.2.4.2 Variacions d'acceleració intracíclics | 89 |
| 4.3 POSSIBILITATS TECNOLÒGIQUES PER A AVALUAR LA TÈCNICA I L'EFICIÈNCIA PROPULSIVA | 95 |
| 4.3.1 CÀMERES DE VÍDEO | 95 |
| 4.3.2 VELOCÍMETRE | 97 |
| 4.3.3 ACCELERÒMETRE | 99 |
| 4.3.3.1 Principis de mesura dels sensors inercials | 99 |
| 4.3.3.2 Utilització de l'accelerometria en la recerca esportiva | 103 |
| 4.3.3.3 Utilització de l'acceleròmetre en l'anàlisi de la natació competitiva | 105 |
| 5. PROPOSTA D'ESTUDI I OBJECTIUS | 110 |
| 6. MATERIAL I MÈTODES | 114 |
| 6.1 SUBJECTES/MOSTRA | 114 |
| 6.2 DISSENY DE L'ESTUDI | 115 |
| 6.2.1 MATERIAL | 117 |
| 6.2.2 PROCEDIMENT | 119 |
| 6.2.3 VARIABLES D'ESTUDI | 122 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.3 | ANÀLISI ESTADÍSTIC | 129 |
| 7. | RESULTATS | 131 |
| 7.1 | ANÀLISI QUALITATIU DEL PATRONS ACCELERATIUS | 134 |
| 7.2 | ANÀLISI DESCRIPTIU I COMPARATIU ENTRE GÈNERE I INTENSITAT | 136 |
| 7.2.1 | RESULTATS DELS PARÀMETRES CINEMÀTICS DEL CICLE | 136 |
| 7.2.2 | RESULTATS DELS PARÀMETRES D'ACCELERACIÓ EN L'EIX HORIZZONTAL | 139 |
| 7.2.3 | RESULTATS DELS PARÀMETRES D'ACCELERACIÓ EN L'EIX LATERAL | 143 |
| 7.2.4 | RESULTATS DELS PARÀMETRES D'ACCELERACIÓ EN L'EIX VERTICAL | 147 |
| 7.3 | ANÀLISI FREQÜENCIAL DE LA SENYAL ACCELERATIVA | 151 |
| 7.4 | ANÀLISI RELACIONAL DELS DIFERENTS PARÀMETRES AMB LA VELOCITAT | 153 |
| 8. | DISCUSSIÓ | 155 |
| 8.1 | ANÀLISI QUALITATIVA DELS PATRONS ACCELERATIUS | 155 |
| 8.2 | ANÀLISI DE LES VARIABLES CINEMÀTIQUES DEL CICLE | 158 |
| 8.3 | ANÀLISI DE LES VARIACIONS DELS PATRONS ACCELERATIUS | 160 |
| 8.3.1 | ANÀLISI DE LES VARIACIONS D'ACCELERACIÓ EN L'EIX HORIZZONTAL | 161 |
| 8.3.2 | ANÀLISI DE LES VARIACIONS D'ACCELERACIÓ EN L'EIX LATERAL | 164 |
| 8.3.3 | ANÀLISI DE LES VARIACIONS D'ACCELERACIÓ EN L'EIX VERTICAL | 168 |
| 9. | CONCLUSIONS | 171 |
| 10. | BIBLIOGRAFIA | 175 |

AGRAÏMENTS

La realització d'aquesta tesi ha estat fruit d'un treball de molts anys, en els quals, hi ha hagut moltes persones que han estat al meu costat i sobretot han posat a la meva disposició la seva col·laboració per a poder dur a terme totes les tasques i per tant els vull expressar el meu agraïment:

- Al Dr. Mario Lloret, perquè des del primer moment em va mostrar la seva confiança i recolzament per a poder tirar endavant aquest projecte
- A tot l'equip del departament de recerca i doctorat de l'INEFC-Barcelona, que m'han facilitat tots els tràmits
- A la Dra. Rosa Angulo, que em va donar una primera guia i em va oferir la seva col·laboració per a resoldre qualsevol dubte
- Al Dr. Victor Tella, que com a expert en el tema, em va fer una revisió i crítica constructiva del projecte
- A en J. Jordi Cadens, coordinador tècnic de l'àrea esportiva de natació i aigües obertes de la RFEN, per a oferir-me la possibilitat d'assistir a les concentracions de nedadors d'aigües obertes i poder fer unes primeres proves de registre amb l'acceleròmetre
- A tots els entrenadors i clubs que m'han obert les portes per a poder monitoritzar als seus nedadors, gràcies als quals s'han pogut obtenir les dades de la tesi:
 - o El C.N. Mediterrani, amb en Jorge Pérez i en Txuma Rull
 - o El C.N. Mataró amb en Sergi Garcia
 - o El C.N. Atlètic Barceloneta amb en David Pol
 - o Al CAR de Sant Cugat amb en Luís Rodríguez
 - o Al C.N. Sabadell, amb en Fred Vergnoux i l'Eloi Gómez
- I sobretot a la meua parella, en Carlos, que ha estat sempre al meu costat i m'ha donat tot el seu suport i ànim per a lluitar junts en el dia a dia d'aquest llarg camí

ÍNDIX DE FIGURES

- Fig.2.1. (a) Impuls de sortida des d'una paret; (b) principi de formació d'esteles en l'aigua; (c) representació esquemàtica anàloga a (a); (d) representació esquemàtica anàloga a (b). Com es pot veure, v_{1c} és major que v_{1d} , ja que v_{2d} no és igual a zero. Esquema extret de Dejours, Bolis et al. (1987) _____ 6
- Fig.3.1.1. Efecte de la resistència de fricció en la capa límit. (a) mostra el moviment actual dels fluids al voltant d'una ala en immersió. (b) és un dibuix que mostra la raó de l'augment de la turbulència en el fluid (extret de Maglischo (2003)) _____ 14
- Fig.3.1.2. Resistència activa de l'aigua en funció de la velocitat en nedadors d'alt nivell, tant en el global (\bullet), com en cadascuna de les tres components: resistència de forma (P), de fricció (SF) i d'onada (W), extret de Pendergast, Capelli et al. (2006) _____ 15
- Fig.3.1.3. Patró de braçada del crol o estil lliure, adaptat de Toussaint and Truijens (2005) _____ 17
- Fig.3.1.4. Representació de l'angle d'atac (α) i de l'angle azimut (Ψ) de la mà respecte a la direcció del fluid, extret de Toussaint, Van den Berg et al. (2002) _____ 21
- Fig.3.1.5. Analogia de l'acció d'una hèlix i el moviment propulsiu subaquàtic del braç en l'estil crol (explicació i il·lustracions extretes de Maglischo (1993)) _____ 23
- Fig.3.1.6. Línies de flux al voltant de la mà. Podem diferenciar dos tipus de circulacions: la del flux que es desplaça u , i la del vòrtex generat v , extret de Toussaint and Truijens (2005) _____ 27
- Fig.3.1.7. Formació del vòrtex adherit i del vòrtex inicial en el moviment d'un objecte amb perfil d'ala, extret de Maglischo (2003) _____ 28
- Fig.3.1.8. (A) Generació de vòrtexs durant el moviment de la mà mitjançant la visualització de fluids (extret de Arellano, 2001); (B) Recreació generada pel programa informàtic CFD, extret de Minette, Machtsiras et al. (2009); (C) Combinació de dos mètodes d'anàlisi, filmació i PIV, extret de Matsuuchi and Muramatsu (2011) _____ 30
- Fig.3.1.9. Formació dels dos vòrtexs adjunts en una ala que es desplaça amb un elevat angle d'atac, extret de Dickinson (1996) _____ 32
- Fig.3.1.10. Formació teòrica de l'estela de vòrtex amb el moviment de l'aleta caudal d'un peix, extret de Videler (1999) _____ 35

| | |
|---|-----|
| Fig.3.1.11. Creació d'un gran i únic vòrtex en un moviment descendent de gran amplitud, extret de Dickinson (1996) | 36 |
| Fig.3.1.12. Moviment de rotació del braç amb el centre de gir (A) durant la fase de moviment enfora i gradient de velocitat creat al llarg del braç produint un flux axial en acceleració en direcció a la mà (esquema i explicació extreta de (Toussaint, Van den Berg et al. 2002)) | 37 |
| Fig.3.1.13. Els extrems dels filaments de cada zona s'ajunten formant una "V" i confirmant aquest flux axial en acceleració cap a la mà (imatges extretes de l'estudi de Toussaint, Van den Berg et al. (2002)) | 38 |
| Fig.3.2.1. Fases de la braçada en l'estil lliure, adaptat de Maglischo (2003) | 45 |
| Fig. 4.1.1. Visió esquemàtica lateral del MADsystem®, lateral i superior (on es veu la situació de totes les pales) (extret de Toussaint and Truijens 2005) | 60 |
| Fig.4.2.1. Components tècnico-tàctics del temps total de competició, adaptat de Arellano (2004) | 77 |
| Fig.4.2.2. Representació de la divisió del cicle per a la determinació del IdC, en un cas de patró de persecució (IdC<0), adaptat de Pelayo, Alberty et al. (2007) | 80 |
| Fig. 4.2.3 Variació intracíclica de la velocitat en l'estil crol (A), esquena (B), braça (C) i papallona (D), extret de Barbosa, Marinho et al. (2011) | 84 |
| Fig.4.2.4 Velocitat intracíclica del maluc (línia contínua) i del centre de masses (línia de guions) en un nedador en un test maximal, extret Psycharakis and Sanders (2009) | 86 |
| Fig.4.2.5. Exemple dels patrons de velocitat del cos i de la mà en estil lliure de Carrie Steinseifer, guanyadora 100m lliures JJO 1984, extret de Maglischo (2003) | 88 |
| Fig.4.2.6. Gràfica exemple d'un moviment de llançament, extret de Knight, Bristow et al. (2007) | 90 |
| Fig.4.3.1. Il·lustració de les visions en els diferents plans dels canvis en la situació de l'articulació metacarpofalàngica al llarg d'un cicle, extret de Ohgi, Ichikawa et al. (2003) | 96 |
| Fig.4.3.2. Esquema bàsic d'un acceleròmetre unidimensional (A) i tridimensional (B), extret de Luinge (2002) | 100 |
| Fig.4.3.3. Esquema bàsic d'un giroscopi, extret de Luinge (2002) | 101 |

| | |
|---|-----|
| Fig.4.3.4. Esquema bàsic d'una unitat de mesura inercial de 3 eixos de moviment i de gir, extret de Luinge (2002) | 101 |
| Fig. 6.1. Fotografia de l'aparell de registre RIPXX | 117 |
| Fig. 6.2. Fotografia del RIPXX dins de la funda submergible | 119 |
| Fig. 6.3. Situació de l'aparell RIPXX en els participants de l'estudi: en un noi, directament en el banyador (primera imatge) i en una noia, posant la part de baix d'un biquini per a subjectar-lo (segona imatge) | 120 |
| Fig. 6.4. Marc de referència dels eixos de l'acceleròmetre en el cos del nedador, on X indica els moviments cap endavant, Y els de costat a costat y Z els verticals, adaptat de Le Sage, Bindel et al. (2011) | 121 |
| Fig. 6.4. Representació gràfica de les dades obtingues amb l'acceleròmetre en els tres eixos i la delimitació dels cicles analitzats amb un mínim de l'eix lateral: primer gràfic, visió general, i segon gràfic, visió ampliada | 124 |
| Fig. 7.1. Registres d'acceleració en els tres eixos (en unitats g) obtinguts en els 3 tests de dos participants i les gràfiques comparatives dels registres de cada eix en les tres intensitats (nedador 1, gràfics de l'esquerra, i nedador 2 gràfics de la dreta) | 135 |
| Fig. 7.2. Representació gràfica de les diferències en la velocitat i les variables de cicle (SR, SL, SI) en funció del gènere per a les tres intensitats | 138 |
| Fig. 7.3. Representació gràfica de la mitjana en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "x" (horitzontal o antero-posterior) | 141 |
| Fig. 7.4. Representació gràfica de la mitjana en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "y" (medio-lateral) | 145 |
| Fig. 7.5. Representació gràfica de la mitjana en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "z" (vertical o supero-inferior) | 149 |
| Fig. 7.6. Polígon de freqüències de les dades acceleratives en les tres intensitats per a cada gènere | 152 |
| Fig. 8.1. Exemple del gràfic obtingut directament amb les dades de l'acceleròmetre per a un subjecte on es pot apreciar la caiguda important del mínim en cada cicle de l'eix lateral (Y) | 166 |

Fig. 8.2. Representació gràfica de les variacions en el registre (en unitats g) en l'eix "Y" o lateral en les tres intensitats per a un noi (primer gràfic) i una noia (segon gràfic) _____ 167

Fig. 8.3. Representació gràfica de les dades d'acceleració en l'eix vertical en les tres intensitats per a un noi i per a una noia _____ 170

ÍNDIX DE TAULES

| | |
|---|-----|
| Taula 2.1. Rècords del món i velocitats corresponents en diferents tipus de desplaçament en proves de durada similar, i cost energètic per a un subjecte masculí d'uns 70kg i 175cm d'alçada, extret de di Prampero (1986) | 8 |
| Taula 4.1.1. Mitjanes i desviacions estàndard dels dos grups a una potència de 1000W utilitzant equacions de regressió individual (extret de Toussaint 1990) | 72 |
| Taula 6.1. Característiques descriptives dels nedadors participants en l'estudi | 115 |
| Taula 6.2. Comparativa del rècord del món en 1500m al 2013 i els temps dels guanyadors en les proves d'aigües obertes del mundial de Barcelona 2013 per a determinar les intensitats relatives de nedo | 116 |
| Taula 6.3. Exemple per a un dels participants de l'estudi del càlcul dels temps per a cada prova o intensitat | 122 |
| Taula 6.4. Quadre exemple d'un dels participants per a la determinació de la mitjana de les dades de tres cicles en cada tram o llarg de piscina | 125 |
| Taula 7.1. Exemple dels tres quadres resum (un per a cada eix) amb la mitjana calculada de totes les variables per llarg i per prova per a un subjecte | 133 |
| Taula 7.2. Valors de la mitjana i la SD en les variables de velocitat i de cicle (SR, SL, SI) en funció del gènere per a les tres intensitats, les seves diferències i comparativa entre gèneres per a cada variable i intensitat | 136 |
| Taula 7.3. Valors de la mitjana i la SD en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "x" (horitzontal o antero-posterior), les seves diferències significatives i comparativa entre gèneres per a cada variable i intensitat | 139 |
| Taula 7.4. Valors de la mitjana i la SD en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "y" (medio-lateral), les seves diferències significatives i comparativa entre gèneres per a cada variable i intensitat | 143 |
| Taula 7.5. Valors de la mitjana i la SD en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "z" (vertical o supero-inferior), les seves diferències significatives i comparativa entre gèneres per a cada variable i intensitat | 147 |

| | |
|---|-----|
| Taula 7.6. Mitjana i SD dels valors d'acceleració en l'eix d'avanç en cada interval per a cada intensitat en funció del gènere i diferències significatives ($p < 0,05$) amb les intensitats anteriors i amb l'altre gènere _____ | 151 |
| Taula 7.7. Correlacions dels diferents paràmetres amb la velocitat en cadascuna de les tres intensitats (85%, 90% i 95%) i per al global de les tres, marcant les que presenten una correlació significativa _____ | 153 |
| Taula 8.1. Comparativa entre les dades de l'estudi de Zamparo (2005) i les obtingudes en el present estudi _____ | 158 |

1. RESUM / ABSTRACT

L'estudi de les variacions intracíclics de les acceleracions (IAV) és un paràmetre que permet valorar les conseqüències de la combinació de forces propulsives i resistives resultants en el cos, les adaptacions del gest tècnic a les condicions canviants del medi i la coordinació tècnica global. Un valor reduït d'aquest paràmetre ens indica que les modificacions són adequades, alhora que es limita la despesa energètica, aspecte molt important en general per al rendiment, però sobretot en les especialitats de fons com la natació en aigües obertes, en les quals l'economia és un factor clau.

Amb aquest objectiu, es planteja un estudi per a determinar les IAV en nedadors de llarga distància a diferents ritmes competitiu, per tal de poder determinar els paràmetres habituals dels seus patrons acceleratius (mitjana, desviació típica, mitjana quadràtica, màxim, mínim i amplitud), les variables cinemàtiques de cicle (freqüència, longitud i índex de cicle), com es modifiquen amb els canvis d'intensitat, les diferències entre gènere, i la correlació de cada paràmetre amb la velocitat de nedo. En l'estudi van participar 12 nedadors i 9 nedadores d'elit d'aigües obertes, que van realitzar tres proves de 500m a tres intensitats competitiu (85%, 90% i 95% del ritme de 1500m), registrant les IAV mitjançant un acceleròmetre triaxial situat en la zona lumbo-sacra. Les diferències significatives ($p < 0,05$) es van determinar amb la prova de Wilcoxon i correlacions de Spearman.

Els resultats mostren que cada nedador presenta un perfil gràfic característic, que es manté tot i els canvis d'intensitat. Els paràmetres cinemàtics del cicle presenten diferències significatives en les tres intensitats i entre els dos gèneres, correlacionant totes elles amb la velocitat excepte en la longitud de cicle per als nois.

Pel que fa als patrons acceleratius, en l'eix horitzontal trobem diferències entre les tres intensitats per als nois en totes les variables, mentre que en les noies, els valors del 90% són els més elevats, de manera que les diferències entre gèneres són significatives excepte per al 90% en la majoria de paràmetres excepte la RMS. En l'eix lateral, les dades presenten diferències molt menors, de manera que en els nois majoritàriament només el 85% és inferior i en les noies el 95% és superior, però els registres d'ambdós gèneres són diferents en tots els casos. Finalment, en l'eix vertical,

els nois i les noies presenten resultats semblants, canvis progressius i significatius en la SD, màxim, mínim i amplitud, mentre que la mitjana i la RMS només es modifiquen en el 95%, però els valors absoluts només presenten diferències entre gèneres en la SD, el mínim i l'amplitud.

La correlació de totes les variables acceleratives amb la velocitat de cada prova i en el global de les tres en l'eix d'avanç, mostra coeficients significatius en totes les variables menys el mínim per als nois i només en la mitjana, el màxim i el mínim en les noies; en l'eix lateral, els coeficients són molt menors i només varien en totes les intensitats en el mínim i l'amplitud en els nois i el màxim i la mitjana per a les noies; i finalment en l'eix vertical, les noies presenten moltes correlacions elevades, en la SD, el màxim, el mínim i l'amplitud, mentre que en els nois només el mínim presenta una correlació elevada, ja que la RMS, la SD i l'amplitud tenen relacions mitges.

Per tant, aquest tipus d'estudi ofereix molta informació sobre la capacitat propulsiva resultant de l'adaptació tècnica i coordinativa de cada nedador, presentant-se com una eina pràctica per a fer una monitorització tècnica dels nedadors i millorar el control d'aquest aspecte.

ABSTRACT

The intracyclic acceleration variations (IAV) are the sum of the resultant braking and propelling forces, resulting in the swimming speed, thus becoming an important performance parameter. With the aim of analysing the usual acceleration profiles and kinematic stroke variables in endurance swimmers and the gender and speed differences, 12 males and 9 females elite open water swimmers swam three 500m freestyle tests at 85%, 90% and 95% of their 1500m pace. Using a 3D accelerometer device situated in the sacrum, 3 cycles per length were selected and the mean, SD, RMS, maximum, minimum and rang of the acceleration signal, as well as SR, SL and SI were determined. Statistical analysis ($p < 0,05$) was made using Wilcoxon test and Spearman correlations.

Results show a specific acceleration profile for each swimmer in all the tests and significant differences for stroke parameters in the 3 paces and between gender, as well as significant correlations with velocity except SL for men.

Regarding the acceleration signal, in the horizontal axis, men show increasing and statistically different values in all variables, and differences from those of women except for the 90% values and all the RMS, because women had 90% values higher than the other two. For men, all of the variables except the minimum had high ($\rho > 0,5$) correlations, but only the mean, maximum and minimum for women.

In the lateral axis, only the 85% variables for men and the 95% for women were different from the other two, but gender differences were significant in all paces. Correlations were smaller ($\rho 0,1-0,5$) and only for minimum and rang in men, and maximum and mean for women.

In the vertical axis, both genders show significant changes in the three paces in SD, maximum, minimum and rang, while only at 95% for the mean and RMS values. Gender differences were found for SD, minimum and rang. Women show high correlations for SD, maximum, minimum and rang, while only minimum for men.

This study confirms the accelerometer possibilities to determine the propulsive resultant force, so being a good tool to improve swimmers technical and coordinative adaptations to each task.

2. INTRODUCCIÓ

En l'esport d'alt rendiment actual, el nivell dels esportistes és cada vegada més alt i alhora més igualat entre els mateixos. Petits detalls poden provocar grans diferències en el rendiment i resultat, de manera que quan es vol investigar els diferents factors que poden ser determinants en l'assoliment de grans marques o resultats, cada vegada cal ser, per una banda, molt més precís en les dades obtingudes, el que implica la utilització d'aparells tecnològics que permetin monitoritzar qualsevol petit moviment o canvi fisiològic amb una elevada precisió; i per una altra banda, intentar poder analitzar als millors (investigar els esportistes l'elit) i en les condicions el més semblants possibles a les de la competició.

La natació és una de les especialitats esportives que suposa més reptes en la determinació dels factors de rendiment, ja que la locomoció de l'ésser humà en el medi aquàtic presenta importants limitacions: a nivell motriu, ja que no estem preparats morfològicament per a poder avançar eficientment en aquest medi; a nivell propulsiu, ja que l'aplicació de forces presenta moltes particularitats comparada amb la del medi terrestre; i també a nivell d'anàlisi, ja que la visió dels moviments és força complicada i la utilització d'aparells queda molt limitada per la possibilitat de submergir-los, d'evitar que interfereixin en el gest tècnic del nedador, i que puguin analitzar el gest tècnic en tota la seva globalitat i en un context natural.

El problema principal de la natació, plantejat per Martin, Yeater et al. (1981) i en la revisió de Toussaint and Beek (1992), és que en general, per a poder assolir el millor rendiment, la teoria es basava en la segona llei de Newton o llei fonamental de la dinàmica, segons la qual tot cos sobre el qual actua una força es mou de tal manera que la variació de la seva quantitat de moviment respecte al temps és igual a la força que produeix el moviment, i s'expressa amb l'equació:

$$F = m * a$$

Si diverses forces actuen simultàniament sobre un cos també podem aplicar aquesta fórmula fonamental de la dinàmica, sent la força que afecta al cos la resultant de totes les forces a les quals està sotmès. En el cas de buscar la propulsió del propi

cos, com en la natació, cal considerar que la força que permet el desplaçament prové de la superfície sobre la qual s'aplica la mateixa, segons la 3a llei de Newton o llei d'acció i reacció: sempre que un cos exerceix força sobre un altre, aquest segon exerceix una força igual i de sentit contrari sobre el primer.

Però en l'especialitat esportiva de la natació, on el desplaçament es realitza en el medi aquàtic, aquest principi perd molt protagonisme perquè la força aplicada pel nedador no es tradueix tota en acceleració. Només una part de la mateixa es tradueix en una força d'avanç o força propulsiva, ja que com que ens recolzem en un mitjà viscos (l'aigua), part de la força aplicada es transfereix a l'aigua en forma d'energia cinètica, de manera que aquesta adquireix velocitat i es desplaça (fig.2.1.).

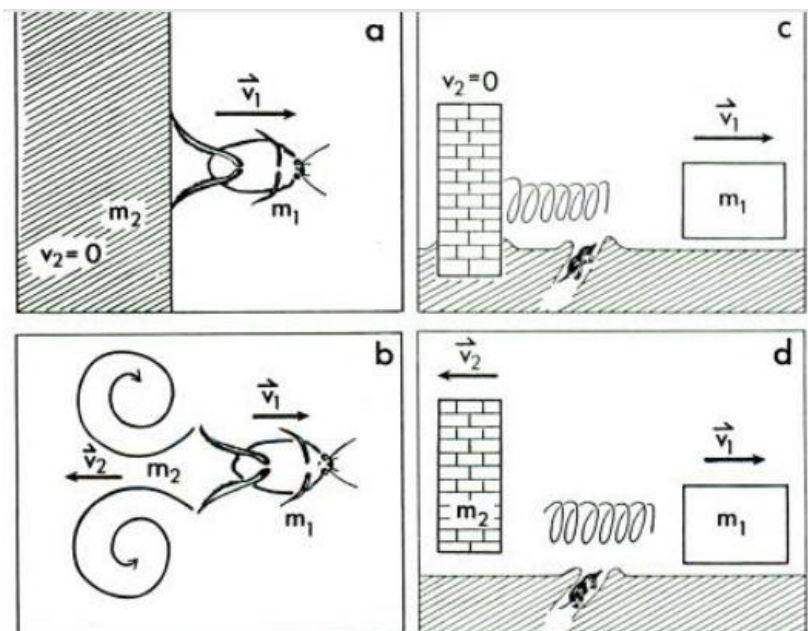


Fig.2.1. (a) Impuls de sortida des d'una paret; (b) principi de formació d'esteles en l'aigua; (c) representació esquemàtica anàloga a (a); (d) representació esquemàtica anàloga a (b). Com es pot veure, v_{1c} és major que v_{1d} , ja que v_{2d} no és igual a zero. Esquema extret de Dejours, Bolis et al. (1987)

Aquest fet provoca dues situacions crítiques per al nedador (que s'explicaran més detalladament en l'apartat de propulsió): per una banda, només una part de la força aplicada es transforma en una força de reacció que permet la propulsió, i per una altra, la velocitat adquirida per l'aigua sobre la que s'ha actuat, limita la possibilitat de poder seguir impulsant-se sobre la mateixa, i cal buscar noves masses sobre les quals aplicar força que estiguin "quietes", dificultant el gest tècnic propulsiu. Aquests factors fan

que la natació sigui un dels esports amb menys eficiència (relació entre la despesa energètica i distància recorreguda, kJ/m), concretament inferior al 10% (di Prampero 1986).

Per una altra banda, segons el principi d'inèrcia o primera llei de Newton, un cos mantindria la velocitat assolida indefinidament si no tingués cap resistència o força actuant sobre el mateix. Aquest cas és només hipotètic, ja que sobre tots els cossos en moviment actuen forces de fricció que el faran aturar tard o d'hora, però en la natació, aquestes forces de fricció adquireixen molta importància, ja que el medi en el qual es mouen els subjectes, l'aigua, és un fluid molt dens, concretament $998,2 \text{ kg/m}^3$, un valor que és pràcticament 800 vegades més elevat que el de l'aire ($1,205 \text{ kg/m}^3$), de manera que la resistència del medi o forces de "frenada" és molt elevada i de seguida perd la velocitat assolida si no es segueix generant força propulsiva.

Aquesta força o resistència de frenada (*drag* en anglès, simbolitzada com a D) depèn principalment de la velocitat de desplaçament, ja que augmenta proporcionalment al quadrat de la mateixa segons la fórmula:

$$D = K v^2$$

on K és una constant que depèn principalment del volum i la forma de l'objecte que s'obre pas per l'aigua, és a dir de l'aigua que desplaça. Quan menor és aquesta constant, menor és la resistència.

Alhora, la força necessària per a vèncer aquesta resistència o *drag* també depèn de la velocitat,

$$F_d = D * v$$

de manera que la relació força-velocitat passa a ser cúbica:

$$F_d = K v^3$$

convertint aquesta resistència en un element clau quan ens desplaçem a gran velocitats, i alhora limitant que aquesta velocitat pugui ser molt elevada.

Finalment, cal dir que per a determinar la resultant de la força propulsiva (F_p) que actua en el nedador cal extreure la força necessària per a vèncer aquesta resistència de frenada (F_D):

$$F_p - F_d = m \cdot a$$

Quan ambdues forces s'equilibren la velocitat de desplaçament és constant ($a = 0$), i per a poder anar més ràpid cal superar la resistència de l'aigua ($F_p > F_d$).

Resumint, en base als aspectes exposats anteriorment, quan analitzem els factors determinants per al rendiment (generalment velocitat assolida) en natació, cal considerar dos aspectes bàsics, minimitzar la resistència de l'aigua i maximitzar la força propulsiva, tot i que la clau per a un màxim rendiment és la interacció entre ambdós o l'eficiència propulsiva, és a dir, la relació entre la força que genera avanç i la producció total de força de l'organisme (Toussaint and Truijens 2005). Com a curiositat, di Prampero (1986) va fer un article on feia una comparativa del cost energètic de diferents mitjans de desplaçament en l'àmbit esportiu, i podem veure com la natació és l'activitat on l'organisme humà presenta una eficiència més baixa (taula 2.1.):

| | Distància | Temps record (s) | Velocitat record (m/s) | Despesa energètica (kJ/km) |
|------------------------------|-----------|------------------|------------------------|----------------------------|
| Natació estil lliure | 1,5 | 894,56 | 1,677 | 1400 |
| Caminar competitiu | 3 | 788,09 | 3,807 | 356 |
| Cursa a peu | 5 | 780,40 | 6,407 | 300 |
| Patinatge de velocitat (gel) | 10 | 874,33 | 11,437 | 175 |
| Ciclisme | 10 | 713,20 | 14,021 | 160 |

Taula 2.1. Rècords del món i velocitats corresponents en diferents tipus de desplaçament en proves de durada similar, i cost energètic per a un subjecte masculí d'uns 70kg i 175cm d'alçada, extret de di Prampero (1986).

Això ens situa davant d'un esport en el qual l'anàlisi dels aspectes biomecànics té més importància que els energètics (Pelayo, Alberty et al. 2007), ja que qualsevol millora en aquesta eficiència propulsiva suposa canvis en el rendiment proporcionalment superiors, convertint aquest aspecte en la principal diferència entre els nedadors d'elit i els de menor nivell, de manera que cal centrar-se en definir el gest tècnic òptim i analitzar la tècnica dels nedadors per a assegurar que la mateixa s'està realitzat correctament, corregir-la en cas necessari i així buscar el màxim rendiment.

Per això, la primera part (capítol 3) del marc teòric d'aquesta tesi doctoral es basarà en l'anàlisi d'aquest aspecte, la propulsió en natació, analitzant, inicialment

(apartat 3.1), l'evolució dels diferents principis hidrodinàmics que històricament s'han utilitzat per a poder explicar com els organismes poden avançar en el medi aquàtic i l'aplicació dels mateixos en la natació competitiva per a poder definir específicament com l'ésser humà aconsegueix avançar a l'aigua. Com que la majoria dels conceptes que s'expliquen són força tècnics, tenen una nomenclatura molt científica, i molts d'ells només es troben en fonts bibliogràfiques en llengua anglesa i per tant són de difícil traducció, en el text sempre es cita el nom en anglès entre parèntesi.

Posteriorment (apartat 3.2), en aquest mateix capítol, es presenta un esquema general bàsic del gest tècnic més adequat per a l'estil lliure o crol i els principis biomecànics que afavoreixen la propulsió, ja que hi ha una important individualització de la tècnica en funció de les característiques específiques de cada nedador i la seva adaptació al medi, de manera que, per a poder aconseguir una bona propulsió, cal tenir en compte l'assoliment d'aquests principis.

Però quins són els factors que ens permeten determinar que la tècnica està sent adequada? Com es veurà en la segona part del marc teòric (capítol 4), que fa referència a la determinació dels factors que poden ser claus per a l'anàlisi del rendiment dels nedadors, els diferents estudis científics relacionats amb aquest tema han analitzat molts aspectes, com són la resistència del medi, les forces generades, l'eficiència del moviment o l'anàlisi de la tècnica de la braçada, per a poder determinar els valors habituals dels mateixos en nedadors d'alt rendiment i quina és la seva rellevància en els resultats assolits. En un darrer apartat d'aquest capítol (4.3.), es fa un anàlisi comparatiu dels aparells que s'han utilitzat en els diferents estudis realitzats, per tal de poder determinar quin pot ser el millor instrument per a poder quantificar el rendiment dels nedadors.

Però molts d'aquest factors són molt teòrics, es basen en estudis força complexos, que requereixen coneixements força tècnics, aparells costosos i a l'abast de molt pocs, limitant la seva utilització, sobretot pel que fa a les distàncies analitzades, i sobretot la possibilitat de poder transferir els coneixements generats a l'entrenador i al nedador. Per això, es considera que la natació, per totes les característiques específiques

plantejades inicialment i la dificultat del seu anàlisi, planteja el repte de proposar un estudi en el qual es pugui analitzar de la millor manera possible als nedadors, és a dir, amb unes dades o variables que defineixin el millor possible les característiques del nedador i que es puguin extreure en el seu nedo habitual, però que alhora siguin de fàcil obtenció i amb aparells senzills i assequibles que no limitin el gest tècnic, es puguin utilitzar durant distàncies relativament llargues, i que tinguin una aplicació pràctica per a l'anàlisi de la tècnica del nedador per part de l'entrenador i per tant es puguin utilitzar per a poder millorar la qualitat dels entrenaments i la determinació de les possibilitats de rendiment.

Per una altra banda, com que en la majoria de la bibliografia relacionada, majoritàriament els estudis s'han realitzat amb nedadors d'especialitats competitives de curta o mitja distància, que són les habituals de les competicions de piscina d'alt nivell, es considera que seria interessant analitzar a nedadors de fons, és a dir, aquells que competeixen regularment en proves d'aigües obertes, ja que els requeriments tant tècnics com sobretot energètics dels mateixos són clarament diferents i per tant seria interessant poder definir bé les seves característiques biomecàniques per a poder treballar adequadament en la millora del seu rendiment específic.

En base a aquestes premisses, a partir del capítol 5 es plantejarà i desenvoluparà un estudi on s'analitzarà a nedadors d'elit de fons, concretament les variacions d'acceleració intracíclics a les seves intensitat competitives, per a poder ampliar aquesta base de coneixement.

3. LA PROPULSIÓ EN NATACIÓ

3.1 HIDRODINÀMICA APLICADA A LA PROPULSIÓ EN NATACIÓ

Fins als anys 60, la descripció de la mecànica de la braçada es va fer de manera molt intuïtiva, basant-se en mètodes de caràcter empíric, però a mesura que es va començar investigar sobre el tema i es va anar utilitzant la tecnologia en els mateixos, es va produir una ràpida evolució de la descripció de la tècnica de nedo i de les possibles teories de la propulsió en natació.

Al mateix temps que s'avançava en la recerca sobre el tema, també calia determinar quins eren els principis hidrodinàmics que explicaven les teories proposades. Amb aquests principis, es pretenia determinar la manera com es generen forces propulsives que permeten als nedadors desplaçar-se nedant per l'aigua i alhora definir quina és la manera més eficaç de fer-ho, ja que el medi aquàtic presenta uns condicionants molt específics, principalment per la seva elevada densitat i la falta d'una superfície fixa per a exercir la força, que fan que el manteniment d'una bona tècnica sigui gairebé el factor més important en el rendiment en aquesta especialitat esportiva.

3.1.1 RESISTÈNCIA DE L'AIGUA I FORÇA D'ARROSSEGAMENT

3.1.1.1 Conceptes bàsics de la resistència d'arrossegament

Quan un cos travessa l'aigua, com que aquesta és un mitjà viscos, les làmines d'aigua s'han de separar cap amunt i cap avall per tal de fer un forat perquè hi passi el cos, de manera que s'altera el flux laminar (quan totes les molècules es mouen en la mateixa direcció) i les molècules d'aigua es comencen a barrejar entre elles movent-se de manera aleatòria, convertint-se en un flux d'aigua turbulent. Aquestes molècules s'introdueixen en les capes d'aigua adjacents laminars, augmentant també el seu patró

de turbulència. Aquesta turbulència augmenta la pressió immediatament anterior i lateral, creant com una paret que frena la velocitat d'avanç del nedador.

Al mateix temps, just després de "trençar" l'aigua, darrere del nedador el fluid queda turbulent i les molècules només omplen parcialment el forat creat, de manera que la pressió es considerablement menor que davant del cos, succionant el nedador enrere, fent que encara augmenti més la dificultat a l'avanç en el medi. Aquest fenomen rep el nom de *cavitació o succió de cua*, i la durada i quantitat d'aquest efecte, és a dir, el temps que triga l'aigua en tornar a tindre un comportament laminar depèn de la quantitat d'aigua alterada i el patró de turbulència creada. Per tant, quan menys s'alteri l'aigua, menys efecte de frenada tant per davant com per darrere.

La major o menor alteració de la circulació en un medi depèn del que s'anomena nombre de Reynolds, factor adimensional que es deriva de la relació entre la força d'inèrcia i la força de viscositat d'un fluid. El càlcul d'aquest factor es basa en el coeficient entre la densitat del fluid (ρ), el diàmetre del tub per on circula (D) i la velocitat del flux (v) dividida per la viscositat del medi (η):

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}$$

En base a aquest factor, es defineixen dos tipus de comportaments: flux laminar, amb un elevat nombre de Reynolds, en el qual les forces convectives són menors que les forces viscoses i flux turbulent, amb un nombre de Reynolds baix, on predominen les forces viscoses.

Per una altra banda, quan el cos es mou endavant, per l'efecte de la viscositat, el contacte entre la pell i l'aigua crea un efecte friccional entre les corrents de molècules i la pell, i alhora entre les diferents capes de fluid adjacents, provocant que les mateixes tinguin tendència a enganxar-se i per tant frenar-se. Aquest patró continua capa a capa fins que a una certa distància del cos, la quantitat de fricció entre les molècules d'aigua es tan petita que no té cap efecte. Totes aquestes capes de corrents d'aigua arrossegades amb el moviment del cos reben el nom de capa límit (*boundary layer* en anglès), la qual està formada per una fina capa de fluid enganxada (velocitat zero) al

cos en moviment en les cares frontals de la superfície propulsiva respecte a la direcció d'avanç, i una sèrie de fines capes de fluid amb un gradient positiu de velocitat a mesura que ens allunyem de la superfície fins a assolir la velocitat de fluid lliure. Com que les molècules remogudes enlloc de ser desplaçades s'enganxen al cos del nedador, s'arrossegueu com una massa afegida al cos en moviment, augmentant la resistència i disminuint la velocitat, de manera que fa augmentar la força necessària per a desplaçar-se.

Per tant, en un mitjà viscos, podem diferenciar tres principals components de la resistència al avanç generada:

- la resistència frontal o de forma

Inicialment, és la més important de les tres i ve determinada per la superfície frontal i forma del cos quan es desplaça per l'aigua, que determinarà la major o menor separació de les línies de flux i succió resultant de la zona de baixa pressió posterior.

Aquesta resistència es pot minimitzar amb una millora de la tècnica, ja que augmenta quan el cos s'allunya d'una bona posició hidrodinàmica, és a dir, si perd la horitzontalitat, si realitza moviments laterals o si la seva àrea frontal és molt gran, és a dir, que no té una forma cònica o de torpede. Però també depèn d'altres factors no modificables com la densitat del fluid, la velocitat de desplaçament del cos, i sobretot factors antropomètrics com són l'àrea frontal del nedador i la seva flotabilitat, determinada en base a la tendència a enfonsar-se de les cames (*torque* en anglès).

- la resistència de fricció

És la resistència generada per la capa límit que s'arrossega amb el moviment del cos. A més, aquesta capa té tendència a ser separada fàcilment, perquè les molècules d'aigua turbulentes alliberades que es queden rebotant en les capes adjacents, topen amb aquesta capa i la van desenganxant poc a poc, creant una zona que es va ampliant progressivament i quan adquireix una mida considerable

separa la capa límit i augmenta encara més l'efecte de massa afegida, augmentant els seus efectes de frenada i per tant la resistència de l'aigua (fig.3.1.1.).

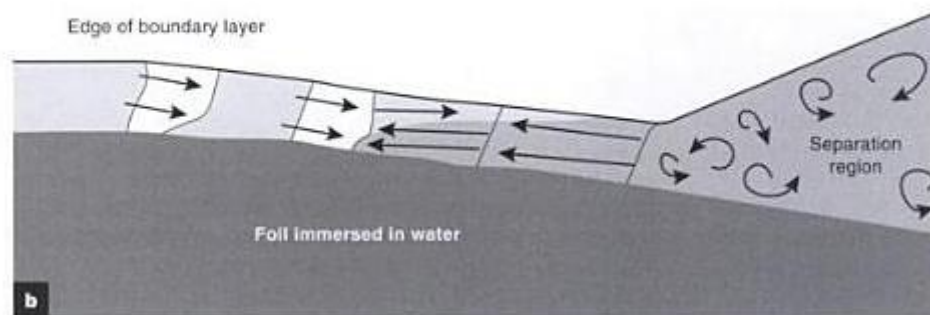


Fig.3.1.1. Efecte de la resistència de fricció en la capa límit. (a) mostra el moviment actual dels fluids al voltant d'una ala en immersió. (b) és un dibuix que mostra la raó de l'augment de la turbulència en el fluid (extret de Maglíscho (2003)).

El factor que més influeix en aquesta resistència és el caràcter pla o rugós de la superfície, ja que provocarà que el fluid tangencial sigui més o menys laminar o turbulent, tot i que el comportament que adquireix aquest fluid “enganxat” també depèn de la forma i velocitat de l'objecte i la densitat i viscositat del medi, aspectes que es resumeixen en el nombre de Reynolds específic de cada fluid en cada condició específica (mida de l'objecte, orientació i velocitat i direcció del moviment).

La resistència de fricció és la que té menys importància relativa en la resistència global de l'aigua (fig.3.1.2.), tot i que quan analitzem els factors que influeixen en el rendiment dels nedadors d'elit, qualsevol factor pot ser important

en el resultat final. Els banyadors de darrera generació que s'utilitzen actualment en l'alta competició busquen millorar aquest aspecte amb teixits que proporcionin una superfície que generi menys turbulències en la capa límit (menys resistència per alteració fluid del voltant), la qual s'ha aconseguit reproduint la pell dels taurons, que presenta escames dentades microscòpiques en forma de "V" anomenades *ribets*. Indirectament, aquest teixit també facilita la creació de bombolles d'aigua al voltant de manera que permet millorar la flotació del nedador artificialment i per tant disminuir la resistència de forma, i per una altra banda la compressió de la superfície corporal limita la seva deformitat i per tan les possibles turbulències generades (Craik 2011).

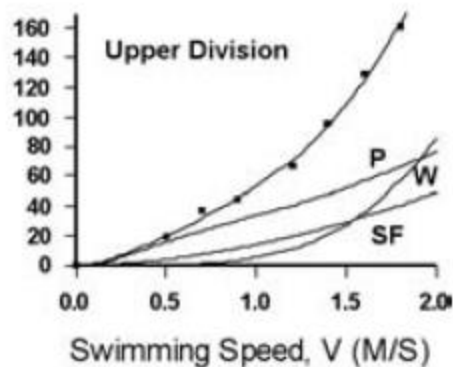


Fig.3.1.2. Resistència activa de l'aigua en funció de la velocitat en nedadors d'alt nivell, tant en el global (•), com en cadascuna de les tres components: resistència de forma (P), de fricció (SF) i d'onada (W), extret de Pendergast, Capelli et al. (2006)

- la resistència d'onada

Apareix quan el cos es desplaça en la interfase entre l'aire i l'aigua, ja que, com a conseqüència de l'avanç i dels moviments ascendents i descendents dels segments corporals, es produeixen onades en la massa d'aigua per davant del nedador, fent que aquestes actuïn com una segona paret que cal travessar i per tant suposant un fre important. Aquesta turbulència també crea una zona d'alta pressió davant del nedador, que frena el moviment de l'avanç, i per darrere una zona de baixa pressió que provoca un efecte de succió produït pel dèficit de moment de l'estela a causa de la separació de les línies de corrent i la mà.

La mida de l'onatge format augmenta amb els moviments del nedador, però també depèn de la velocitat d'avanç, de manera que la resistència que genera augmenta en proporció al cub de la velocitat, fent que l'efecte de frenada d'aquesta resistència sigui molt important quan ens desplaçem a altes velocitats (fig.3.1.2). Aquesta relació s'aprecia en l'augment de la longitud de l'onada (distància de cresta), o vist d'una altra manera, en l'augment la depressió posterior que genera aquesta onada, que suposa una zona de succió que frena l'avanç.

Hi ha una velocitat límit en la qual la longitud d'onada es fa la mateixa que l'alçada o longitud del nedador, que rep el nom de *hull-speed* en anglès (la traducció literal seria *velocitat del casc*, ja que el concepte prové de la enginyeria naval), i es considera la velocitat màxima que pot assolir un cos que es desplaça per l'aigua, ja que queda atrapat en la seva pròpia onada de manera que no pot anar més ràpid. Per tant, per a una mateixa forma del cos, un nedador més alt es podrà desplaçar més ràpidament que un més baix. Concretament, la diferència de pressions generada pel nedador en l'aigua (patró d'onada), es calcula per un factor anomenat *nombre de Froude* (Fr):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * L}}$$

Una manera de poder augmentar aquesta velocitat màxima, limitada per l'alçada del nedador, és allargar el braç endavant en la seva entrada a l'aigua, fent que augmenti la longitud total del cos i per tant la velocitat màxima assolible.

Un tipus especial d'aquesta resistència d'onada es l'anomenada *resistència per empenta* (Maglischo 2003), que es genera quan s'empeny l'aigua endavant, de manera que el principi de Newton d'acció-reacció es produeix en contra del nedador, rebent una important força cap enrere que el frena. Les accions més típiques en les que es produeix aquesta impulsió de l'aigua endavant són el recobriment de les cames en l'estil braça, ja que les mateixes quasi es posen perpendiculars a l'avanç; en el recobriment dels braços en la papallona si aquest es fa fregant l'aigua, i en l'entrada dels braços en els estils de crol, esquena i papallona, que trenquen molt l'aigua si no es fa suaument.

Aquestes resistències al moviment tant elevades, resultants de la pròpia viscositat o densitat del medi i del moviment del nedador, també són les que permeten que les zones on l'aigua està més quieta actuïn com a superfícies relativament sòlides on el nedador s'hi pot recolzar i per tant es pot crear propulsió procedent de la reacció en sentit contrari de la força aplicada (principi d'acció i reacció de la tercera llei de Newton), anomenada força d'arrossegament o *drag* en anglès. Per tant, la viscositat és alhora un fre i una possibilitat d'aplicació de forces, de manera que cal gestionar adequadament aquests dos factors per tal de poder assolir els majors beneficis propulsius, minimitzant les resistències resultants.

3.1.1.2 Teories propulsives basades en la força d'arrossegament

En base a aquest principi, inicialment, es va proposar la teoria de la propulsió per arrossegament (*paddling* en anglès), el mateix sistema que la roda d'un molí d'aigua o d'un rem, com a mètode propulsiu: aplicar una força a l'aigua de manera que la força de reacció, contrària a la direcció d'avanç (cap enrere), permet impulsar-se endavant.

Després, amb els estudis que va fer Counsilman des de 1969, mitjançant l'anàlisi de filmacions subaquàtiques i situant llums a les mans (Brown i Counsilman, 1971,) es va registrar que les mans realitzen trajectòries curvilínies (fig.3.1.3.), principalment amb moviments verticals i laterals, i es va proposar la teoria de tracció sinusoïdal o en forma de "S" (*weaving-back theory* en anglès) (Maglischo 2003).

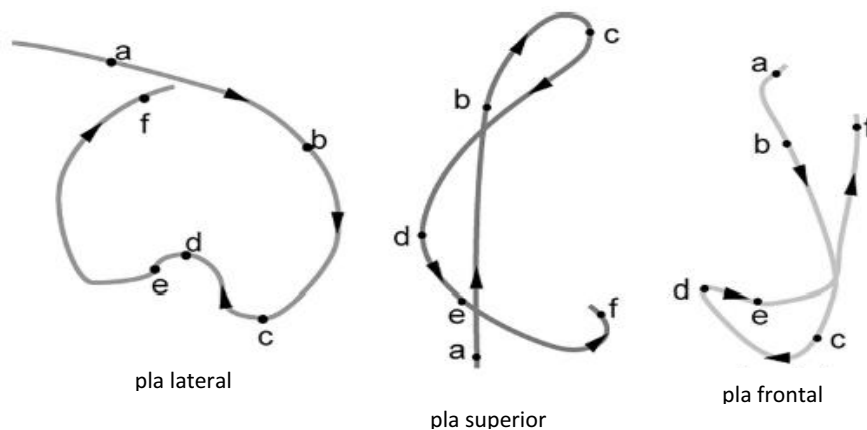


Fig.3.1.3. Patró de braçada del crol o estil lliure, adaptat de Toussaint and Truijens (2005)

L'argument d'aquesta nova proposta tècnica es basava en la solució al problema que presenta la impulsió en l'aigua o qualsevol mitjà viscos: en aplicar-hi força, aquesta adquireix un moment o velocitat, dificultant molt la possibilitat de seguir recolzant-se sobre la mateixa, ja que es desplaça enrere, i la mà "patina". L'única manera possible seria moure la mà més ràpid que l'aigua accelerada, però això implicaria una elevada velocitat de moviment, fet que suposaria un esforç muscular molt elevat. Per això, es dedueix que aquests moviments en "S" busquen evitar la massa d'aigua prèviament accelerada i ampliar la superfície propulsiva buscant masses noves, quietes, que puguin servir per a recolzar-s'hi i obtenir la màxima propulsió cada vegada. Es proposa que una propulsió eficaç s'obté empenyent una gran massa d'aigua amb poca acceleració (Counsilman, 1971, citat per Arellano, 1999), de manera que aquesta no adquireixi gaire velocitat, es desplaci poca distancia i permeti un major recolzament i durant més temps.

Com a confirmació, posteriorment Schleihau (1977) i altres investigadors, van observar que si s'analitza el moviment de les mans respecte a l'aigua i no respecte al cos, aquestes es desplacen molt poc enrere (pla horitzontal respecte a l'aigua), sent el cos el que es desplaça endavant (la mà surt pràcticament en el mateix lloc que ha entrat). Inicialment, erròniament, s'havien analitzat els moviments respecte al propi cos, de manera que es pensava que la mà anava cap enrere, ja que començava estirada per davant del cap i acabava tocant la cuixa.

Aquest fet, és la millor mostra de que la impulsió es realitza trobant una superfície relativament ferma, de manera que la mà no es desplaci molt enrere, sinó que sigui el cos el que avança, fent que el moviment sigui pràcticament en cadena cinètica tancada, on l'escurçament dels músculs responsables del moviment es fa per a mobilitzar el tronc en base a les extremitats.

Fins a aquell moment però, les dades que es tenien sobre la tècnica en natació eren principalment qualitatives. Els primers estudis per a analitzar la tècnica de forma

quantitativa es van realitzar amb motiu dels Jocs Olímpics de 1984, per un equip de científics liderats per Schleihaufer i Maglischo, que mitjançant un anàlisi tridimensional (3D) tant per sobre com per sota l'aigua per a poder avaluar totes les fases del moviment, van obtenir les primeres gràfiques de la trajectòria de les mans en el nedo dels 4 estils i per tant van poder definir les principals característiques de la braçada (Maglischo 1993).

Els resultats obtinguts en aquest estudi van confirmar que la component horitzontal (respecte a l'aigua) del moviment era molt petita, i en canvi la mà es movia principalment en els plans vertical i lateral. Amb aquestes dades, es va pensar que la contribució de la força de resistència o *drag* en exclusiva, és a dir, la resultant directa del moviment en sentit contrari al d'avanç, no podia ser gaire elevada. Hi havia d'haver una altra força combinada amb aquesta que permetés generar la propulsió, i per tant es va passar a una nova teoria de propulsió en base a la *sustentació* (*lift theory* en anglès), que s'explicarà en el següent apartat.

3.1.2 PRINCIPI DE BERNOUILLI I FORCES DE SUSTENTACIÓ

3.1.2.1 Conceptes bàsics de la generació de forces de sustentació

L'altra força que es genera, derivada del comportament en forma de línies de corrent que té el medi aquàtic quan hi desplaçem un objecte, és la força d'elevació o *lift* en anglès. Aquesta força és la que es crea en sentit perpendicular al moviment de la mà, generada pel *principi de Bernouilli*, segons el qual la velocitat del fluid que es mou al voltant de la superfície propulsiva és inversament proporcional a la pressió que hi exerceix.

Com a exemple, en un cos amb perfil d'ala (amb una cara en forma còncava i l'altra plana, de manera que una cara té més superfície que l'altra), la velocitat que adquireix el flux en passar per sobre i per sota no és igual, perquè el recorregut que ha de realitzar el fluid és més llarg per la cara còncava, i com que al final les dues línies de corrent es tornen a ajuntar i igualen novament la velocitat (segons la *condició de Kutta-Joukowski*), cal que el fluid que passa per dalt vagi més ràpid per a poder fusionar-se al final. Com que la pressió resultant a cadascuna de les cares és proporcional a la variació de la velocitat d'aquestes línies de corrent, ens trobem amb un diferencial de pressió que crea un efecte de succió que fa que el cos o superfície propulsiva s'elevi o es sustenti en el medi, de manera que la força *lift* també rep el nom de *força de sustentació*.

L'aplicació més clara d'aquest principi la trobem en els avions, ja que és el que fa que els avions volin: les ales, un cos de forma curvilínia respecte a l'avanç, fan que la velocitat de les corrents d'aire que passen per sobre i per sota siguin diferents i per tant es produeixi un efecte d'elevació i sustentació. En el cas dels nedadors, per a generar aquest tipus de forces elevadores, caldria col·locar les mans en forma curvilínia per a poder generar aquests diferencials de pressions i els seus efectes: quan més inclinació tingui la superfície (angle d'atac), major serà el diferencial de pressió i per tant l'efecte de succió.

Un altre objecte que genera aquestes forces *lift* són les pilotes quan es xuten o tiren de manera que rotin sobre sí mateixes i no només que es desplacin: aquesta rotació té el mateix efecte que les superfícies còncaues, ja que la rotació fa que s'acceleri més el fluid per una banda, la que gira en el sentit de les línies de corrent del medi, mentre que per l'altra té tendència a frenar-se (ja que va en sentit contrari). Aquesta manera de generar sustentació rep el nom d'*efecte Magnus* i es produeix en qualsevol esfera o cilindre que gira en un fluid circulant o es desplaça en un mitjà viscos.

Les forces generades pel fluid que actuen en un objecte depenen de quatre factors:

- la velocitat respecte el fluid (u)
- la seva àrea (S)
- la densitat del fluid (ρ)
- un coeficient de *lift* (C_l) específic per a cada objecte en funció de l'angle d'atac (α) o inclinació de la superfície propulsiva respecte a la direcció del moviment i de l'angle d'azimut (Ψ) o orientació de la mà que indica la direcció del fluid quan circula al voltant de l'objecte (fig.3.1.4.).

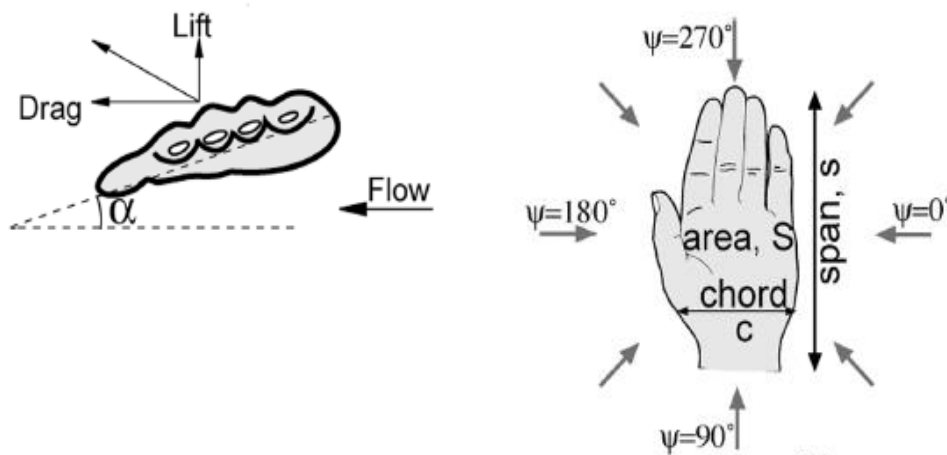


Fig.3.1.4. Representació de l'angle d'atac (α) i de l'angle azimut (Ψ) de la mà respecte a la direcció del fluid, extret de Toussaint, Van den Berg et al. (2002)

La relació entre aquestes variables es resumeix en una equació general, que s'utilitza tan per a calcular la força d'arrossegament o *drag* (D) com la força d'elevació o *lift* (L):

$$D = \frac{1}{2} \rho u^2 C_d S$$

$$L = \frac{1}{2} \rho u^2 C_l S$$

Per a poder determinar específicament aquests dos coeficients en cada posició i calcular les forces propulsives generades, i definir les possibilitats de la mà per a actuar com un "hidrofoil" (superfície que pot generar forces de sustentació a partir de certs angles de moviment), primer R.E. Schleihau, el 1979, en un canal de flux, i posteriorment M.A.M. Berger, el 1995, construint un model mecànic del braç, van analitzar detalladament tots els moviments de la mà i l'avant-braç en 3 dimensions durant la braçada de crol (Berger, Hollander et al. 1999).

3.1.2.2 Teories propulsives basades en la sustentació

La proposta del mètode propulsiu mitjançant la creació de *lift* o forces de sustentació, majoritàriament es vol explicar fent un paral·lelisme amb el dels avions, que seria col·locar i moure la mà de tal manera que es creï un diferencial de pressions entre el palmell i el dors que generés una força en una direcció que pogués ser aprofitada pel nedador per a avançar. Però la mà realment actua com una hèlix, perquè els braços no són una extremitat fixa, sinó que té moviments rotatius, i per tant la teoria propulsiva hauria de ser la "teoria de la hèlix" (*propeller* en anglès) (Maglischo 1993).

Segons aquesta proposta, quan la mà es mou per l'aigua, la seva vorada d'atac, actua "esgarrapant" l'aigua i desplaçant-la cap a la vorada de sortida (fig.3.1.5.). Les mans que serien com una ala o la pala de l'hèlix, amb una superfície relativament corba, accelerarien el fluid per sobre de la seva superfície anterior reduint la pressió i per tant generant una força ascensional perpendicular a la direcció del moviment de la mà, que en aquest cas seria cap endavant. Cada canvi de direcció es podria equiparar a

una nova ala de la hèlix ja que l'aigua hi actua en una nova direcció i en una altra zona d'aigua generalment més quieta. La modificació dels angles d'atac i inclinació en cada fase busquen poder aplicar i aconseguir la propulsió resultant en l'angle més eficaç possible.

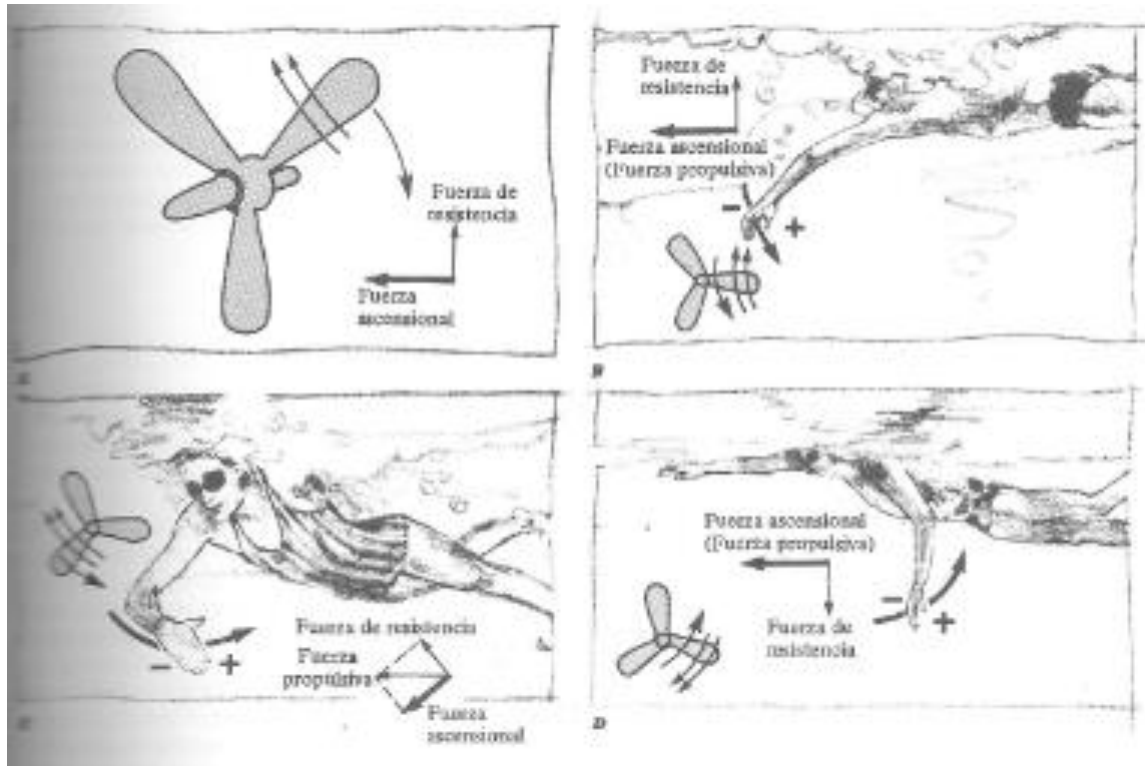


Fig.3.1.5. Analogia de l'acció d'una hèlix i el moviment propulsiu subaquàtic del braç en l'estil crol (explicació i il·lustracions extretes de Maglischo (1993)).

Però per a poder generar un desplaçament del cos del nedador endavant amb aquesta força, el factor més important és que el fluid que passa pel palmell de la mà (en aquest cas la cara posterior) creï una resistència (fluid quiet) que frena el moviment de la mà en aquest sentit i serveix com a zona estable de recolzament. Com que la mà i el braç queden fixats, aquesta força ascensional es transmet al cos del nedador impulsant-lo endavant.

Per tant, diferents estudis han demostrat que els moviments en diferents direccions de la mà, superfície propulsiva del nedador, busquen aconseguir una propulsió el més eficaç possible mitjançant la interacció constant entre les dues components anteriorment citades (forces d'arrossegament i forces de sustentació, o

drag i *lift*), formant una tercera força o vector resultant major amb una direcció entre les dues anteriors.

Per una altra banda, aquesta teoria basada en el teorema de Bernouilli només es pot aplicar quan el flux que passa per sobre es manté unit a l'ala, és a dir, sense que es separi la capa límit (*boundary layer*). Si es manté aquesta capa intacta, ens indica que hi ha poques turbulències i baixa pressió, i per tant es manté el diferencial de pressió elevat en la part superior i la part inferior. Quan augmenten les turbulències, les molècules d'aigua es separen de la part superior de l'ala, desenganxant-se la capa límit i augmentant la pressió, de manera que el diferencial de pressió s'atenua i disminueix la *lift*. Per tant, una capa límit enganxada és essencial per a que pugui produir-se l'efecte *Bernouilli*, i com que s'ha pogut determinar que les extremitats de l'ésser humà no són prou llises ni tenen la forma d'ala perfecta per a poder mantenir aquesta capa, es pot posar clarament en dubte que aquest principi sigui el responsable de la propulsió dels nedadors (Maglischo 2003).

Diferents estudis com els de Holt i Holt l'any 1989, la tesi doctoral de Ferrell sobre l'aplicació del principi de Bernouilli en la propulsió en natació (1991), el de Bixler (Bixler and Riewald 2002), i finalment el de Toussaint (Toussaint, Van den Berg et al. 2002), van demostrar amb diferents mètodes que aquesta capa era totalment inestable, ja que en cap moment es generava una circulació laminar al voltant de la mà, de manera que la propulsió per *lift* no podia ser la que generés la força d'avanç.

A més, quan es van comparar aquests resultats amb les dades obtingudes de la resistència activa de l'aigua, va aparèixer el problema de que les forces calculades eren massa baixes per a poder vèncer la resistència (Sanders 1999), i que no hi havia cap correspondència entre les forces *lift* i la despesa energètica associada (Berger, Hollander et al. 1997), posant en dubte les teories propulsives que s'estaven mantenint fins al moment. Per tant, calia buscar una altra aproximació per a poder estudiar com s'aconsegueix aplicar forces, i per tant propulsar-se, en el medi aquàtic, la qual s'explica a continuació.

3.1.3 GENERACIÓ DE FORCES EN FLUIDS INESTABLES

3.1.3.1 Diferència entre la generació de propulsió en un fluid estable i en un inestable i efectes associats

Cecil M. Colwin, en un primer estudi de l'any 1984, que va anar ampliant posteriorment, va ser el primer en proposar que la propulsió en natació es podia explicar per la formació i alliberació de remolins o vòrtexs (masses d'aigua en rotació) després d'observar-los en l'estela deixada per part dels nedadors.

Aquesta teoria es basa en l'aplicació de la dinàmica de fluids inestables, i tot i que es va començar a desenvolupar per a poder explicar el vol dels insectes, ja que els resultats de les forces calculades amb un enfocament estable conclouien que aquests animals no podien volar (Toussaint and Truijens 2005), la majoria dels principis són igualment aplicables al medi aeri i aquàtic.

El problema que presentaven les anteriors teories era que es basaven en l'assumpció que el medi era pràcticament estable durant tota la propulsió, és a dir, que les seves condicions es mantenien pràcticament inalterades en el temps, i que les superfícies propulsives no modificaven la seva velocitat, angle d'atac ni orientació, per això s'anomenaven enfocaments *quasi-estables*. Amb aquestes premisses, es podien establir les variacions de les components de *drag* i *lift* generades en cada cas en funció dels canvis d'orientació de les superfícies propulsives. Però no es considerava en cap moment les forces que es generaven en l'aigua, és a dir, el moment que adquireix el fluid impulsat, ni els continus canvis de direcció i rotació de les superfícies propulsives, per les complicades combinacions de moviments dels braços, de manera que seria pràcticament impossible el càlcul de les forces reals generades amb l'aplicació de la teoria de fluids quasi-estables (Pai and Hay 1988).

En canvi, com ja s'ha vist anteriorment, quan un organisme o objecte genera forces per a desplaçar-se a través d'un fluid, es produeixen canvis en el mateix, adquirint una energia cinètica o moment igual a la força aplicada. L'adquisició d'aquest moment és el resultat de la creació de línies de corrent tant per sobre com per sota de l'ala o objecte quan es desplaça. Al final, quan s'ajunten les esteles superior i inferior,

aquesta aigua accelerada manté l'energia cinètica adquirida, i per tant canvia la configuració de les masses d'aigua properes, generant zones d'alta i baixa pressió, i desplaçaments de molècules que tendeixen a compensar-se (omplir buits deixats per l'aigua desplaçada o l'espai que ocupava anteriorment l'objecte que es mou), convertint-se, com s'explicarà a continuació, en circulacions en forma de remolí anomenades vòrtexs (Arellano 1992).

En l'enfocament de fluids inestables, no hi ha diferència entre la generació de forces per *drag* o per *lift*, sinó que ambdues es deriven del mateix fenomen, les forces de circulació generades per la creació d'aquests vòrtexs (Dickinson 1996). Normalment, aquesta força generada, també coneguda com a força de sustentació dinàmica (*dynamic lift* en anglès) és superior a la que es pot generar en condicions estables (Matsuuchi, Miwa et al. 2009).

A més, aquesta doble creació de forces en l'aigua i en el cos propulsiu, fa que es pugui estudiar la propulsió en el medi aquàtic des de dos punts de vista: focalitzant-se en les forces produïdes per les superfícies propulsives, com s'estava fent amb l'aproximació de fluids estables, o examinant els canvis en el moment adquirit pel medi (Dickinson 1996), més adequada en el cas de la natació ja que l'empenta o força de sustentació que genera el fluid és igual a aquest moment adquirit, producte de la massa de l'aigua en moviment per la velocitat adquirida ($F = m \cdot v$). Per aquesta mateixa raó, l'expressió de les forces de sustentació en termes de vorticitat permet poder expressar la força generada en funció de la magnitud i la direcció adquirida per les esteles de flux, mostrant la clara interacció entre la generació de propulsió i aquestes estructures que es formen en el medi, sense haver de considerar els moviments de la superfície propulsiva.

3.1.3.2 Conceptes bàsics associats a la hidrodinàmica de fluids inestables

El primer concepte que apareix quan valorem els canvis produïts en l'aigua quan un cos s'hi desplaça a través és el de *circulació* o formació de *vòrtex*, és a dir, un flux

turbulent en rotació espiral amb una trajectòria de corrent tancada. Aquest fluid en rotació, producte resultant de l'energia cinètica adquirida quan s'hi aplica força, genera *vorticitat*: a causa de la viscositat del fluid, aquest remolí inicial (anomenat vòrtex de punta) absorbeix part del flux adjacent i el fa girar igualment. Aquesta inducció de velocitat és inversament proporcional a la distància del centre de gir, i per tant, només es produeix fins a una certa distància i depèn de la força de gir o velocitat del vòrtex inicial.

El càlcul de la magnitud de la circulació del vòrtex, simbolitzada amb el símbol " Γ ", es fa amb la fórmula següent:

$$\Gamma = 2cv$$

on c és la corda o distància entre els dos extrems de l'ala i v és la velocitat tangencial de la corba que encercla l'ala o cos propulsiu. Quan més gran és el radi de gir, menor és la seva velocitat, i per tant també la seva força de circulació. En canvi, dins del mateix vòrtex o bucle, la circulació és la mateixa en qualsevol punt de la corba (*primer teorema de Helmutz*), per això es simbolitza com un cercle o el·lipse complet (fig.3.1.6.).



Fig.3.1.6. Línies de flux al voltant de la mà. Podem diferenciar dos tipus de circulacions: la del flux que es desplaça u , i la del vòrtex generat v , extret de Toussaint and Truijens (2005)

Aquesta circulació, si té lloc en un objecte asimètric (forma d'ala), de manera que el recorregut per a recórrer una cara és superior a l'altra, crea un diferencial de velocitats entre les dues cares. Per a poder determinar la força generada per un vòrtex (L), utilitzarem el principi de Bernoulli explicat anteriorment: quan més gran és la circulació, major és el diferencial entre la velocitat de les dues cares i per tant també el

diferencial de pressions, de manera que la força augmentarà proporcional a la circulació, segons l'equació:

$$L = \rho u r s$$

on ρ és la densitat de l'aigua, u és la velocitat del fluid en relació a l'ala i s l'àrea de la superfície propulsiva.

Per una altra banda, la dinàmica bàsica de circulacions generades quan un cos es comença a moure a través d'un fluid estable, seria la següent (fig.3.1.7.):

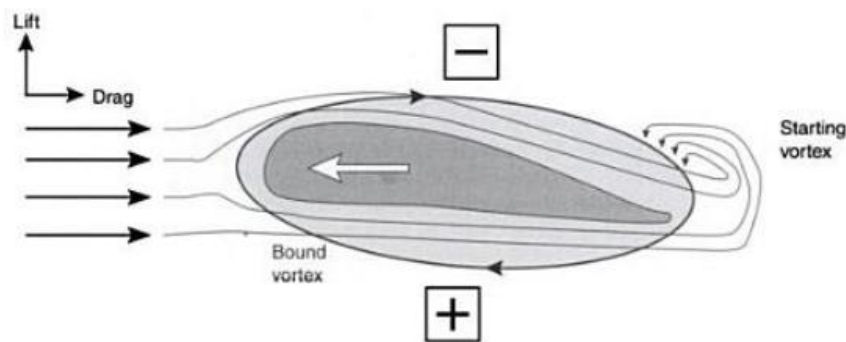


Fig.3.1.7. Formació del vòrtex adherit i del vòrtex inicial en el moviment d'un objecte amb perfil d'ala, extret de Maglischo (2003)

- Primer, com a resultat del buit creat darrere del cos quan aquest comença a desplaçar-se per un fluid, les esteles de flux accelerat tenen tendència a desviar-se, tornant enrere, per a omplir aquest espai creant una circulació en forma de remolí en el punt on ha començat el moviment, per això rep el nom de *vòrtex inicial* (*starting vortex* en anglès).
- Paral·lelament, aquest flux en direcció anterior topa el flux que passa per sota de l'objecte, frenant-lo i per tant augmentant el diferencial de velocitat entre les dues cares. Aquest fet, juntament amb l'efecte resultant del principi de conservació del moment angular o *primera llei de Kelvin*, fa que al voltant de l'ala el flux formi un vòrtex o remolí que gira en sentit contrari al vòrtex inicial, neutralitzant la força de gir generada pel primer. Aquest vòrtex s'anomena *vòrtex adherit* (*bound vortex* en anglès), ja que es produeix al voltant de l'ala que es desplaça.

Aquest vòrtex no és una circulació en cercle real, només és una explicació teòrica senzilla per a explicar la important força *lift* generada pel fluid circulant al voltant de l'objecte, que presenta un important diferencial de velocitat entre les dues cares, que ha de ser igual que si es formés un *contravòrtex* (vòrtex girant en sentit contrari).

- Finalment, quan es canvia la direcció del moviment, s'allibera aquest vòrtex adherit, quedant-se circulant en el fluid, el que anomenem *vòrtex lliure* o *vòrtex perdut*, indicant que ha finalitzat la producció de forces en aquell sentit, però mantenint l'energia adquirida pel medi o aigua

Aquesta circulació envoltant, genera un efecte de sustentació segons el *teorema de Kutta-Joukowski*: “un perfil en repòs situat en un camp de velocitat uniforme i al voltant del qual hi ha una circulació experimenta una força de sustentació”.

Inicialment, Arellano (1999) va analitzar els efectes de l'aplicació de forces en l'aigua mitjançant la visualització de les corrents generades utilitzant micropartícules reflectants (fig.3.1.8.A), amb bombolles injectades o utilitzant un mur de bombolles, de manera que es podien visualitzar els vòrtexs formats.

Però els mètodes d'estudi que millor han pogut observar aquest fenomen són la visualització amb la dinàmica computacional de fluids (*Computational Fluid Dynamics* o CFD en anglès) (fig.3.1.8.B), que es basa en un complex algoritme que determina la velocitat i pressió de la corrent circulant al voltant d'un objecte (Bixler and Riewald 2002), i la velocimetria de partícules per imatge (*Particle Image Velocimetry* o PIV en anglès), que permet quantificar la velocitat de les diferents partícules reflectants mitjançant un emissor làser que i una càmera de vídeo d'alta velocitat, i per tant determinar la força dels vòrtexs resultants. Posteriorment, els estudis en hidrodinàmica han buscat relacionar aquestes formacions de remolins amb la seva possibilitat de generar forces propulsives dels moviments realitzats principalment amb la mà en el gest tècnic de la braçada.

Darrerament, Matsuuchi and Muramatsu (2011) han fet un estudi on han sincronitzat un mètode qualitatiu com és la filmació en 3D amb un mètode quantitatiu

com la PIV, per a poder relacionar els moviments de la mà amb la formació de vòrtexs i per tant la seva capacitat propulsiva. El problema és que el sistema ofereix moltíssimes dades i de moment només s'han pogut treure resultats analitzant el moviment en dues dimensions (fig.3.1.8.C).

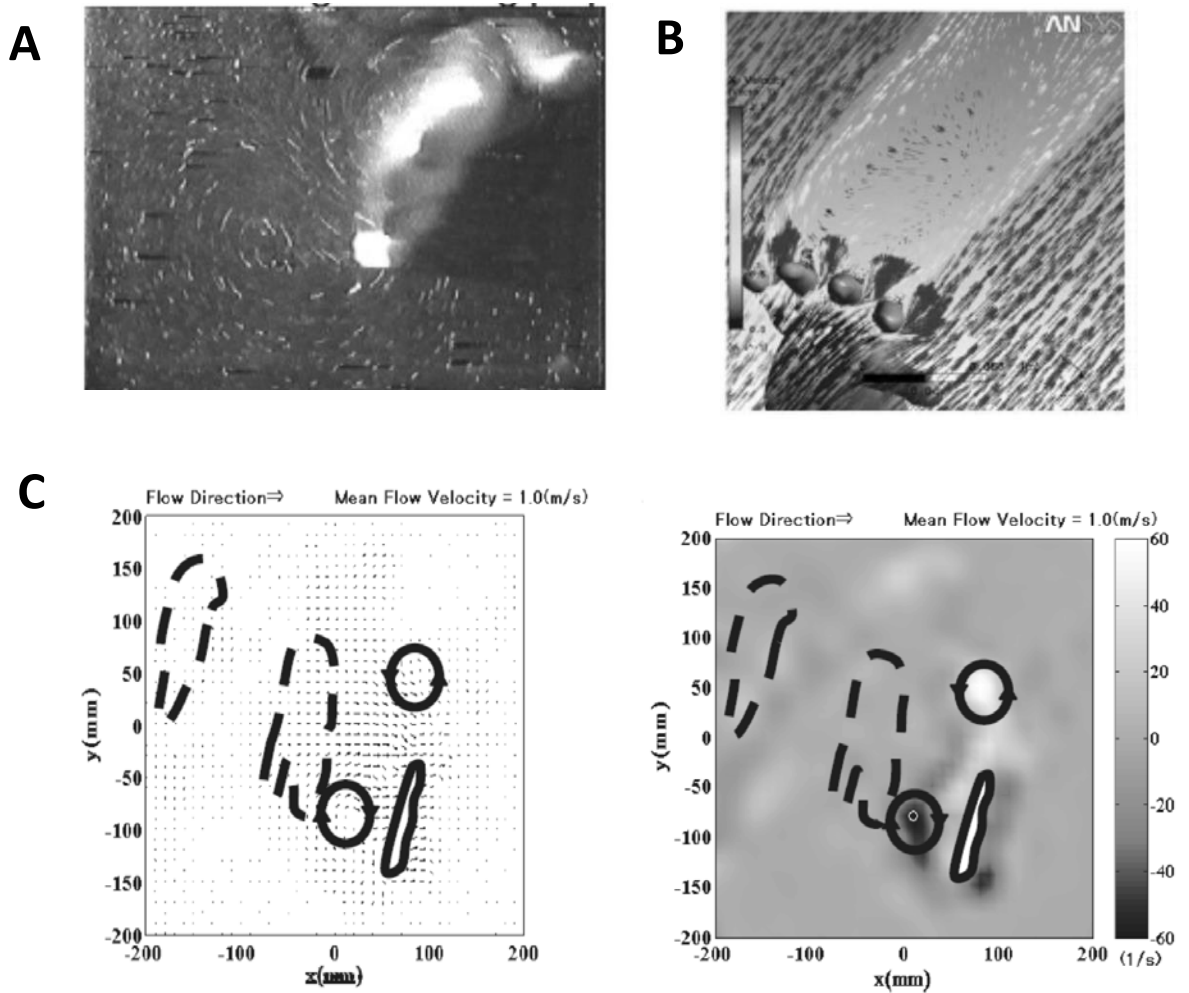


Fig.3.1.8. (A) Generació de vòrtexs durant el moviment de la mà mitjançant la visualització de fluids (extret de Arellano, 2001); (B) Recreació generada pel programa informàtic CFD, extret de Minette, Machtsiras et al. (2009); (C) Combinació de dos mètodes d'anàlisi, filmació i PIV, extret de Matsuuchi and Muramatsu (2011).

Però el fet de que la circulació total sempre hagi de ser igual a zero crea una contradicció, ja que si s'equilibren les forces (els dos vòrtexs, l'inicial i l'adherit, giren

en sentit contrari) aquestes quedarien anul·lades i no hi podria haver cap efecte en l'objecte en moviment.

Aquest fenomen rep el nom d'*efecte Wagner*, i postula que quan un objecte s'accelera en un fluid fins a assolir una velocitat constant, la creació d'un vòrtex adherit de manera estable (circulació i força generada constant) triga un cert temps, concretament l'equivalent a 6 vegades la distància de la corda (longitud) de l'ala per a assolir el 90% del seu valor final de circulació o força de sustentació (Toussaint and Truijens 2005). Mentre no es produeix aquesta estabilització, es produeix una clara disminució de la força de sustentació generada, però quan la separació entre els dos vòrtexs és suficient, deixen d'interactuar i per tant podríem analitzar la força generada pràcticament igual que amb la hidrodinàmica de fluids quasi-estables.

El problema és que aquesta condició de distanciament i velocitat estable només es produeix en objectes que mantenen durant molta estona la mateixa direcció d'avanç o que es desplacen molt ràpid, com els avions, els quals ràpidament superen aquesta distància d'influència i per tant no cal considerar els efectes relacionats amb els canvis de les condicions de les partícules de fluid adjacents. En canvi, en el cas de la tècnica dels diferents estils en natació, i també del vol dels insectes, que moltes vegades és estacionari, els moviments es produeixen en un espai molt reduït i a més amb continus i amplis canvis de direcció de la mà (angles d'atac elevats i rotacions), i per tant cal buscar en la hidrodinàmica de fluids inestables el mecanisme que explica la propulsió en aquests casos.

Els científics doncs van analitzar en un túnel de vent mitjançant la CFD les solucions adoptades pels insectes, sabent que aquestes també són aplicables en el medi aquàtic. S'ha comprovat que la força de sustentació o *lift* augmenta progressivament amb l'augment de la inclinació o angle d'atac fins a un cert angle crític (entre 15 i 20 graus) a partir del qual el flux té tendència a separar-se de la cara superior per l'extrem anterior, desenganxant-se la seva capa límit (*boundary layer*), de manera que el flux que passa per sobre passa de ser laminar (línies de flux paral·leles) a turbulent (formació de remolins) disminuint la pressió dràsticament. Aquest fenomen s'anomena *entrada en pèrdua* (*stall* en anglès) i suposaria la pèrdua total de

l'efecte de sustentació si no fos perquè aquesta separació no es produeix instantàniament, sinó que triga una mica, de manera que provisionalment, les forces circulatòries generades són majors que les que es podrien produir en un fluid en estat estable (entrada en pèrdua retardada o *delayed stall* en anglès).

En aquest cas, s'observa la formació d'una nova sèrie de vòrtexs associats (fig.3.1.9.): durant l'instant previ al despreniment de la capa límit, es forma un vòrtex adjunt per darrere de l'extrem anterior de l'ala a mesura que el fluid es comença a separar d'aquest extrem de punta, ja que aquest té tendència a reenganxar-se a la superfície superior de l'ala, que anomenem *vòrtex de l'extrem d'atac o anterior (leading edge bubble* en anglès). Per la llei de Kelvin explicada anteriorment, consegüentment, s'ha de crear un vòrtex igual però oposat per a contrarestar aquest primer; aquest segon vòrtex adjunt, es forma per sobre de l'extrem posterior d'aquesta cara superior anomenat *vòrtex de l'extrem de sortida (trailing edge vortex* en anglès).

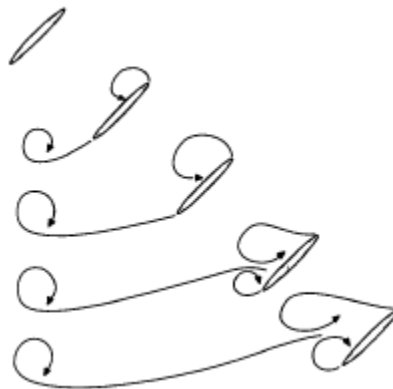


Fig.3.1.9. Formació dels dos vòrtexs adjunts en una ala que es desplaça amb un elevat angle d'atac, extret de Dickinson (1996).

A diferència del vòrtex explicat inicialment, el vòrtex adjunt no és envolvent, però malgrat que el centre de gir està situat per fora de l'ala, també genera una força de sustentació important perquè crea una zona de baixa pressió per sobre de la cara superior fent que la força generada pugui ser molt alta, compensant l'efecte negatiu de l'efecte Wagner (Dickinson 1996).

A mesura que el vòrtex de l'extrem de sortida va augmentant de volum, va desenganxant el primer vòrtex de la superfície de l'ala fins a deixar-lo lliure girant en el

fluid. Però novament, com que es forma un buit en aquesta punta d'atac, es torna a formar un nou vòrtex anterior per la compensació del posterior (Llei de Kelvin). Com que el cos es manté en desplaçament, s'allibera el vòrtex de sortida igualment, i un nou segon vòrtex adjunt posterior es forma en el seu lloc. Aquesta formació i alliberació de vòrtexs va deixant al darrere una estela de remolins, girant cadascun en sentit contrari al següent, que rep el nom de *carrer de vòrtexs de Von Karman* (*Von Karman Street* en anglès).

Per una altra banda, si analitzem la baixa pressió generada per aquest vòrtex adjunt de punta, podem veure que genera una força que actua pràcticament perpendicular a la superfície de l'ala, i no en referència a la direcció de moviment de la mà com era quan hi havia el fenomen de *drag* (força paral·lela) i *lift* (força perpendicular) en condicions d'angles d'atac reduïts. Per tant, enlloc de tindre dues forces diferents, passem a englobar-les en una sola anomenada força de circulació total, que sempre presentarà la mateixa orientació respecte a la superfície propulsiva (90°), sigui quin sigui el seu angle d'atac (Dickinson 1996).

3.1.3.3 Teories propulsives basades en la hidrodinàmica de fluids inestables

Les propostes propulsives en natació basades en la reacció del fluid a la força aplicada (hidrodinàmica de fluids inestables), provenen habitualment d'estudis en el vol dels insectes i en el nedo dels peixos, per a posteriorment fer un paral·lelisme amb els moviments de les tècniques de nedo. En aquest cas, ens trobem amb tres teories:

- Propulsió tipus perfil d'ala (*foil* en anglès)

Resultant de les forces de circulació generades pels vòrtexs adherits que creen un efecte de sustentació de la superfície propulsiva o mà en el cas del nedador. Aquesta força només té efecte mentre el vòrtex es manté girant al voltant de la mà, quan s'allibera es perd l'efecte. Com que els continus canvis de direcció realitzats no faciliten crear i mantenir aquest vòrtex envoltant, podem distingir

els bons nedadors per l'habilitat de generar ràpidament aquesta circulació i mantenir-la estable el màxim temps possible abans d'un canvi de direcció que l'alliberarà.

- Propulsió tipus *anell volador* (*fling-ring* en anglès)

És la que es produeix en els punts de transició quan s'alliberen els vòrtexs inicials cap enrere, ja que aquest flux d'aigua alliberada causa una força contrària d'igual magnitud accelerant el nedador cap endavant, augmentant el seu impuls. Els moviments principals de la tècnica de natació en els quals es produeix aquest efecte són el moviment de les cames en l'estil papallona (batuda ondulatoria o de dofí), en l'estil crol i en l'esquena, i en el nedo ondulatori subaquàtic.

Aquest tipus de propulsió ha estat molt estudiat en els peixos, ja que és el típic que es produeix amb l'aleta caudal (Dickinson 1996): l'aleta exerceix una força lateral amb un elevat angle d'atac generant un parell de vòrtexs contraris (el de l'extrem d'atac i el compensatori) i al final d'aquest primer moviment o cicle, en canviar de direcció, s'alliberen aquests dos vòrtexs, que queden girant lliures en l'aigua, i se'n generen dos de nous adjunts a l'altre costat de l'aleta, que igualment s'alliberaran en el nou cicle o canvi de direcció i així consecutivament.

L'efecte resultant en cas d'una aplicació de forces lenta és una estela amb una sèrie de dos vòrtexs a cada costat, ja que els mateixos tenen poca força de rotació, però si aquesta es fa més intensa i ràpida, els vòrtexs compensatoris i els següents inicials es fusionen formant una estela de vòrtexs en cadena o units (fig.3.1.10). En aquest segon cas, una ala que es desplaça ràpidament rotant i canviant el sentit de moviment amb un elevat angle d'atac, presenta un efecte acumulatiu que ajuda molt a generar una nova força impulsiva: el vòrtex inicial generat en l'extrem d'atac es va desplaçant i creixent en intensitat cap al final de l'ala, i quan es canvia el sentit aquest vòrtex inicial es converteix en el vòrtex compensatori del nou, i per tant ens trobem amb una força extra per a aquest segon cicle, augmentant la força generada. L'aprofitament d'aquest

efecte acumulatiu depèn molt de la duració de la pausa entre cicles (freqüència).

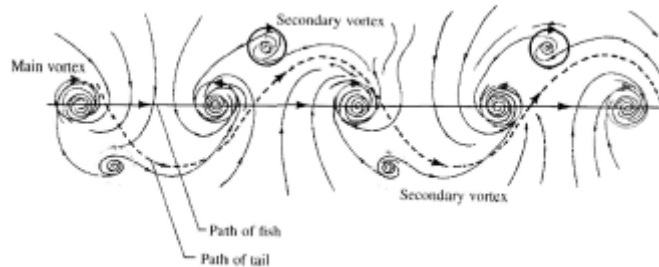


Fig.3.1.10. Formació teòrica de l'estela de vòrtex amb el moviment de l'aleta caudal d'un peix, extret de Videler (1999).

- Propulsió simultània de dues extremitats

Aquesta també és una propulsió molt analitzada en peixos, i es basa en la determinació de la generació de vòrtexs en un moviment on les aletes inicialment estan situades cap amunt i comencen a rotar portant els extrems de l'ala cap avall i endavant fins a gairebé ajuntar-se per sota del cos. La particularitat que presenta aquest gest és que no es formen dos vòrtexs inicials com seria previsible, ja que els extrems de les dues aletes estan tan junts inicialment que es contraresten i s'anul·len. En canvi, es forma una línia connectiva que uneix aquests dos extrems en forma de vòrtex allargat que uneix els dos vòrtexs adherits que es van creant al voltant de les dues aletes. En finalitzar el cicle, es tanca aquest vòrtex connectiu creant un cercle al voltant del peix, i comença una segon cicle en sentit ascendent que forma el mateix vòrtex girant en sentit contrari (fig.3.1.11.).

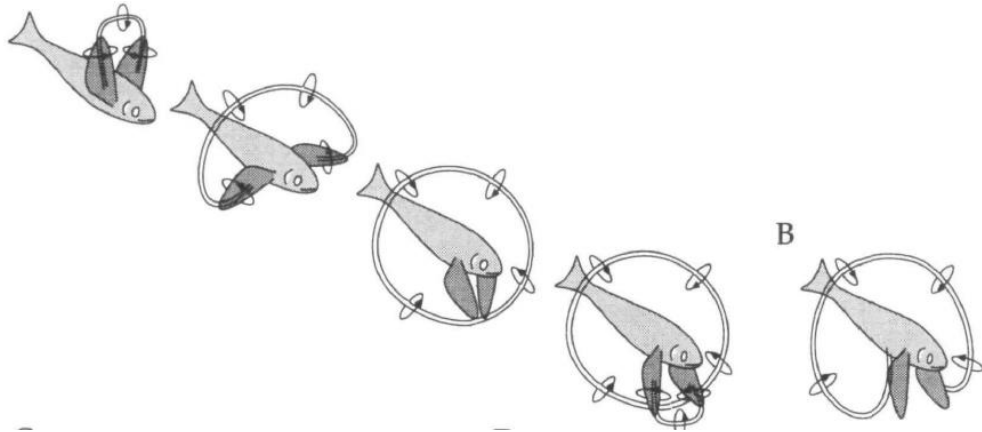


Fig.3.1.11. Creació d'un gran i únic vòrtex en un moviment descendent de gran amplitud, extret de Dickinson (1996)

El paral·lisme d'aquest mecanisme en les diferents tècniques de la natació competitiva, podria ser amb la braçada de l'estil de braça i el de papallona, on igualment les dues mans comencen relativament juntes, es separen amb moviments rotatius, i final es tornen a ajuntar.

Si aquestes forces dels vòrtexs realment actuessin en la natació "humana", voldria dir que les forces de sustentació contribueixen de manera considerable a la propulsió, fins i tot quan la capa límit es separa, fet que moltes teories posen en discussió. Per tant, el primer aspecte a considerar és si realment els nedadors aconseguen crear aquest vòrtex adherit al voltant de la mà o els peus, ja que sinó no es podrien produir el efectes de *foil* o *fling-ring*. Malgrat que les esteles dels nedadors mostren remolins sortint de les mans o els peus, no s'ha pogut provar que els mateixos siguin el resultat de la formació i alliberació de vòrtexs adherits (Maglischo 2003).

Un altre problema amb què ens trobem quan volem aplicar les teories de les forces de sustentació a la propulsió en els diferents estils de natació competitiva, és que la majoria d'aquests estudis s'han plantejat en dues dimensions, és a dir, només analitzant els efectes d'una ala plana, sense considerar què passa en els seus límits, i sobretot només analitzant moviments de translació lineal, sense plantejar-se la possibilitat de realitzar moviments en 3 dimensions, principalment rotacions, que són

molt més importants en els nedadors que els moviments de translació (Toussaint, Van den Berg et al. 2002). Per tant, cal determinar si en aquestes condicions també es produeixen aquests mateixos efectes en el fluid o cal buscar nous conceptes i teories aplicables en aquest cas.

Per exemple, els estudis en tancs de fluid, realitzats amb reproduccions de plàstic del braç o de la mà per a simular els moviments del nedador, si només es feia amb moviments de translació o anteroposteriors, els estudis mostraven que el vòrtex de l'extrem d'atac era massa inestable per a poder tenir efectes propulsius. Però quan es va realitzar l'estudi imitant els moviments de les ales dels insectes amb models robòtics, es va poder veure que els moviments de rotació que feien les ales, produïen un vòrtex d'extrem d'atac en 3D molt estable que podia produir fins a un terç de la força *lift* requerida (Toussaint and Truijens 2005).

Una altra conseqüència observable a nivell dels canvis en la circulació de l'aigua per aquest moviment rotatiu, és la creació un flux d'aigua axial (vertical) des de l'extrem d'atac o d'inici d'aquesta rotació fins a l'extrem distal, que en el cas concret del braç seria des de l'espatlla fins a la mà (fig.3.1.12.). Aquesta circulació axial d'un flux en acceleració, produeix un diferencial de pressions igual que el citat en els vòrtexs adherits, de manera que la zona de la mà presenta una menor pressió que la de l'espatlla i per tant es crea un nou diferencial de pressió que es pot utilitzar com a mètode propulsiu.

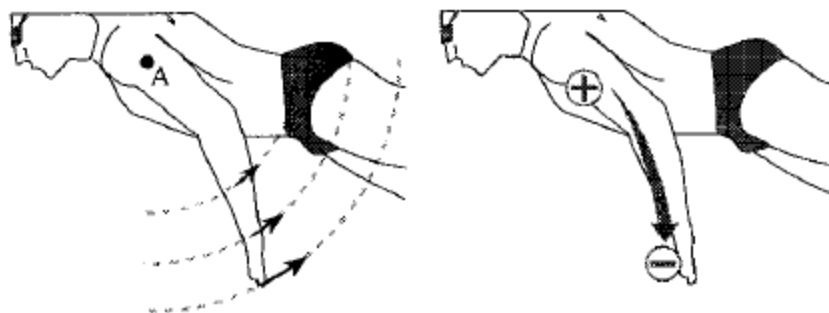


Fig.3.1.12. Moviment de rotació del braç amb el centre de gir (A) durant la fase de moviment enfora i gradient de velocitat creat al llarg del braç produint un flux axial en acceleració en direcció a la mà (esquema i explicació extreta de (Toussaint, Van den Berg et al. 2002)).

Basant-se en aquest efecte, Toussaint, Van den Berg et al. (2002) van plantejar un mecanisme de propulsió per impulsió del fluid en direcció axial (els autors l'han anomenat *pumped-up propulsion* en anglès). Aquest efecte en el fluid s'ha pogut provar en un estudi realitzat específicament en nedadors. En aquest estudi, es van situar diferents filaments de llana enganxats en diferents zones del braç, avant-braç i mà que, mitjançant la filmació subaquàtica, permetien veure com es comportava el fluid en cada zona en les diferents fases del moviment propulsiu.

Els resultats van ser, primerament, una important inestabilitat del flux al voltant de l'extremitat, ja que les orientacions dels filaments canviaven contínuament en cada imatge. Després, i confirmant la hipòtesi, s'observa com en la fase de moviment cap a fora els filaments s'orienten cap a la mà, i no en direcció al moviment, i adquireixen forma de "V", confirmant la creació d'un flux axial o distal. Aquests canvis es produeixen quan rota l'avantbraç, de manera que confirma que la rotació és important en considerar els efectes produïts en el flux, però també que no es pot considerar la mà per sí sola, sinó que cal analitzar els moviments de tot el braç (fig.3.1.13.). Cal encara determinar exactament quines possibilitats per a generar propulsió té aquest fenomen i com interacciona amb els altres efectes com la resistència i les forces *drag* (efectes de les forces de translació).

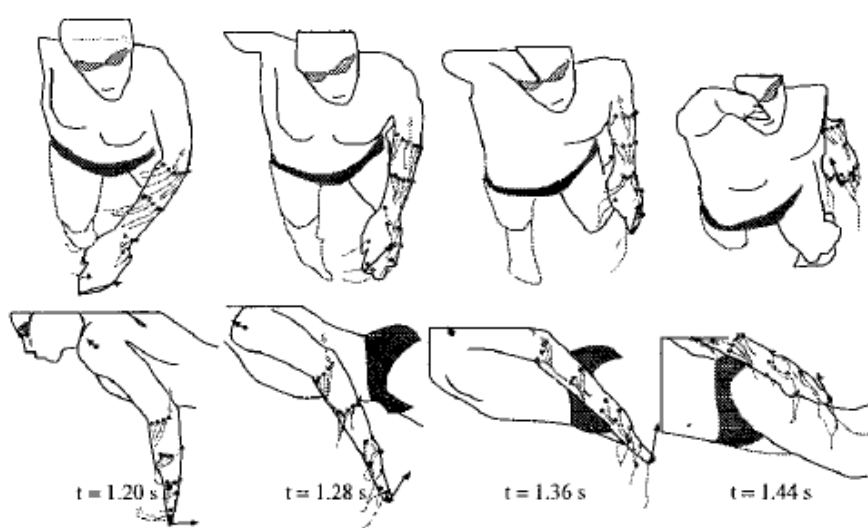


Fig.3.1.13. Els extrems dels filaments de cada zona s'ajunten formant una "V", confirmant aquest flux axial en acceleració cap a la mà (imatges extretes de l'estudi de Toussaint, Van den Berg et al. (2002))

3.1.4 PROPOSTA ALTERNATIVA DE MAGLISCHO

Segons E. W. Maglischo, en el seu llibre publicat l'any 2003, que vol ser una revisió i actualització del que va publicar l'any 1992, si l'evidència mostra que el principi de Bernouilli no es pot aplicar a la propulsió en natació, i tampoc s'ha pogut demostrar que els vòrtexs formats puguin ser mecanismes propulsius, sembla que l'explicació més lògica per a la resultant de l'aplicació d'una força per part dels nedadors, quan es recolzen diagonalment enrere a l'aigua, permeten que el cos es propulsi endavant, és tornar a la tercera llei de Newton o força d'acció i reacció plantejada inicialment.

En base a l'observació dels moviments dels nedadors i la quantitat de força d'avanç generada, determinada per la velocitat frontal del centre de masses en les diferents fases subaquàtiques de la braçada, l'autor fa un anàlisi dels diferents aspectes que, segons ell, recolzen aquesta teoria propulsiva, és a dir, que la component de *drag* és la força principal en la propulsió generada:

- Si analitzem la força aplicada per vectors i diferenciem les seves dues components (*drag* = horitzontal i *lift* = vertical), podem veure que en la majoria de situacions la component horitzontal és major, principalment pels majors angles d'atac de les mans (segons un estudi de Schleihuaf del 1979, a partir de 40º predominen les forces *drag*) i la seva orientació (angle inclinació)
- Diferents estudis que han mesurat aquestes dues components separadament amb rèpliques de plàstic de les mans arrossegades en túnels de fluid (amb l'aigua circulant a una certa velocitat) ho han confirmat (Berger, de Groot i Hollander (1995); Cappaert (1992) i Bixler (1999)), obtenint majors valors a nivell absolut per a la *drag* (sense tenir en compte els coeficients relatius, ja que aleshores canvia el resultat), tot i que aquests estudis poden ser qüestionats per a extrapolar els seus resultats en la natació competitiva ja que la majoria d'aquests estudis s'han fet en condicions de fluid quasi-estable. Thayer, el 1990, va fer un estudi intentant simular aquests canvis continus i igualment va obtenir majors components de *drag* que de *lift* en totes les fases de la braçada

- Els patrons de velocitat mostren que el nedador només accelera endavant el seu cos quan els seus braços es mouen enrere (Cappaert, 1993). Si observem una gràfica tipus de les variacions de velocitat del centre de masses sincronitzada amb el moviment dels braços podem veure que el cos només comença a accelerar quan la mà assoleix el punt més profund després de la fase d'entrada, que justament és quan es comença a moure la mà cap enrere. La propulsió continua amb alguns períodes de desacceleració fins que la mà s'aproxima a la superfície, que és justament quan ja no hi ha cap moviment en direcció enrere. Malgrat que la direcció no és purament en direcció horitzontal posterior, sinó que té algunes components diagonals, sense aquesta component de *drag* no trobem propulsió, el que pot fer pensar que cal buscar una propulsió tipus "rem" per a poder aconseguir avançar.
- Els angles d'atac de les mans mostren un intent de mantenir els palmells orientats enrere tot i que els moviments globals del braç són en diagonal o circulars. En relació amb aquest punt, un aspecte important per a ajudar als nedadors a millorar la propulsió, és instruir-los en que han de sentir "kinestèsicament" la sensació de que estan empenyent l'aigua enrere mentre la mà es mou cap al centre i fora del tronc (en forma de "S" respecte al cos), ja que amb aquesta indicació, tot i que les mans mai no estan encarades directament enrere, sinó que tenen angles d'atac menors, s'aconsegueix naturalment una propulsió eficaç, ja que s'afavoreix la constància de la força propulsiva produïda
- La propulsió de les cames probablement també s'aconsegueix empenyent l'aigua enrere. Els patrons de moviment mostren que, en la primera part de la batuda, les cames en el crol o papallona i els peus en la braça, es mouen enrere i, analitzant la velocitat del centre de masses, veiem que és en aquesta fase quan el cos es mou més ràpid endavant

Per una altra banda, malgrat que sempre s'havia argumentat que els moviments diagonals que realitzen predominantment els nedadors eren contraris a l'aplicació d'aquesta teoria, per les seves importants components laterals i verticals, com que els

mateixos no són com els d'una hèlix, sinó que tenen també una component horitzontal, també tenen una contribució propulsiva, que es justifica a continuació:

- Augmenten la distància per braçada i la força propulsiva global per cicle, evitant l'aigua accelerada prèviament i augmentant la quantitat d'aigua desplaçada enrere amb un menor esforç muscular, amb tan sols una petita reducció de la força propulsiva generada en cada fase de la braçada (Bixler 1999)
- Són necessaris per a mantenir la inèrcia, ja que permet fer canvis de direcció gradual, disminuint l'esforç muscular que suposarien els canvis bruscs, amb una major aplicació de força per a poder accelerar en la nova direcció, a més dels possibles efectes en la desalineació del cos per la reacció
- Els moviments laterals i verticals són necessaris per a aplicar la força d'una manera més efectiva: quan la mà entra a l'aigua cal que baixi a una certa profunditat per a poder situar-la orientada enrere en la fase d'agafada, i al final igualment la mà ha de pujar per tal de sortir de l'aigua. Per una altra banda, els moviments laterals permeten que el nedador apliqui la força de la millor manera, amb transicions més ràpides i amb una menor resistència.

Com a conclusió, en base a tots els aspectes analitzats en aquest apartat, es pot veure que encara ningú no ha estat capaç de poder demostrar totalment el mecanisme específic de la propulsió en natació. Les teories es centren en les lleis físiques implicades i la manera com s'utilitzen, però no s'ha pogut relacionar clarament les mateixes amb la propulsió en la natació i sobretot trobar el principi que diferencia als nedadors d'alt rendiment.

A més, ens trobem amb el problema de que tots els estudis que analitzen aquests factors relacionats amb les teories propulsives i la hidrodinàmica en la natació, requereixen, a part d'una tecnologia molt complexa, un control molt detallat de tots els paràmetres que intervenen en el moviment, obligant a aïllar molt les condicions d'execució respecte a les habituals de nedar, de manera que només es poden monitoritzar petits moviments, perdent la globalitat i continuïtat del gest, i per tant els

coneixements generats són molt poc aplicables per a la millora del rendiment dels esportistes.

Això porta a la reflexió de que la propulsió en natació és un tema molt complex i que quan es pensa en millora el rendiment dels nedadors en el treball quotidià dels entrenaments, cal buscar altres maneres més senzilles, tot i que no es controlin tots els factors implicats, que permetin determinar la propulsió generada per nedador amb un anàlisi integral que inclogui totes les variables que intervenen habitualment en el gest tècnic, i intentar obtenir dades en un format que serveixi tan a l'entrenador com a l'esportista per a poder mantenir un control regular d'aquest paràmetre, establir valors generals del mateix i poder utilitzar els resultats per a poder ajudar als nedadors a millorar la seva propulsió en el medi aquàtic.

3.2 TÈCNICA DE L'ESTIL LLIURE O CROL

L'estil lliure o crol és el més ràpid dels quatre estils i el més econòmic, és a dir el que proporcionalment suposa un menor cost energètic (Barbosa, Fernandes et al. 2006b), de manera que és el que s'utilitza en les proves de llarga distància i en les d'aigües obertes. Malgrat que, com indica el seu nom, oficialment no hi ha limitacions per a la utilització d'una tècnica específica, generalment els nedadors escullen un estil amb un patró de moviments molt semblant, que es descriurà a continuació.

3.2.1 DESCRIPCIÓ GENERAL DE LA TÈCNICA

Per a poder aconseguir una bona tècnica de nedo, a més de conèixer la manera com la força aplicada es transforma en força propulsiva, que com s'ha vist anteriorment és força complex, s'ha de definir un esquema general bàsic de la tècnica de braçada i batuda per a l'estil lliure o crol, determinant principalment la trajectòria de les extremitats i la inclinació de les mans per a poder aplicar la força en la direcció més propulsiva possible.

Però cal fer dues consideracions importants a l'hora de descriure l'execució de la tècnica. Primer, que no hi ha un patró únic per a la realització de la tècnica òptima de cada estil, sinó que hi ha un rang de variants possibles que depèn principalment de les capacitats fisiològiques de l'individu, de les seves característiques antropomètriques i també de la prova específica de competició (distància). Per una altra banda, també cal considerar altres aspectes, a part de la trajectòria de les extremitats, com són la coordinació general de totes les parts del cos, el gir en l'eix longitudinal o balanceig (generalment anomenat *rolido* en l'àmbit de la natació), quina és la manera més efectiva d'exercir aquestes forces (les millors palanques i angles), el moment òptim de fer canvis de direcció i de ritme de la mà,... per a definir un esquema global del moviment òptim.

Per una altra banda, el que realment ens plantejem quan volem millorar el rendiment d'un nedador és com podem transmetre aquests coneixements al nedador: la descripció de la braçada s'hauria de realitzar en referència al cos del nedador, ja que és una aproximació molt més didàctica, malgrat que la realitat sigui el desplaçament del cos i no el de la mà.

Tot i això, la complexitat que presenten moltes de les explicacions del gest tècnic específic fa pràcticament impossible que el nedador, si se li donessin en aquell format tan descriptiu i teòric, pugui aplicar-les quan neda. Igualment, l'entrenador troba moltes dificultats per a poder valorar si el gest tècnic realitzat és correcte, principalment per les dificultats de visió que presenta el medi aquàtic. Per tant, es tendeix a donar una idea global i que l'alumne nedant trobi la trajectòria i orientació de les superfícies propulsives més adequades per a la seva condició, buscant l'adaptació de la tècnica a nivell individual.

Però com troba cada nedador la millor manera d'impulsar-se a l'aigua (fins i tot en nedadors d'alt nivell)? Cal buscar la sensació de l'aigua (*feeling of the water* en anglès), és a dir, treballar la propiocepció de les seves superfícies propulsives per a sentir la força o recolzament sobre l'aigua i com aquesta llisca per sobre de les mateixes creant la sustentació necessària per a impulsar-se en aquest mitjà. El flux o corrent d'aigua ha de circular des de la zona amb una pressió més elevada a la zona amb menor pressió, creant una circulació d'aigua que envolta la mà i permet la propulsió. Si es pot entrenar al nedador perquè mogui les mans per a poder mantenir aquesta sensació, tindrà molta més facilitat per a mantenir la seva força propulsiva.

En base a les components de les forces propulsives generades, les sensacions que es tenen a les mans com a superfície propulsiva són molt diferents. Si la mà actua com un rem, és a dir, on la principal component del impuls és en la mateixa direcció però en sentit contrari al d'avanç (força d'arrossegament o *drag*), es nota una important pressió de l'aigua al palmell, però no hi ha cap sensació al dors de la mà, ja que el flux d'aigua es separa pels dos costats i crea una important turbulència (grans remolins) fent que es dissipï l'energia sense poder aprofitar-la. En canvi, quan s'aconsegueix que la mà actuï generant forces de sustentació, aprofitant els diferencials de pressió generats, hi ha una sensació de pressió al palmell, però al dors se sent com circulen les

corrents o fluxos d'aigua generats, que posteriorment també passen pel palmell però a una velocitat inferior, creant una major sensació de pressió.

3.2.1.1 Fases principals de la braçada

Segons la proposta de Maglischo (2003), la braçada d'estil lliure o crol es divideix en quatre fases subaquàtiques i una aèria (fig.3.2.1.), en les quals s'hi defineix el desplaçament del braç, de la mà i la variació de la seva orientació en cadascuna, definint un patró estàndard de la tècnica utilitzada en les proves de llarga distància.

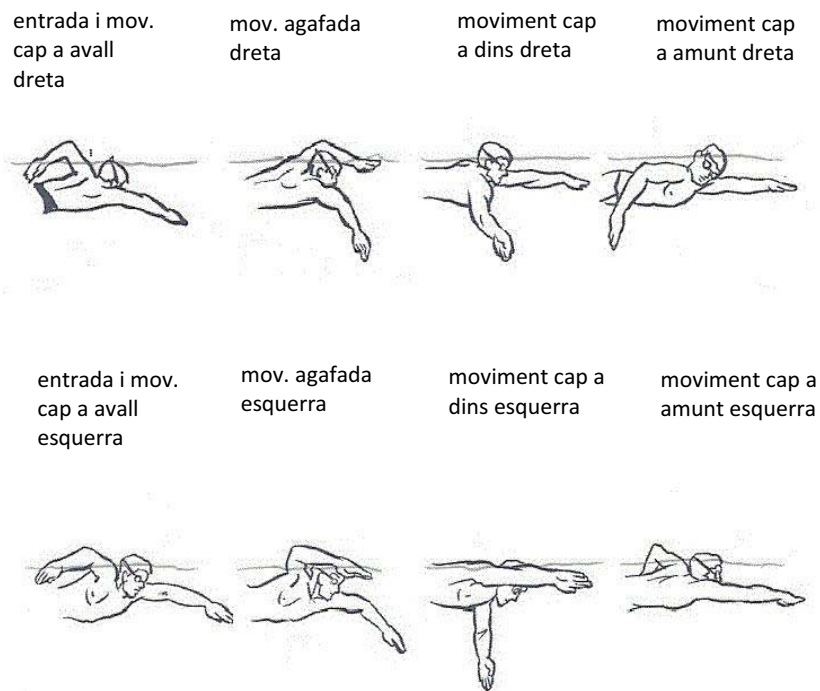


Fig.3.2.1. Fases de la braçada en l'estil lliure, adaptat de Maglischo (2003)

1) Entrada

Tot i que realment podem diferenciar-hi dues fases (estirament i moviment cap avall), hi ha molt autors que les agrupen en una sola, ja que la realització del moviment és totalment enllaçada. La primera part és la fase pròpiament d'entrada o estirament

(*entry* en anglès), i és la fase d'entrada de la mà a l'aigua, fent un moviment per a estirar el braç endavant en una posició aerodinàmica, facilitada per la rotació del cos cap al costat contrari i mantenint el braç dins de l'amplada de les espatlles i la mà amb el palmell cap a fora. La velocitat de la mà disminueix progressivament fins que és el cos el que impulsa endavant el braç.

La segona part, el moviment en direcció cap avall, encara és una fase sense propulsió, ja que la seva funció principal és aconseguir bona posició per a iniciar l'agafada. El canell es flexiona per a moure el palmell cap enfora i enrere, i el braç es segueix movent endavant, flexionant progressivament el colze fins que la mà es situa sota d'aquest i l'avantbraç en direcció cap enrere. La mà s'accelera al principi però després disminueix la seva velocitat per a preparar la propera fase.

2) Agafada

És la fase d'inici de la propulsió i com el seu nom indica serveix per a "agafar-se" (buscar ancoratge) a l'aigua (*catch* en anglès). Amb el colze flexionat a 90º, la mà s'accelera enfora, cap avall i enrere (situant-se lleugerament per fora de la línia de les espatlles), i posteriorment es gira cap a dalt i endins en la direcció del flux o corrent d'aigua, buscant que l'aigua passi per sobre del dors de la mà més ràpid que pel palmell.

3) Moviment cap a dins

Aquesta fase, també anomenada estrebada (*pull* en anglès), s'inicia amb la mà encarada enrere, i es basa en un moviment semicircular cap a dins, cap a dalt i cap a enrere per a situar la mà sota de la línia mitja del cos, a partir només d'una adducció de l'espatlla, mantenint l'avantbraç i la mà alineats, i el colze a 90º. La força la generen els grans músculs de l'esquena i sobretot en la primera part del moviment, ja que el final es considera una preparació per al següent canvi de direcció.

La velocitat de la mà va augmentant moderadament al llarg d'aquest moviment.

4) Moviment cap a dalt

Aquesta fase, que també rep el nom d'empenta (*push* en anglès), és pot diferenciar en dues parts pel seu canvi d'orientació i efecte propulsiu, però cal realitzar-la com un sol moviment o escombrada, per a poder aconseguir la màxima velocitat i per tant de generació de potència (cal buscar aquesta sensació): primer dirigim la mà cap a fora i enrere amb un moviment circular com a fase de transició per a poder sortir de sota del cos i després movem la mà cap a dalt, cap a fora i enrere cap a la part anterior de la cuixa. El colze no té una extensió completa, perquè la mà ha d'anar més ràpid per a poder acabar d'exercir la força abans d'arribar a la superfície de l'aigua, moment on deixa de tindre efecte la tracció, ja que la força es començaria a aplicar cap amunt i no cap enrere.

5) Recobrament

És la fase que permet que la mà torni a situar-se davant del nedador per a poder tornar a començar el cicle, es realitza per fora de l'aigua i per tant no es propulsiva (*recovery* en anglès). Comença abans de que la mà surti de l'aigua, ja que quan aquesta es troba a l'alçada de la cuixa ja no pot seguir aplicant força propulsiva. En aquell moment, s'ha de relaxar la mà i girar el palmell cap al cos perquè hi hagi la mínima resistència en sortir de l'aigua. L'espatlla és la primera part que surt de l'aigua, després el colze i finalment la mà, desplaçant-se cap amunt i endavant amb un moviment semicircular i mantenint sempre el colze alt, fins que passa per davant del cap, quan es comença a fer l'extensió per a tornar a introduir la mà a l'aigua.

3.2.1.2 Fases principals de la batuda

Actualment es considera que el moviment de les extremitats inferiors o batuda de cames, malgrat que té un clar objectiu equilibrador (manteniment de l'alineació del cos tant a nivell horitzontal com lateral), també pot contribuir a augmentar la propulsió, tot i que la seva participació es molt baixa (10%-15%) i suposa un elevat cost

energètic, de manera que a velocitats submàximes i sobretot en especialitats de resistència la seva contribució és molt reduïda (Maglischo 2003).

El moviment de les extremitats inferiors es basa en cicles alterns descendents i ascendents de les dues cames amb un certa component lateral, resultant de la rotació del cos:

- Fase descendent

És la fase propulsiva. Es basa en un moviment com si fos una fuetada (acceleratiu distalment o en forma d'onada) que s'inicia amb una flexió de maluc, quedant-se el peu en la superfície per efecte de la pressió de l'aigua en la cama relaxada, i generant per tant una certa flexió de genoll i extensió de turmell. Posteriorment, quan el genoll es situa per sota del nivell del tronc, cal realitzar una extensió ràpida i amb potència fins a l'extensió total del genoll, propulsant-se sobretot amb la part anterior de la cama i el turmell.

- Fase ascendent

Aquesta fase no és propulsiva, és sobretot un recobrament per a tornar a poder realitzar novament la fase descendent. Es basa en trencar la inèrcia del moviment previ per a iniciar un moviment contrari en sentit ascendent de la cuixa (extensió de maluc) que arrossega la resta de la cama. Ha de ser un moviment passiu, sense pràcticament esforç muscular, ja que si es fa actiu inhibiria la propulsió perquè s'aplicarien forces endavant i amunt que generant forces propulsives en sentit contrari a l'avanç.

3.2.1.3 Coordinacions de l'estil crol

Ens referim a la coordinació entre el ritme o freqüència de cicle del moviment dels braços i de les cames, ja que per la important diferència d'amplitud i durada, podem realitzar diversos cicles de batuda en cada braçada. La sincronització escollida dependrà de les capacitats del nedador i també de la prova específica competitiva: en

proves de fons es buscarà minimitzar la participació de la batuda, buscant un estalvi energètic, mentre que en proves de velocitat s'intentarà aconseguir la màxima propulsió amb les cames per a poder assolir les màximes velocitats de desplaçament possibles.

Generalment, podem diferenciar dos tipus de sincronització principals, i una tercera derivada de les anteriors:

- Batuda de sis temps

És la més comuna en velocistes i proves de mitja distància i inclou tres cicles de batuda (sis fases propulsives) per cada cicle de braçada. Es coordina amb el moviment dels braços de manera es fa coincidir cada moviment descendent amb cada fase o tracció de la braçada (moviment cap avall, moviment cap endins i moviment cap enfora o amunt). Aquesta coordinació contribueix a augmentar les forces propulsives, ja que es reforça la força generada en cada impuls, i s'eviten les possibles desacceleracions que es produeixen en les transicions de cada fase de la braçada.

- Batuda de dos temps

Hi ha un moviment descendent de les cames per cada moviment d'un braç, coincidint la batuda dreta amb la braçada dreta i viceversa. La fase descendent coincideix amb les traccions cap endins i cap amunt del braç corresponent. S'utilitza sobretot en fondistes i en noies, ja que la seva major flotació permet un ritme menor de batuda sense perdre la horitzontalitat. Per a limitar aquest problema, alguns nedadors prèviament al moviment descendent realitzen un petit moviment endins de la cama, creuant-la amb l'altra, per a evitar que quedi suspesa i es pugui enfonsar.

- Batuda de quatre temps

És una combinació de les dues anteriors: en la primera braçada del cicle, es realitza una coordinació en dos temps (només un moviment descendent), mentre que en el moviment de l'altre braç s'adopta una coordinació en sis

temps i es realitzen tres batudes o moviments descendents. És una solució que certs nedadors han adoptat per a minimitzar els efectes de pèrdua d'horitzontalitat del de dos temps, sense una gran despesa energètica.

3.2.2 ASPECTES BIOMECÀNICS A CONSIDERAR PER A OPTIMITZAR LA PROPULSIÓ

L'aspecte que més influeix en l'assoliment d'una bona velocitat, el manteniment d'un bon ritme i la realització d'un moviment econòmic, que minimitzi la despesa energètica i la possible aparició de la fatiga, molt important en la natació competitiva general, però encara més en la natació de llarga distància, és la conservació del moment o inèrcia.

En cada cicle o braçada es genera un impuls (moment) que accelera el cos, augmentant la seva velocitat. Quan més es pugui mantenir aquesta inèrcia (disminució de les fluctuacions d'acceleració), menor serà la demanda energètica per a mantenir la mateixa velocitat i per tant menor cost per unitat de distancia. Els principals aspectes a considerar són:

- La sincronització (també anomenat *timing* pel terme anglosaxó) de l'aplicació de força (moviments propulsius) per a mantenir la velocitat el més constant possible, adaptant-los als canvis de condicions del medi en cada moment

- Els canvis coordinats de la posició del cos (*balanceig* o *rolido*) per a disminuir la resistència de forma, intentant adquirir la posició més hidrodinàmica possible (*streamlining* en anglès). Per exemple, la transició des del final d'una braçada a l'inici de la següent és crític, ja que el cos ha de girar d'un costat a l'altre passant per una posició horitzontal plana quan el braç que fa el recobrament entra i s'estén cap endavant

- Optimitzar la ràtio entre propulsió i frenada per a disminuir al màxim la demanda energètica. Cada acceleració és força i per tant energia, i cada pèrdua de velocitat és un augment de la força que caldrà fer per a vèncer les forces oponents. Si es poden evitar grans acceleracions, les forces de frenada (resistència) del medi es minimitzen i es redueix la despesa energètica associada

- Fer moviments curvilinis: cal evitar els canvis bruscs de direcció en l'aplicació de forces ja que augmenta la força que ha de fer el nedador per a poder trencar la inèrcia en la direcció inicial i poder agafar inèrcia en una altra direcció. A més, les forces aplicades que no ho són directament en el sentit d'avanç, tenen un efecte en el nedador (acció i reacció) que moltes vegades actuen provocant en el cos del nedador desplaçaments laterals que augmenten la resistència de forma

- La diferenciació de la tècnica en funció de la velocitat: els nedadors experts generalment presenten 2 o 3 impulsos en cada braçada quan neden ràpid i només 1 a velocitats més lentes. Aquest estil d'un sol impuls, generalment presenta braçades molt llargues i una baixa freqüència, i no permet accelerar mantenint el mateix estil tècnic, associant-se sobretot a fondistes o nedadors amb poca potència propulsiva, amb una tècnica més suau i amb petits canvis de direcció progressius. En canvi, nedar a altes velocitats requereix canvis bruscs de direcció de les mans, que alliberen ràpidament diversos vòrtexs en cada fase propulsiva o impuls. Aquests vòrtexs es poden observar en l'estela del nedador i per tant ens permeten valorar indirectament les fluctuacions intracíclics de les forces propulsives aplicades

- Si s'observen els vòrtexs alliberats a l'aigua, aquests haurien de ser circulars i no el·lipsoïdals, ja que els primers són el resultat d'actuar sobre una gran àrea o massa d'aigua a poca velocitat, mentre que si el remolí és allargat és que s'ha fet l'impuls sobre un àrea d'aigua menor adquirint aquesta una major velocitat, de manera que la força propulsiva predominant és la *drag* o força d'arrossegament (propulsió en direcció contrària a l'avanç). Com ja s'ha dit anteriorment, és millor fer

força sobre molta aigua a baixes velocitats que sobre poca aigua amb una gran acceleració.

- Els nedadors experimentats presenten una gran contribució de moviments en els plans vertical i lateral, i unes velocitats més altes també en aquests plans. Quan la velocitat de les mans assoleix el seu màxim valor en una direcció, aquesta aplicació de força només s'ha de mantenir un instant breu i canviar ràpid de direcció, ja que sinó l'aigua s'accelera massa i es perd recolzament (es comença a "patinar"), disminuint la velocitat d'avanç pel fre que suposa el medi aquàtic

- Importància de la longitud de braçada com a factor d'eficiència. Tal i com s'ha dit abans, la mà no es desplaça enrere, sinó que ha d'intentar sustentar-se en l'aigua per a fer que el cos avanci. Quan millor s'aconsegueixi aquest recolzament, menys força es transfereix al medi accelerant-lo, més lentament es mou la mà en relació amb el cos i per tant més distància es pot avançar amb cada braçada

- A causa de l'elevada resistència del medi aquàtic, és important valorar quins aspectes poden minimitzar aquesta resistència generada. Per exemple, pel que fa a la resistència de forma o frontal, tal i com s'ha indicat anteriorment, s'ha d'intentar mantenir la posició més hidrodinàmica possible. La resistència de fricció, no depèn tan del nedador com de la major o menor rugositat de la superfície corporal en contacte amb l'aigua, i per això darrerament s'està treballant tant en aconseguir teixits el més hidròfugs possibles (intentar que l'aigua no s'hi enganxi i que per tant llisqui el millor possible), que poden disminuir fins un 6,2% ($\pm 7,9$) la *drag* i un 4,5% ($\pm 5,4$) la despesa energètica amb banyadors de cos sencer (Chatard and Wilson 2008). Finalment, la resistència d'onada, dependrà molt de la possibilitat d'evitar la generació de les mateixes o turbulències en el medi: aquest aspecte va molt lligat amb els aspectes anteriors, ja que la menor fluctuació d'acceleracions o el manteniment d'una posició hidrodinàmica afavorirà una menor fluctuació del medi quan es travessa, però també està condicionada per altres factors com: allargar la mà endavant en la fase d'entrada per tal d'augmentar la llargada del nostre cos, incrementant la "hull-speed" o *velocitat*

límit del cos; mantenir un bon ritme de batuda de cames que trenca el buit o zona de baixa pressió posterior del nedador disminuint el seu efecte de succió (Toussaint and Truijens 2005); poder nedar la major distància possible per sota l'aigua (sortides i viratges), ja que aleshores no generem onades; i principalment cal considerar la velocitat, ja que a partir d'un punt, la resistència d'onada augmenta exponencialment, concretament, en un estudi de Toussaint, van Stralen et al. (2002b), es va trobar que el límit són 1,6 m/s (per sota els efectes són menyspreables) i per sobre (1,89 m/s) la resistència d'onada és un 12,1% de la resistència total (11,5N)

- Intentar aprofitar el màxim possible l'efecte de la *massa afegida* de l'aigua. Durant les fases acceleratives del cicle, la resistència *drag* i la inèrcia tenen un efecte de frenada en el desplaçament frontal del nedador. Aquesta frenada es crea per la massa del nedador i la massa d'aigua que s'accelera amb ell enganxant-s'hi. Quan el nedador desaccelera, en situacions de recobraments o fases poc propulsives, la inèrcia global del sistema nedador i aigua contraresta la resistència de l'aigua per l'impuls de la massa d'aigua per darrere, limitant les forces de resistència i per tant la baixada de la velocitat sense augmentar la força aplicada (Leblanc, Seifert et al. 2007).

Com es pot veure hi ha molts aspectes importants a considerar per a poder realitzar el millor gest tècnic possible i sobretot aprofitar-se de diversos principis biomecànics i hidrodinàmics que afavoreixin el manteniment de la velocitat d'avanç amb el mínim esforç, la maximització de la generació de forces propulsives i la minimització de les resistives. Per això, la tècnica en natació es considera una de les habilitats més complexes dels diferents tipus de desplaçaments, i una bona realització del gest és el factor més important per a poder aconseguir un bon rendiment.

L'anàlisi descriptiu del gest tècnic, generalment mitjançant filmacions en tres dimensions, malgrat que en els inicis de la recerca en natació als anys 70 va ser un aspecte molt important per a poder descriure l'estil general de la tècnica de nado, actualment ja no és un tema rellevant d'estudi, perquè ja s'ha descrit a nivell global el moviment de la braçada i batuda, i un rang de variacions habituals d'una bona tècnica, determinant graus de flexió de les diferents articulacions, sincronització de les

diferents parts del cos,... Però tal i com s'ha dit anteriorment les variacions individuals són considerables i per tant no es poden definir variables biomecàniques claus que ens ajudin a millorar el gest tècnic per a la millora del rendiment en atletes d'alt nivell.

En canvi, el que és realment important, són els resultats a nivell propulsiu que s'aconsegueixen, és a dir, si realment el gest realitzat, sigui quin sigui, aconsegueix maximitzar la generació de forces propulsives, minimitzar la resistència de l'aigua i aconseguir una bona eficiència propulsiva, minimitzant el cost energètic associat. Per tant, cal determinar quines poden ser les variables claus que ens ajudin a diferenciar als nedadors d'alt rendiment, per a poder crear eines que ens permetin valorar el seu nivell actual en les mateixes i monitoritzar-ne l'evolució, proporcionant dades tant a l'entrenador com a l'esportista per a millorar els entrenaments i el resultat en competició. Per això, a continuació es presenta, com a segon bloc de l'anàlisi del marc teòric, un capítol dedicat als estudis científics realitzats sobre tots els factors que poden influir en la tècnica resultant.

4. DETERMINACIÓ DELS FACTORS DE RENDIMENT EN NATACIÓ

La literatura científica relacionada amb la recerca en natació presenta una gran varietat d'estudis que volen analitzar el rendiment des de diferents factors. Inicialment, es van centrar els estudis en determinar la despesa energètica. Els primers van ser Liljestrand i Stenström que, des del 1919, van estudiar l'evolució de diferents paràmetres fisiològics en subjectes que nedaven braça, determinant que el cost energètic augmentava amb la velocitat i en funció del pes corporal. Van seguir els estudis comparant homes i dones, veient que aquestes últimes tenien un menor consum energètic per un major percentatge corporal de greix.

Posteriorment, han seguit treballant en el tema altres autors com Greene (1930), Schmelkes (1935), Egolinski (1940) o Karpovich i Millman, que el 1944 van determinar les diferències energètiques entre els 4 estils, malgrat que les dades, pels mètodes d'anàlisi del moment, es van sobreestimar (di Prampero 1986). Però en comparació amb la cursa a peu o el ciclisme, en els quals els factors energètics influeixen més, en la natació es va començar a veure que els estudis dels factors de rendiment s'havien d'enfocar cap més cap a l'anàlisi de la biomecànica del gest tècnic per les característiques específiques que presenta el medi aquàtic, que s'han explicat en el capítol anterior, sobretot la resistència a l'avanç, que a diferència del medi aeri, a l'aigua té una relació cúbica amb la velocitat d'avanç, de manera que la millora en les forces aplicades o generades no sempre es tradueixen en canvis en la velocitat de desplaçament, ja que es produeix un augment molt elevat d'aquesta força d'oposició (Zamparo, Capelli et al. 2011). Aquest fet fa que es pugui arribar a millorar molt el rendiment (velocitat d'avanç) sense un canvi paral·lel de les capacitats fisiològiques.

Els tres aspectes biomecànics considerats clau per a l'estudi del rendiment en natació són: la capacitat de generar forces propulsives, la disminució de les resistències de l'aigua, i sobretot l'eficiència propulsiva (percentatge del treball total destinat a l'avanç), és a dir, la capacitat de reduir al màxim l'energia perduda accelerant les masses d'aigua, sent aquesta darrera variable la que millor correlaciona amb el

rendiment (Toussaint and Truijens 2005). A continuació es farà una revisió dels resultats obtinguts en cadascun d'aquests temes.

4.1 ANÀLISI DELS DIFERENTS FACTORS QUE AFECTEN A LA PROPULSIÓ

4.1.1 DETERMINACIÓ DE LA RESISTÈNCIA DE L'AIGUA

Com que s'estableix la minimització de les resistències generades pel medi a l'avanç com un dels factors claus per a la millora del rendiment, molts autors inicialment van enfocar els estudis en natació amb la idea de quantificar aquest paràmetre. Com que la disminució de la mateixa depèn no només de la millora de la tècnica, sinó també de factors antropomètrics, calia diferenciar la influència d'aquests dos aspectes per a poder determinar en quin grau podien modificar el rendiment o la millora de la velocitat en el medi aquàtic (Mason, Formosa et al. 2002).

En la història de les investigacions en natació, s'han fet diferents propostes per a poder valorar aquest aspecte, dividides principalment en dues variants: determinació de la resistència passiva, és a dir quan el cos es desplaça per l'aigua sense realitzar cap moviment (com si fos un objecte inert); i determinació de la resistència activa, és a dir la que es genera quan es produeixen els moviments propis del gest tècnic de la natació, de manera que la forma i perfil del cos canvia contínuament, ja que les extremitats es mouen, i a més genera turbulències (Havriluk 2007).

4.1.1.1 Estudis sobre la resistència passiva

Inicialment es va quantificar la resistència de l'aigua a l'avanç del cos de forma passiva, arrastrant el cos per l'aigua o en piscines de flux, ja que era un mètode força senzill. Havriluk (2007), en un article on fa un metaanàlisi dels diferents estudis realitzats sobre la resistència de l'aigua, va classificar els principals mètodes per a analitzar aquesta resistència passiva, que són els tres següents: el remolcament en una piscina, amb una galga en la línia d'arrossegament per a poder mesurar la força a

vèncer; la mesura en una piscina de flux igualment amb el cable i la galga que mesuren la força amb que l'aigua empeny el cos, i l'arrossegament del cos situat en una plataforma que es mou per un tanc de fluid. Després d'examinar tots els articles publicats fins l'any 2004, va concloure que els resultats obtinguts mitjançant els tres mètodes no presenten diferències significatives (Havriluk 2007).

Aquest mètode d'anàlisi ofereix una dada específica per a cada individu, ja que depèn principalment de les seves característiques antropomètriques, i per tant permet determinar com influeixen els diferents factors antropomètrics, com són l'alçada, l'àrea transversal del cos, la longitud de les extremitats superiors o el percentatge de massa grassa en aquesta resistència passiva. Els resultats difereixen en funció de les condicions de realització dels tests, com per exemple si es realitza subaquàtic o a nivell de superfície, dorsal o ventral, aixecant o no el cap,... però sobretot la velocitat de desplaçament, que cal que sigui igual i constant. Pertant, és important tenir en compte les condicions de les proves quan es comparen diferents estudis i que no es modifiquin durant la presa de dades.

Relacionat amb aquest tipus d'estudis, es va proposar l'anàlisi de la flotabilitat com un factor determinant de la resistència a vèncer a l'aigua i per tant de la despesa energètica resultant en el desplaçament del cos en el medi aquàtic, ja que els estudis metabòlics havien trobat diferències de fins un 30% en la despesa de nois i noies de forma i nivell tècnic semblants, i s'havia atribuït aquestes diferències a la diferent distribució de pes o densitat del cos, que es pot traduir en una major o menor flotabilitat i per tant en una major o menor resistència a l'arrossegament. Per tant, també es van plantejar alguns estudis valorant l'efecte del que es va anomenar *moment de rotació subaquàtic* (*underwater torque* en anglès, i per tant representat com a T), que és el producte de la força amb la qual el nedador té tendència a enfonsar-se per la distància entre els peus i el centre del volum pulmonar: es va buscar una correlació entre l'augment del T i el de la despesa energètica nedant per a poder determinar la importància d'aquest factor en el rendiment (Zamparo, Capelli et al. 1996), i el resultat va ser que malgrat que sí que augmentava la despesa, ho feia en un

grau molt menor al de les variacions del “torque”, convertint-lo en un factor a considerar però no decisiu.

4.1.1.2 Estudis sobre la resistència activa

Però la mesura de la resistència de l'aigua com un cos estàtic no es considera un sistema gaire vàlid, perquè es realitza en condicions molt diferents a les del nedo, ja que els moviments continus dels braços i de les cames alteren la circulació del fluid del voltant, modificant molt els registres de *drag*, però sobretot perquè no es considera la influència de la tècnica del nedador i la possible disminució d'aquesta resistència en funció de la bona execució del gest tècnic de l'estil de nedo.

Per tant, es van començar a implementar sistemes per a la quantificació de la resistència activa de l'aigua. Havriluk, en el mateix article citat anteriorment, també va fer el metaanàlisi dels estudis sobre la resistència activa de l'aigua, els quals va classificar en tres tipus de mètodes:

- Mètodes que afegeixen o treuen resistència, amb un sistema que remolca el cos mitjançant un sistema de politges i que amb una certa càrrega augmenta o disminueix la resistència que ha de vèncer el cos. La regressió lineal de la variació en el consum d'oxigen resultant de les diferents forces aplicades permet definir el coeficient de resistència activa.
- Mètodes que afegeixen resistència intentant mantenir la mateixa potència desenvolupada, que van proposar inicialment Kolmogorov i Duplisheva el 1992, anomenant-lo *mètode de pertorbació de la velocitat (velocity perturbation method* o VPM) en el qual el nedador ha de nedar a la màxima velocitat possible durant uns 30m primer remolcant un cos hidrodinàmic darrere, que crea una resistència addicional, i després lliure, per tal de poder determinar la diferència de velocitat assolida en les dues situacions. Els dos punts dèbils que es plantegen per a aquest sistema són, per una banda, el fet de que només es pugui realitzar a velocitats màximes, i per

una altra, que no es pot assegurar que s'està mantenint la mateixa potència desenvolupada en les dues proves (Toussaint, Roos et al. 2004).

- Mètodes que no afegeixen resistència, amb un sistema que s'explicarà posteriorment, anomenat *MADSystem*.

Després d'examinar tots els resultats publicats mitjançant una distribució de freqüències, Havriluk va concloure que dos dels mètodes, el VPM i el MADSystem presentaven resultats coincidents als de la resistència passiva, de manera que es podia deduir que clarament hi havia un error sistemàtic en les mesures amb aquests mètodes. En canvi, el tercer mètode oferia coeficients de resistència molt més elevats, fet que es pot interpretar com a esperat, ja que s'esperava una variació, però com que clarament mesura un efecte diferent que els dos anteriors, tampoc es pot afirmar que sigui un sistema adequat i per tant no es pot definir un mètode definitiu per a poder mesurar aquesta variable (Havriluk 2007).

Tornant al tercer mètode, un dels sistemes d'anàlisi més utilitzats i acceptats és el MADsystem® (Measuring Active Drag system) (fig.4.1.1.), desenvolupat per Hollander i cols. (Hollander, De Groot et al. 1986). En base al principi de que les forces propulsives són igual però de sentit contrari a les forces resistives, es va buscar quantificar aquestes primeres. L'aparell consta d'unes petites plataformes enfonsades per a permetre al nedador recolzar-se en elles amb la mà en cada braçada de l'estil crol, de tal manera que tota la força produïda es destina a l'avanç, no s'ha d'accelerar l'aigua, fent que el registre de la força aplicada mitjançant un transductor integrat sigui equivalent a la resistència de l'aigua. Per a evitar errors, no es permet al nedador que utilitzi les cames, situant un *pull-buoy* enmig per a evitar que s'enfonsin.

Com es veurà posteriorment, amb aquestes mesures, i coneixent després la potència mecànica produïda pel nedador en el nedo habitual a la mateixa velocitat, també es pot determinar la seva eficiència propulsiva fent un coeficient entre les mateixes, és a dir, sabent quina part es destina a accelerar l'aigua (Toussaint, Beelen et al. 1988).

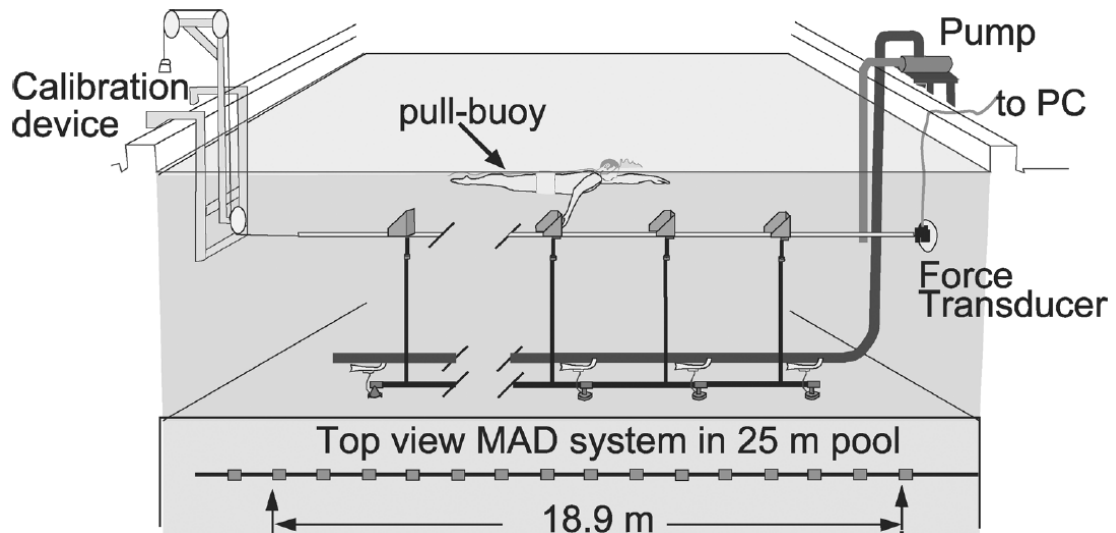


Fig. 4.1.1. Visió esquemàtica del MADsystem®, lateral i superior (on es veu la situació de totes les pales) (extret de Toussaint and Truijens 2005)

Aquest sistema també permet determinar la relació entre la resistència i la velocitat, i comparar subjectes de diferent gènere o nivell a iguals intensitats (ja que podem assegurar que mantenen la mateixa potència desenvolupada). Però el problema que trobem tant amb aquest sistema com amb tots els anteriors, és que la resistència a vèncer, tal i com s'ha exposat anteriorment, prové de tres components (resistència de forma, de fricció i d'onada), i en cap d'ells no es pot diferenciar la contribució de cadascun d'aquests components. Caldria realitzar altres estudis per a poder quantificar la importància relativa de cadascuna diferenciadament i com es modifiquen (Toussaint, van Stralen et al. 2002b).

L'estat actual de la mesura de la resistència activa en nedadors queda resumida per la frase de Hay (1988) (extreta de Toussaint, Roos et al. (2004)): "la consistència no és una característica dels resultats obtinguts en la resistència activa... un no pot esperar avaluar l'habilitat dels nedadors per a minimitzar la resistència, si amb prou feines podem mesurar les forces desenvolupades amb un cert grau de precisió".

4.1.2 DETERMINACIÓ DE LA FORÇA APLICADA

Davant de la impossibilitat de valorar de manera directa la resistència activa i les incerteses de validesa que presenten alguns dels mètodes proposats, l'altra aproximació per a poder determinar l'esforç que està realitzant el nedador és quantificar la força generada. Aquests estudis podrien substituir en part els estudis anteriors, perquè quan el cos es mou a velocitat constant, la força propulsiva és equivalent a la força resistiva. El problema que apareix en aquestes valoracions és que la força o treball extern (*power output* en anglès, i per tant abreujat com a P_o) no es pot utilitzar tot per a avançar, ja que una part de la mateixa es perd transferint energia cinètica al fluid, de manera que cal trobar un mètode que permeti diferenciar aquestes dues components. L'ideal seria doncs poder determinar la capacitat de generar forces propulsives pel nedador, és a dir, de valorar la seva eficiència, ja que és un factor determinant del rendiment i per tant diferencial entre els nedadors de major o menor nivell.

Els diferents estudis de recerca relacionats amb el tema s'han plantejat amb mètodes i paràmetres molt variats, però actualment no existeix cap sistema que permeti la quantificació de la força propulsiva exercida pel nedador en condicions de nedo real; tots els procediments són aproximacions que busquen apropar-se el màxim possible al mètode amb menys interferències i que pugui analitzar el moviment sense limitacions.

Principalment, la valoració de la força del nedador es pot realitzar de tres maneres diferents (força general o en sec, mesures indirectes i mesures directes) que s'analitzaran a continuació.

4.1.2.1 Determinació de la força general

Aquests tipus de mesures de la força busca valorar la força de la musculatura implicada en el gest habitual de l'estil o amb simulacions en aparells dissenyats

expressament per a poder reproduir de la manera més fidel possible la tècnica específica de nedo, i es realitza fora de l'aigua (també anomenat *en sec*).

La mesura de la força inespecífica de la musculatura implicada es realitza generalment de manera isomètrica, mesurant la força de tracció amb un o dos braços (implicant principalment el dorsal ample i el subescapular). Aquest exercici permet definir les característiques de la força muscular dels nedadors d'alt rendiment de diferents especialitats i gènere, perquè la força no té la mateixa importància en totes les proves, i alhora poder valorar un possible desequilibri o diferència bilateral i poder relacionar-lo amb diferents paràmetres del cicle per a diferenciar la tècnica específica de cada nedador (Tourny-Chollet, Seifert et al. 2009).

Un altre tipus de proves són les que valoren la força en un moviment que simula la braçada: es realitzen amb un ergòmetre que permet realitzar una trajectòria dels braços semblant al gest tècnic de nedo anomenat *banc Biokinetic* (Sharp, Troup et al. 1982; Chollet 1992). També permet determinar les diferències de força entre els dos braços i relacionar-los amb el costat dominant: Potts, Charlton et al. (2002) van poder determinar una important diferència o desequilibri dels registres de força entre els nedadors que respiraven bilateralment (51% esquerra i 49% dreta) i els nedadors que només ho feien unilateralment (57% esquerra i 43% dreta), de manera que es pot actuar tan tècnica com muscularment per a poder compensar aquestes diferències.

Posteriorment s'han desenvolupat alguns ergòmetres que també simulen el moviment de les cames i permeten determinar la capacitat de generació de potència de les mateixes, observant que es poden assolir valors de treball generat (*power output* en anglès) fins i tot superiors amb les cames que amb els braços (312 ± 26 W i 225 ± 31 W respectivament) (Swaine 2000), malgrat que posteriorment els valors de transmissió d'aquesta potència generada en força propulsiva són molt inferiors en les cames, per les diferències en les trajectòries de moviment i l'eficiència resultant.

Els resultats obtinguts amb aquests mètodes presenten per una banda el qüestionament de la transferència d'aquesta força en propulsió: en el primer cas, perquè l'exercici és totalment diferent al gest tècnic de la braçada i per tant no es valora la coordinació intermuscular específica; mentre que en el segon cas, caldria saber si la seva eficiència propulsiva li permet transformar aquesta força en propulsió.

Per una altra banda, les forces ofereixen un sol valor absolut, sense poder conèixer les components vectorials en cada direcció, i per això es proposen altres mètodes que permeten una valoració tridimensional.

4.1.2.2 Mesures indirectes

Les mesures indirectes de la força es van realitzar inicialment, en un primer treball presentat per Schleihauf el 1979, mitjançant rèpliques de les extremitats de resina sintètica que es movien per canals de flux que simulaven els moviments que realitza la mà en el gest tècnic de la braçada (situant la mà en tots els angles d'atac i angles azimut possibles) per a poder determinar les components de força generades en cada posició. Berger, de Groot et al. (1995) van repetir l'estudi amb una extremitat que també incloïa l'avantbraç confirmant les components dels vectors de força generats i que els angles més eficients (relació força generada i força produïda) eren aquells en els quals predominava la component vertical de la força (*lift*), però va afegir que el més important era modificar contínuament la posició de la mà i que la seva velocitat fos elevada (moviments sinusoïdals), ja que l'avantbraç tenia una contribució menor i es desplaça molt menys.

Aquests sistemes presenten una diferència important respecte al moviment de nedo real que limita la extrapolació dels resultats: tant la mà simulada com el nedador en filmació no es desplacen, sinó que o bé és el flux el que es mou, o bé el desplaçament es resisteix amb càrregues, de manera que s'alteren clarament les condicions de desplaçament perquè el medi no presenta les modificacions habituals (vòrtexs i canvis de moment) que tindrien lloc en el nedo habitual per les acceleracions de les superfícies propulsives, transformant-se en una valoració basada en els principis de la hidrodinàmica de fluids quasi-estables. Conseqüentment, els gràfics comparats permeten comprovar com tant la velocitat de moviment de les extremitats com les fluctuacions i pics en les diferents fases de la braçada canvien molt en aquestes situacions a velocitat zero (sense desplaçament), i a més tant la quantitat final de força aplicada com l'amplitud de la braçada és molt superior (Arellano 1992) i les forces

generades no es corresponen amb les variacions en el consum d'oxigen del nedador (Berger, Hollander et al. 1997).

Per tant Sanders (1999) va proposar un nou estudi en el qual es poguessin determinar les forces generades en 3 dimensions amb una mà en moviment accelerant en la direcció del fluid, de manera que es tinguessin en consideració els efectes de l'acceleració del fluid amb els canvis de velocitat, que són de naturalesa inestable (inèrcia o massa afegida i vòrtexs), i per tant les forces generades canvien contínuament malgrat mantenir la posició de la mà. Els resultats obtinguts van ser uns valors considerablement inferiors quan es considerava la component d'acceleració de la mà en la generació de forces propulsives, perquè el desplaçament o velocitat del fluid provocada minimitza la generació d'aquesta propulsió.

Posteriorment s'ha millorat el mètode utilitzant sistemes d'anàlisi cinemàtic en 3D per a poder quantificar la magnitud i direcció de les forces aplicades (Berger, Hollander et al. 1999), valorant de manera directa els moviments realitzats per un nedador i determinant els valors de la força generada. Les dades no presenten diferències significatives amb les dades obtingudes amb el MADSystem (menys d'un 5%), però segueixen sense considerar el factor més important de la propulsió en natació: la part d'aquesta força destinada a accelerar les masses d'aigua, que només es pot valorar amb mesures directes, és a dir, nedant a l'aigua.

Actualment, les determinacions de la força generada es fan amb un programa informàtic citat anteriorment, la computació dinàmica de fluids o CFD, que creant un model informàtic de la mà calcula les forces que genera en el fluid, podent considerar tan les acceleracions de la mà com els moviments en rotació (Rouboa, Silva et al. 2006).

4.1.2.3 Mesures directes

Són les que es realitzen a l'aigua amb diferents sistemes de registre durant el desplaçament natural del nedador o en una situació modificada. Les limitacions de poder utilitzar certs aparells a l'aigua fan que moltes vegades les mesures no

reproduueixin fidelment les condicions del nedo habitual. Podem diferenciar quatre mètodes principals:

1. Mesura de la tracció a velocitat zero (sense desplaçament o *tethered swim* en anglès) (Arellano 1992)

Es basa en la mesura de la força de tracció nedant frenat per una goma lligada amb un cinturó per un extrem i a un dinamòmetre o galga extensiomètrica per l'altre, per a registrar la força aplicada. Malgrat que s'ha utilitzat en molts estudis, i en alguns ha mostrat correlacions amb el rendiment, sobretot en especialitats de gran velocitat, no es considera una prova vàlida, perquè el nedo estàtic o sense desplaçament canvia molt les condicions de generació de forces propulsives, ja que sempre ens movem en la mateixa massa d'aigua, i per tant aquesta està molt remoguda.

2. El *MADSystem*

És un instrument on clarament podem mesurar les forces aplicades en cada braçada, ja que les plaques de recolzament submergides estan equipades amb una sensors que mesuren la força aplicada, però com que s'elimina el desplaçament del flux en el recolzament de la mà, novament no és una prova que mesuri realment la força propulsiva. A més, aquesta prova només inclou el moviment dels braços, i situa el cos en una situació artificialment horitzontal per la utilització d'un *pullbuoy* (suro situat enmig de les cames per tal que no s'enfonsin), limitant l'estudi de la tècnica global de l'estil. Malgrat tot, són unes dades molt vàlides per a poder determinar diferències entre nedadors i correlacionar els resultats amb el rendiment.

Tot i això, aquesta alteració és la que ens serveix per a poder determinar l'eficiència propulsiva, ja que si podem replicar la intensitat de nedo (mitjançant la determinació de la despesa energètica amb el consum d'oxigen), podem veure la diferència entre el nedo lliure i el nedo amb el *MADSystem*, i per tant determinar quina part de la força generada s'ha perdut accelerant

l'aigua (Toussaint, Beelen et al. 1988; Toussaint 1990; Toussaint, Knops et al. 1990b).

3. Utilització de pales o guants instrumentats

Aquests aparells disposen de sensors piezoelèctrics per a poder registrar les forces de pressió de les mans durant el nedo lliure de manera que, a més de permetre avaluar de manera general la força aplicada, també permeten determinar les diferències entre cada fase propulsiva, comparar les accions dels dos braços i els efectes de la fatiga.

Un dels primers estudis en utilitzar un mètode de diferencials de pressió per a determinar la força hidrodinàmica que actuava en la mà del nedador, assumint que aquesta força estava causada principalment pel diferencial de pressió entre les superfícies palmar i dorsal de tota la mà, el van realitzar Takagi and Wilson (1998), creant un guant amb 88 sensors de pressió. Es van obtenir bones correlacions entre la pressió resultant i la força aplicada (determinada a partir del nedo resistit amb una càrrega coneguda), considerant-se per tant un bon mètode per a avaluar aquest tipus de força.

Posteriorment Bottoni, Lanotte et al. (2010) van fer un estudi molt semblant amb un altre aparell, el KZ de Aplab (Roma, Italia), que consta d'unes petites pales de fibra de carboni que es situen a l'alçada de la primera i segona falange tant al palmell com al dors de la mà, també registren la pressió de l'aigua i, en base al diferencial de pressió, es determina la força exercida per part del nedador. Les dades obtingudes van establir una correlació molt elevada entre la força aplicada i la propulsió generada, però calen estudis amb major nombre de subjectes per a poder treure més conclusions.

Aquests mètodes presenten el problema de que s'haurien de sincronitzar les mesures de pressió amb una filmació en tres dimensions per a conèixer l'orientació de la mà i poder determinar la direcció de la força aplicada.

4. Mesura de l'activitat muscular amb electromiografia de superfície o EMG

Actualment, la tecnologia permet realitzar lectures de l'activitat muscular directament en el nedo a l'aigua i telemètricament, de manera que es pot saber quins músculs s'activen, quin té més o menys protagonisme, i com afecta la fatiga en l'activació muscular tan quantitativa com qualitativament. A més, realitzant un anàlisi cinematogràfic sincronitzat amb la electromiografia podem determinar quins músculs s'activen en cada fase de la braçada i si la fatiga modifica la seva participació.

Els primers estudis d'electromiografia en natació els van realitzar Nuber, Jobe et al. (1986) i posteriorment altres autors n'han fet altres obtenint resultats molt semblants i afegint nous aspectes com l'anàlisi de l'acció de les cames (Figueiredo, Sanders et al. 2013). Es va determinar que el supraespinós, l'infraespinós, la porció mitja del deltoides i el serrat anterior s'utilitzen principalment en el recobrament, mentre que la fase de tracció la realitzen sobretot el dorsal ample i el pectoral major; el bíceps participa en ambdues fases. En quant a l'acció de les cames, tant el bíceps femoral com el recte del quàdriceps s'activen en les dues fases, però el primer participa més en la fase ascendent o de recobrament, mentre que el segon té el protagonisme en la descendent o propulsiva.

Però la força produïda pel nedador només ha mostrat correlacions significatives amb el rendiment en natació en proves de curta durada (Smith, Norris et al. 2002). A més, s'ha proposat que els nedadors d'alt nivell, a velocitats submàximes, varien contínuament la posició o inclinació de la mà, modificant la seva trajectòria i reduint les fluctuacions de la velocitat instantània de la mà, de manera que, sense augmentar la producció de força, es pugui aconseguir disminuir la despesa energètica a una certa velocitat, o millorar la velocitat o registres competitiu (Swaine and Reilly 1983).

Aquesta capacitat adaptativa es produeix per una major sensació o propiocepció dels seus moviments a l'aigua, de manera que estimular al nedador des del principi per a buscar aquestes sensacions kinestèsiques és molt important. Un altre dels factors que afavoreix aquest estalvi energètic és la regulació de la propulsió, ja que mantenint

una constància en la velocitat d'avanç o moment adquirit (poques acceleracions i frenades), es pot facilitar l'economia. Per tant, en proves submaximals o de fons, en les quals aquest factor és molt més important, el factor diferencial no és la força o treball generat, sinó la regulació de la força efectiva i el manteniment de la mateixa al llarg de la prova.

Per tant, tot i que hi ha una relació important entre força propulsiva i velocitat, nedar i sobretot nedar ràpid no depèn tant de generar forces elevades sinó d'aconseguir la màxima propulsió amb unes capacitats metabòliques determinades, és a dir, evitant grans despeses energètiques (Toussaint and Beek 1992).

4.1.3 INTERACCIÓ DELS DIFERENTS FACTORS BIOMECÀNICS I ENERGÈTICS

La valoració de la bioenergia o despesa energètica associada en les diferents activitats físiques, sobretot les de resistència, és un dels temes més recurrents en les investigacions relacionades amb les ciències de l'esport. Amb la millora de la tecnologia, les determinacions de les diferents variables fisiològiques que permeten conèixer els canvis energètics derivats (principalment consums d'oxigen o concentracions de lactat), es poden fer durant la realització de l'activitat física específica o *in vivo*, de manera que podem correlacionar molt millor l'energètica amb el rendiment, comparar esportistes de diferents nivells o gènere, els canvis associats a cada intensitat, la tècnica, ...

En el cas de la natació, per a poder estudiar i entendre les variacions de la despesa energètica, cal considerar els factors diferencials del desplaçament en el medi aquàtic: l'adquisició d'una certa velocitat del fluid quan s'hi aplica força, de manera que només una part de la mateixa es tradueix en avanç, i la resistència a l'avanç que ofereix l'aigua. Per tant, en la investigació en natació no només cal conèixer la potència metabòlica generada, sinó també el treball extern produït, la relació dels quals anomenen eficiència. Segons un article de di Prampero (1986), en el qual revisa

diferents autors, aquesta eficiència no arriba ni al 10%, convertint la natació en un dels mitjans de locomoció de l'ésser humà amb el cost energètic més elevat i en el qual s'assoleixen velocitats màximes més baixes. Per això els estudis científics s'han centrat en valorar l'eficiència de desplaçament en natació com a factor més determinant del rendiment.

Prèviament, cal considerar com es determina aquesta despesa energètica. En el cas de les activitats a nivell submàxim, on pràcticament tota l'energia produïda prové de vies aeròbiques, la determinació es realitza a partir de l'anàlisi consum d'oxigen (VO_2). En activitats maximals, cal considerar altres fonts energètiques com les anaeròbiques, determinades principalment per les concentracions de lactat, però la conversió d'aquestes dades a la seva despesa energètica associada (kJ/m) presenta molta més controvèrsia (Zamparo, Capelli et al. 2011).

Una vegada s'ha determinat aquesta variable, cal definir les diferents components del treball produït pel nedador quan es realitza la transformació d'aquesta energia. Prèviament cal considerar que quan valorem la despesa energètica de l'organisme (*power input* en anglès, representat per les sigles P_i o E segons les fonts), cal considerar que no tota es tradueix en treball generat (*power output*, P_o o W_{tot}), sinó que una part de l'energia muscular es perd en forma de calor.

Després, si analitzem aquest treball produït, podem veure que es destina a diferents finalitats. Per una banda cal moure les extremitats (treball intern o W_{int}), el que habitualment es considera una despesa energètica de base, ja que no és la part que genera propulsió o avanç, sinó la despesa simple del gest tècnic propi de cada tipus de moviment o activitat. L'altra part de l'energia, la que es tradueix en un treball extern o transferència d'energia, per les particularitats que presenta el desplaçament en el medi aquàtic, alhora es divideix en dues components: la que es destina a moure el fluid, és a dir, l'energia que es transfereix a l'aigua accelerant-la (es representa amb les sigles W_k , perquè es transforma en energia cinètica), i que per tant es perd, i aquella força que proporcionarà desplaçament o propulsió generant forces reactives o d'empenta a l'aigua, és a dir, la destinada a vèncer la resistència de l'aigua per a avançar (es representa com a W_d perquè contraresta les forces *drag*).

En base a aquestes components del treball produït, diferenciem els següents tipus d'eficiències (Zamparo, Capelli et al. 2011):

- Eficiència mecànica o global:

La valoració de l'eficiència amb la qual la potència metabòlica es transforma en treball, anomenada eficiència mecànica (E_M) o eficiència global (E_G) ens permet estimar les capacitats de producció energètica de la fibra muscular. Aquesta variable depèn principalment de factors fisiològics, i en el cas d'esports de resistència molt menys tècnics com la cursa a peu o el ciclisme, és clarament determinant en el rendiment, però en el cas de la natació, on les habilitats tècniques són molt més determinants, hi ha altres eficiències més rellevants. Per a calcular-la utilitzem la següent fórmula:

$$E_G = \frac{W_{tot}}{E}$$

Els valors obtinguts en la literatura, difereixen en funció dels diferents mètodes utilitzats per a valorar la força de l'aigua a vèncer (resistència activa) o si es considera el treball intern en el moment de definir el treball o potència generada (Zamparo, Pendergast et al. 2005b), però es troben valors entre 0,1 i 0,2.

- Eficiència hidràulica:

La despesa interna inherent en la realització del gest tècnic es pot calcular realitzant el moviment cíclic sense càrrega, i generalment es proposa determinar-la en ergòmetres dissenyats per a reproduir el gest habitual dels braços, i fins i tot el algun estudi s'ha valorat també el gest de les cames (Swaine 2000). Per a conèixer quina part del treball total generat correspon a aquest moviment, cal valorar la relació entre el treball extern i el total. Aquest tipus d'eficiència rep el nom d'eficiència hidràulica (E_H) i és el resultat de la relació entre els següents factors:

$$E_H = \frac{W_d + W_k}{W_{tot}}$$

Els resultats demostren que el moviment de les cames suposa una despesa energètica molt elevada i que la seva contribució no passa del 10-15% del total

de potència generada, podent considerar que en general cal utilitzar la batuda com a element complementari i no propulsiu, excepte en proves de màxima explosivitat (Zamparo, Pendergast et al. 2005b).

De totes maneres, aquesta component de la despesa energètica no es té gaire en compte a nivell pràctic, ja que és força difícil de quantificar i suposa un percentatge molt petit de la despesa total, sobretot a altes intensitats, de manera que habitualment es considera que $(W_d + W_k) = W_{tot}$, i per tant aquesta eficiència seria igual a 1.

- Eficiència Froude:

Si considerem només el treball extern generat ($W_{ext} = W_d + W_k$), l'eficiència Froude ens permetrà determinar quina part del mateix es destina a l'avanç:

$$E_F = \frac{W_d}{W_d + W_k}$$

En cas de que no es consideri el treball intern per a realitzar el gest tècnic, que és habitual en més d'un estudi, aquesta eficiència seria igual a la següent, la propulsiva.

- Eficiència propulsiva:

És la més important de totes, ja que és la que valora realment quin percentatge de tot el treball produït es pot convertir en propulsió, i alhora és el factor més diferencial de rendiment, de manera que s'utilitza molt per a caracteritzar el nivell del nedador. Aquesta eficiència propulsiva es calcula:

$$E_p = \frac{W_d}{W_{tot}}$$

Malgrat l'elevada importància que té aquest darrer factor, la literatura mostra certa varietat de registres, a causa dels diferents mètodes per a determinar la resistència de l'aigua o *drag* a vèncer: si es realitza amb el *MADSystem*, s'han obtingut valors entre 0,45 i 0,75 (Toussaint 1990), però en aquest cas no es considera el moviment de les cames, mentre que si es determina fent una modelització del braç com un rem, els valors oscil·len entre 0,25 i 0,45 (Zamparo, Pendergast et al. 2005b). No es troben diferències entre els valors obtinguts per subjectes del mateix nivell,

siguin nois o noies, però sí que s'ha vist que augmenta amb l'edat i que generalment es relaciona amb el rendiment.

Com a exemple, Toussaint (1990) va certificar, que a la mateixa potència metabòlica, els nedadors d'elit comparats amb triatletes aconseguen més velocitat, una major distància per braçada i una eficiència propulsiva superior, ja que perden menys potència accelerant l'aigua, però no hi ha diferències en la freqüència de braçada, el que es pot interpretar com que els triatletes no són capaços de convertir la seva energia produïda en velocitat de nedo (taula 4.1.1.). A més, un altre punt important dels bons nedadors, és una major estabilització d'aquests paràmetres durant tota la prova (menor desviació estàndard), demostrant que el control de la tècnica és important de cara a la millora del rendiment.

| | <u>NEDADORS</u> | <u>TRIATLETES</u> | <u>T estadística</u> | <u>Nivell significació</u> |
|--|-----------------|-------------------|----------------------|----------------------------|
| Potència metabòlica (W) | 1000 | 1000 | | |
| Velocitat de nedo ($m \cdot s^{-1}$) | 1,17 (0,08) | 0,95 (0,11) | 3,87 | 0,004 |
| Potència mecànica (W) | 81,3 (9,4) | 80,4 (14,5) | 0,13 | NS |
| Potència resistència aigua (W) | 49,1 (3,4) | 35,3 (8,2) | 3,76 | 0,004 |
| Potència acceleració aigua (W) | 32,3 (8,1) | 45,1 (6,6) | -2,83 | 0,020 |
| Eficiència propulsiva (%) | 60,8 (6,1) | 43,6 (3,4) | 5,61 | 0,00 |
| Eficiència global (%) | 8,13 (0,94) | 8,04 (1,45) | 0,13 | NS |
| Distància per braçada (m) | 1,23 (0,21) | 0,92 (0,23) | 2,33 | 0,045 |
| Freqüència de braçada (s^{-1}) | 0,97 (0,19) | 1,08 (0,26) | -0,82 | NS |
| Treball per braçada (J) | 86,1 (19,1) | 76,2 (14,2) | 0,96 | NS |
| Treball per distància ($J \cdot m^{-1}$) | 69,6 (7,7) | 83,7 (7,4) | -3,07 | 0,013 |

Taula 4.1.1. Mitjanes i desviacions estàndard dels dos grups a una potència de 1000W utilitzant equacions de regressió individual (extret de Toussaint 1990)

Toussaint and Beek (1992), en la seva revisió de la biomecànica de l'estil crol, van proposar una combinació de les equacions anteriors per a determinar de quins factors depèn la velocitat. Primer, van determinar la interacció entre l'eficiència global ($E_G = W_{tot}/E$, la qual podem transformar en $E_G \cdot E = W_{tot}$), i l'eficiència propulsiva ($E_P = W_d/W_{tot}$), obtenint que:

$$W_d = E_p \cdot E_G \cdot E$$

Després van relacionar aquest concepte d'eficiència propulsiva amb la velocitat, i el concepte presentat al principi de que la força per vèncer la *drag* depèn d'una constant i de la velocitat al quadrat ($F_d = K * v^2$), i que el treball per a vèncer aquesta força també es proporcional a la velocitat ($W_d = F_d * v$, per tant $W_d = K v^3$).

Combinant aquestes dues equacions, podem dir que la velocitat es pot calcular:

$$v = \frac{\sqrt[3]{E_G * E_P * E}}{K} = \frac{\sqrt[3]{E_G * W_{tot}}}{K}$$

Amb totes aquestes particularitats, la majoria dels autors coincideixen a dir que el rendiment en natació, sobretot en proves de llarga durada, depèn de l'economia de desplaçament, és a dir, de la despesa energètica necessària per a recórrer una distància (C_{sw} per les sigles del concepte en anglès *energy cost of swimming*). Carlo Capelli va fer un estudi en el qual va analitzar com la millora de les totes les capacitats fisiològiques (aeròbica, anaeròbica i alàctica) i l'economia de desplaçament influïen en la millora de les millors marques (Capelli 1999), i va determinar que millorant tots aquests factors en un 1%, la millora de marca més important es produïa amb la disminució de la despesa.

Per tant, en natació, la tècnica o eficiència propulsiva és més important que les capacitats fisiològiques (Zamparo, Capelli et al. 2011), de manera que cal dirigir els estudis de determinació i millora del rendiment a analitzar variables tècniques com per exemple les descriptives del cicle o braçada, que ens permetin definir la tècnica de nedo.

4.2 DETERMINACIÓ DE LES VARIABLES CINEMÀTIQUES DEL CICLE

4.2.1 FREQÜÈNCIA I LONGITUD DE CICLE

La natació, com a activitat en la qual cal recórrer una distància en el menor temps possible, té com a principal indicatiu del rendiment la velocitat. Com en totes les activitats cícliques, aquesta velocitat (v) és el resultat de la successió continuada de cicles o accions repetides que comencen i acaben en el mateix punt per tal de poder ser repetides sense pausa i permetre el desplaçament gràcies a l'avanç generat en cada cicle.

Per tant, la velocitat es pot descriure mitjançant els dos principals factors mecànics: la freqüència de cicle (nombre de cicles realitzats en un període de temps, cicles/min) i la longitud de cicle (distància recorreguda durant la realització d'un cicle sencer, m/cicle) (Barbosa, Fernandes et al. 2008). En el cas de la natació, es produeixen tant moviments dels braços (braçada) com de les cames (batuda), però com que la propulsió en l'estil lliure o crol prové principalment del moviment de braços (contribueix en un 85%-90% en funció de la velocitat) (Barbosa, Marinho et al. 2011), els estudis relacionats es dirigeixen gairebé exclusivament a l'anàlisi de la freqüència i longitud de braçada (representades per les sigles FB i LB en català o SR i SL en anglès, a partir dels conceptes *stroke rate* i *stroke length*).

La seva relació per a determinar la velocitat és:

$$v = SR * SL$$

Quan es modifica la velocitat de desplaçament, un o ambdós paràmetres han de canviar. En funció del tipus de canvi (SR o SL), podem veure com s'adapta el gest tècnic del nedador a les condicions canviants de l'entorn: resistència de l'aigua, d'onada, força necessària per a vèncer-les, energia cinètica adquirida per l'aigua,... Alhora, aquests paràmetres venen determinats per factors individuals com l'antropometria, la força muscular, la resistència o capacitat aeròbica i el nivell tècnic o capacitat biomecànica, de manera que els valors obtinguts per cada nedador són

diferents i les seves adaptacions a les noves condicions de la tasca també, no podent determinar valors fixes per a tots els nedadors a nivell global.

Tenint en compte la importància d'aquests dos paràmetres de control (SL i SR), els estudis en l'àmbit de la natació competitiva van intentar primer determinar els valors habituals en cada especialitat (estil, distància), per a diferents edats i gènere, i les seves variacions amb la velocitat. L'autor de referència en aquests tipus d'estudis es A.B.Craig, que va publicar els dos principals articles sobre aquest tema i que han estat la base per a molts estudis posteriors (Craig and Pendergast 1979; Craig, Skehan et al. 1985).

Generalment, en tots els estils, la relació entre la velocitat, la SR i la SL és bastant semblant: la velocitat s'augmenta en base a l'increment de la SR i la disminució de la SL amb una relació quadràtica, segurament per la relació que existeix amb l'augment de la força de resistència (Seifert and Chollet 2009), proposant que cal determinar una relació òptima SR/SL específica per a cada velocitat. Un major nivell de rendiment s'associa a una major SL i igual o menor SR per a una mateixa distància competitiva o velocitat de nedo, i en base a això, en molts articles s'utilitza un tercer factor, l'índex de braçada (SI per les seves sigles del terme en anglès *stroke index*), que és el producte de la velocitat per la longitud de cicle ($SI = v * SL$), per a indicar el nivell d'eficàcia tècnica (Sanchez and Arellano 2002), ja que generalment a mesura que augmenta la velocitat es perd la capacitat de generar força propulsiva i per tant es disminueix la SL (Pelayo, Alberty et al. 2007).

Pel que fa a la comparativa entre homes i dones, aquestes últimes presenten SL menors per a una mateixa prova (que es pot atribuir a una menor alçada i també a una menor força propulsiva), però no hi ha variacions en els valors de SR, de manera que les dones depenen més de la SR per a millorar el rendiment (Seifert, Boulesteix et al. 2004).

Posteriorment, es va voler quantificar també d'aquestes variables en competició, ja que ens permet determinar-les en condicions de rendiment màxim, obtenir valors de molts nedadors fàcilment i poder determinar si existeixen correlacions amb els resultats. Aquest tipus d'anàlisi es basa en la divisió de la prova en parts (fig.4.2.1.), en funció del gest tècnic executat en les mateixes, i mitjançant la sincronització de

diverses càmeres situades a la vora de la piscina en els punts en els quals comença o acaba un parcial, es pot registrar el temps que triga cada nedador en cada part i les SL i SR en el tram de nedo.

Absaliamov i Timakovoy (1983) van ser els primers que van utilitzar el concepte de “anàlisi de l’activitat competitiva” per a presentar els resultats dels JJOO de Moscó 1980. Posteriorment, el Dr. Raúl Arellano va fer una proposta que va anomenar Sistema d’Anàlisi Temporal en Natació (TSAS de les sigles de *temporal swimming analysis system*), amb el qual es van quantificar algunes les proves de la natació dels Jocs Olímpics de Barcelona 1992 (Arellano, Brown et al. 1994) i posteriorment les dels Campionats del Món de Natació Barcelona 2003. Aquest tipus d’anàlisi permet conèixer aspectes competitius com: les diferències en els diferents paràmetres de control entre tots els competidors, les estratègies de ritme durant la prova (negativa o positiva), o la importància absoluta i relativa de cada fase (sortida, viratges i nedo). Aquestes dades permeten definir les característiques tant de cada nedador individualment, com de les diferents marques i rècords realitzats, les tendències actuals d’estratègies de ritme i també permeten preparar estratègies competitives, fent que actualment sigui el sistema utilitzat per la LEN (Lliga europea de Natació), la FINA (Federació Internacional de Natació) i el COI.

A la web www.swim.ee, el Dr. Rein Haljand penja els resultats d’aquest tipus d’anàlisi de totes les competicions europees.

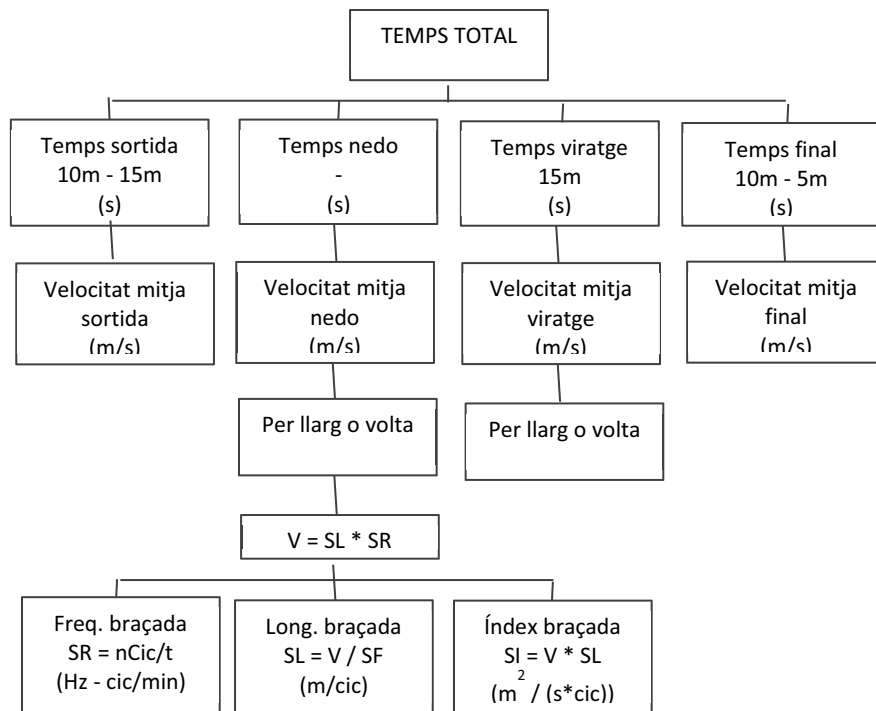


Fig.4.2.1. Components tècnico-tàctics del temps total de competició, adaptat de Arellano (2004)

Diferents estudis realitzats amb aquest tipus d'anàlisi (Seifert, Chollet et al. 2007; Hellard, Dekerle et al. 2008) han determinat que quan més elevat és el nivell de rendiment, les mitges de velocitat, SL i SR són majors i menor la variabilitat d'aquests paràmetres, mostrant que, com s'ha dit anteriorment, és tan important per al rendiment una bona tècnica com el manteniment de la mateixa al llarg de tota la prova. Si s'analitza la dinàmica interna de cada llarg (Seifert, Boulesteix et al. 2005), podem comprovar que aquesta sí que presenta certes variacions, per les acceleracions i frenades que suposen els viratges, però els bons nedadors s'adapten més ràpid i recuperen abans el seu ritme de nedo.

Darrerament, alguns estudis s'estan dirigint a determinar la influència de la SR en la despesa energètica i l'efecte de la modificacions de la SR habitual a la mateixa velocitat, per a poder determinar quina és la SR òptima (mínima despesa). Aquest tipus d'estudis ja s'han realitzat amb altres esports cíclics, sobretot la cursa a peu i el ciclisme, els quals han determinat una relació en forma de U invertida respecte a aquesta SR òptima, i que la mateixa correspon a la que els esportistes adopten naturalment en la cursa a peu, però no en el ciclisme, on altres factors com la major

fatiga de les fibres musculars fan que habitualment s'escullin revolucions o pedalades per minut fins a un 50% superiors a aquesta SR més econòmica.

Els resultats obtinguts en natació obtenen aquesta mateixa relació (Barbosa, Fernandes et al. 2008) amb l'augment de velocitat. En canvi, si s'altera la SR sense una modificació de la velocitat (McLean, Palmer et al. 2010), s'observa un augment de la despesa (VO_2) amb la disminució de la SR, però no si s'augmenta, determinant que els nedadors escullen per a cada ritme la SR menor que no provoca un canvi metabòlic (mantenint també la freqüència cardíaca i la RPE). Una de les explicacions per a aquesta resposta pot ser la contribució de les cames, ja que malgrat que no es considera habitualment, els canvis de condicions també afecten a l'acció de la batuda, i en aquest cas es va poder comprovar que amb la disminució de SR la freqüència de batuda augmentava considerablement i viceversa. Aquesta qüestió, la de l'anàlisi de l'acció simultània de les cames, no està resolta en la majoria dels estudis i és un dels aspectes que limita les aplicacions dels resultats obtinguts en la recerca en natació.

Per tant, de cara a la millora dels entrenaments, es proposa utilitzar la velocitat i la freqüència de braçada com a paràmetres de control senzills que permeten assegurar la constància del ritme i per tant de la tècnica dels nedadors, alhora que una bona adaptació als canvis continus de les condicions del medi (Seifert, Chollet et al. 2007b). Alhora, sent la SL una variable important per a afavorir el treball de millora de la força propulsiva i l'eficiència, també es proposa treballar amb SR reduïdes buscant un consegüent augment de la SL. Cal però considerar un detall important: al nedador li costa més nedar amb una SR fixada (per exemple marcada amb un metrònom) que lliure, fet que s'atribueix a una limitació a poder canviar el patró tècnic en cas de fatiga per a poder mantenir la velocitat prevista, de manera que no pot mantenir la tasca tant de temps com quan és lliure (Alberty, Potdevin et al. 2008).

4.2.2 FASES DE LA BRAÇADA

El problema amb el que ens trobem quan volem interpretar les dades obtingudes amb els estudis anteriors sobre els canvis que es produeixen en les variables

cinemàtiques a diferents velocitats i en diferents condicions, és que no podem determinar quines variacions específiques en la coordinació i recorregut de la braçada han permès produir aquest canvi en el patró tècnic. Per això, es proposen estudis augmentant el control temporal de la braçada, és a dir, analitzant les diferents fases de la mateixa, mitjançant la filmació subaquàtica, per a poder saber en quina d'elles es produeixen canvis en la durada o trajectòria.

Generalment, es diferencien 4 fases principals (lliscament i agafada, estrebada o moviment cap a dins, empenta o moviment cap a dalt, i recobrament) i es determina la durada absoluta i relativa de cadascuna en diferents situacions per a determinar com es produeixen les adaptacions del gest de la braçada. Els resultats mostren que, globalment, quan es disminueix la SR, que generalment es correspon amb un augment de la SL si no hi ha fatiga, els nedadors estan més temps en les fases no propulsives (sobretot la fase de lliscament) mentre que la durada de les fases propulsives (estrebada i empenta) no es modifica, i igualment, quan s'augmenta la SR, relacionada amb l'augment de la velocitat de nedo i habitualment amb una disminució de la SL, tampoc presenten canvis les fases propulsives, però el lliscament es redueix molt, buscant limitar el temps entre les accions dels dos braços (Alberty, Potdevin et al. 2011). Aquest aspecte va fer plantejar la importància del temps entre l'acció dels dos braços com a nou factor de rendiment, que es presenta en el següent apartat.

4.2.3 ÍNDEX DE COORDINACIÓ

El Dr. Didier Chollet (Chollet, Chabies et al. 2000) mitjançant la filmació subaquàtica de l'esportista nedant una distància de 12,5m sense respirar, va identificar la velocitat, la SL, la SR i les quatre fases de la braçada (entrada i agafada, estrebada, empenta i recobrament) per a posteriorment poder definir un *índex de coordinació* (IdC) per a quantificar els diferents patrons de coordinació entre el moviment dels dos braços. Aquest IdC es basa en la determinació del temps que separa (temps de retard o RT) el inici de la fase propulsiva d'un braç i el final de la fase propulsiva de l'altre braç, calculant la part proporcional que representa aquest RT respecte a la durada de cada

cicle complet, i fent la mitjana entre el RT del braç dret i el RT del braç esquerre (fig.4.2.2.).

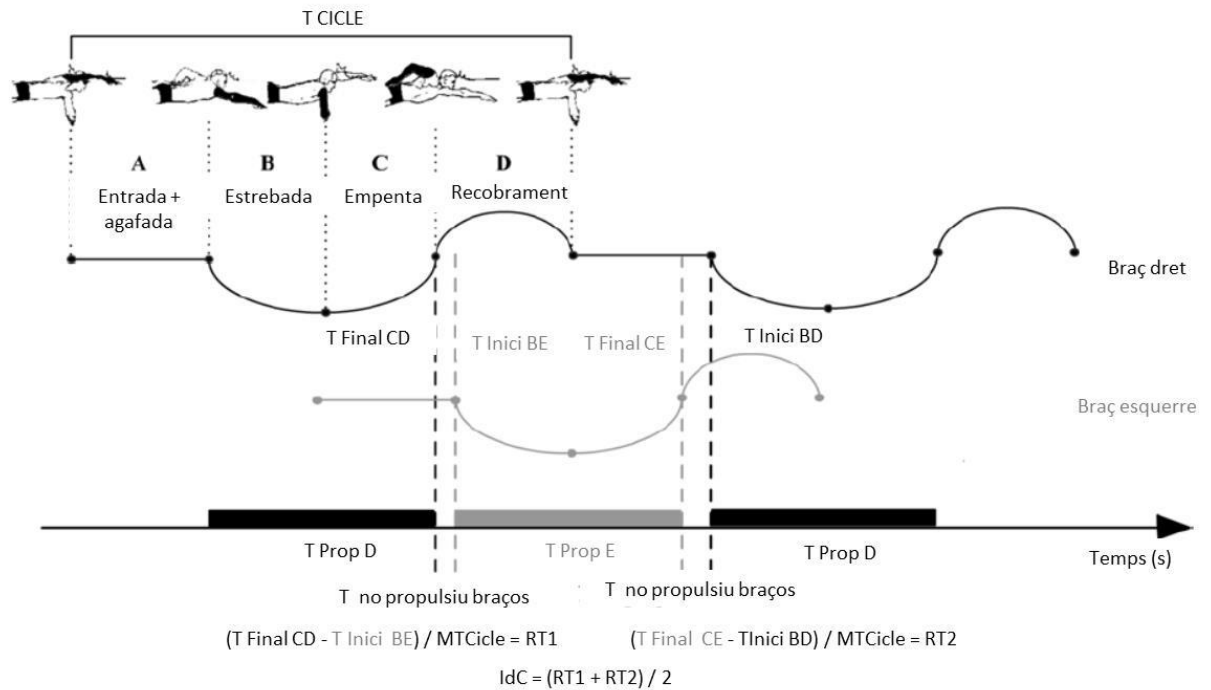


Fig.4.2.2. Representació de la divisió del cicle per a la determinació del IdC, en un cas de patró de persecució ($IdC < 0$), adaptat de Pelayo, Alberty et al. (2007)

Es distingeixen 3 patrons bàsics:

- Superposició ($IdC > 0$):
Hi ha un moment en que propulsen tots dos braços.
- Oposició ($IdC = 0$):
Just quan acaba la propulsió d'un braç comença l'altre.
- Persecució ($IdC < 0$):
Hi ha un temps entre la propulsió d'un braç i la de l'altre.

S'han realitzat força estudis comparant esportistes de diferents nivells, determinant que el patró de coordinació no varia significativament entre nedadors de més o menys rendiment en condicions semblants, però que el IdC augmenta amb la velocitat i amb la SR, canviant d'un patró de persecució a un d'oposició, més

progressivament quan millor és el nivell tècnic, i passant a un patró de superposició a altes velocitats, generalment només en nedadors d'alt nivell (Potdevin, Bril et al. 2006). Aquest canvi és la conseqüència d'una disminució de la durada de les fases inicials (entrada i agafada), un augment de la durada relativa de la fase central propulsiva (estrebada) i una major acceleració de la mà en la fase final (empenta), fent que malgrat que no augmenti o fins i tot disminueixi la SL es pugui generar major potència propulsiva, que juntament amb el conseqüent augment de la SR, fa que es puguin assolir velocitats més elevades. Els canvis en aquests paràmetres és més elevat en els nedadors de major nivell, fet que s'explicaria perquè aquests tenen, per una banda, més força específica i, per una altra, una major capacitat per a adaptar-se tècnicament més ràpid i millor a les variacions de les condicions canviants del medi (a més velocitat augmenta molt més la resistència de l'aigua i la velocitat relativa de la mateixa), modificant la distribució temporal de les diferents fases de la braçada, i aconseguint que la propulsió sigui el més continuada possible i per tant es pugui mantenir una velocitat relativament constant, disminuint les acceleracions i la despesa energètica (Schnitzler, Seifert et al. 2008), de manera que assoleixen una major velocitat de desplaçament.

Els resultats serien semblants si comparéssim homes i dones, presentant aquestes valors semblant a nedadors de menys nivell, ja que tenen menys força, però cal no oblidar que també la seva resistència propulsiva és menor (floten més) i que les característiques antropomètriques són força diferents, el que facilita que la velocitat assolida no disminueixi tant, i que per tant sigui necessari relativitzar la relació entre els canvis en els paràmetres anteriorment citats, el IdC, i la millora del rendiment, ja que aquests canvis estan molt relacionats amb les diferents característiques de cada esportista, i per tant amb diferents combinacions dels paràmetres de control es pot aconseguir el mateix patró tècnic o de coordinació i el mateix rendiment (Seifert, Chollet et al. 2004b).

Igualment, en un estudi comparatiu entre nedadors i triatletes a velocitats entre el 80% i el 100% (Millet, Chollet et al. 2002), es va observar que en general ambdós grups presentaven valors semblants en els diferents paràmetres estudiats, augmentant progressivament el IdC amb la velocitat, i adquirint un patró coordinatiu de

superposició al final. Els triatletes, però, tenien una velocitat crítica (en aquest cas el 98%) a partir de la qual disminuïen el IdC perquè no podien aplicar tanta força, el que es tradueix en que no augmentaven la durada relativa (%) de les fases propulsives de la braçada i en canvi sí el temps relatiu del recobrament, mentre que el dels nedadors disminuïa. Les diferències en la velocitat màxima assolida s'expliquen per una menor SL ($p < 0,05$) dels triatletes, ja que la SR és igual per ambdós grups, sent per tant la longitud de braçada un clar factor de control del rendiment, per la seva elevada correlació amb la velocitat assolida i alhora indicatiu del nivell tècnic dels esportistes.

Aquest índex, però, només serveix per als estils alternatius o amb l'acció de braços alternativa, és a dir, el crol i l'esquena. Quan l'acció dels braços és simultània, com en la braça o en la papallona, les cames guanyen importància propulsiva, ja que s'alterna la seva propulsió amb la dels braços, i per tant es crea un nou índex coordinatiu per a aquests estils anomenat *interval total de separació* (traduït de la nomenclatura anglesa *total time gap*, que s'abreua amb les sigles TTG), que és la suma dels temps de separació entre les accions d'ambdues extremitats. Un estudi comparatiu dels 4 estils (Seifert and Chollet 2009), va trobar una mateixa relació quadràtica en la relació entre l'índex de coordinació i la velocitat en els quatre estils.

4.2.4 DETERMINACIÓ DE LES VARIACIONS INTRACÍCLIQUES

4.2.4.1 Variacions de velocitat intracíclics

Resumint, per a estudiar els diferents aspectes relacionats amb la tècnica dels diferents estils de natació, s'han utilitzat anàlisis cinemàtics del cicle com la freqüència i longitud de braçada (SR i SL), l'organització temporal de les fases de la braçada o la coordinació entre els dos braços a través del IdC (Pelayo, Alberty et al. 2007). Però com ja s'ha dit, aquests paràmetres per sí sols no es poden relacionar directament amb el rendiment, generalment determinat per la velocitat o temps de nedo. Les seves variacions depenen d'altres factors tant antropomètrics, com de gènere, o de les capacitats d'adaptació tècnica (nivell, coordinació intersegmentària, possibilitats

d'aplicació de força i modificacions de la morfologia o forma de la resta del cos) (Schnitzler, Seifert et al. 2008), està molt condicionats pel nivell de rendiment (Potdevin, Bril et al. 2006), i sobretot es modifiquen amb la fatiga, augmentant el IdC mentre que la velocitat disminueix (Alberty, Sidney et al. 2005).

Si, com ja s'ha explicat anteriorment, la natació presenta la particularitat de que els moviments propulsius es realitzen en el medi aquàtic, un mitjà que es caracteritza per la variabilitat constant de les seves condicions, tant per l'aplicació de forces propulsives (obligant a l'alternança o intermitència de la propulsió dels dos braços o braços i cames, i considerables canvis de direcció en la seva trajectòria) com per la configuració i quantitat de les forces d'oposició o resistives (demanant uns continus canvis de posició del cos per tal d'aconseguir la millor hidrodinàmica possible), això es tradueix en una fluctuació contínua de les velocitats d'avanç a nivell intracíclic, un aspecte que pot suposar un augment de l'esforç o treball necessari per a mantenir la velocitat d'avanç (Ungerechts 1988b).

Per tant, com a alternativa en la majoria dels esports cíclics, però sobretot en la natació, per a poder determinar les adequacions dels canvis en les coordinacions de les accions propulsives i les accions tècniques (clau per a aconseguir una propulsió eficient), la variable analitzada en la recerca són les variacions de velocitat intracíclics (*intracyclic velocity variations, IVV* si utilitzem les seves sigles en anglès, tot i que en molts articles s'utilitza l'abreviació *dV*), determinades a partir de les fluctuacions de velocitat en un cicle o braçada d'un punt fix (Fernandes, Ribeiro et al. 2012). Aquestes variacions es determinen segons la fórmula (Barbosa, Bragada et al. 2010):

$$dV = \frac{\sqrt{\sum_i (v_i - \bar{v})^2 F_i/n}}{\sum_i v_i F_i/n} 100$$

on v és la velocitat mitja, v_i la velocitat instantània, F la freqüència absoluta i n el nombre d'observacions.

Tot i que cada nedador presenta un perfil característic en funció de la seva tècnica individual (adaptada a les seves particularitat tècniques i morfològiques), la literatura

descriu una sèrie de patrons específics (nombre de pics i major o menor variabilitat) per a cada estil que representen l'efecte de totes les forces aplicades durant el nedo en cadascun (Barbosa, Marinho et al. 2011) (fig. 4.2.3).

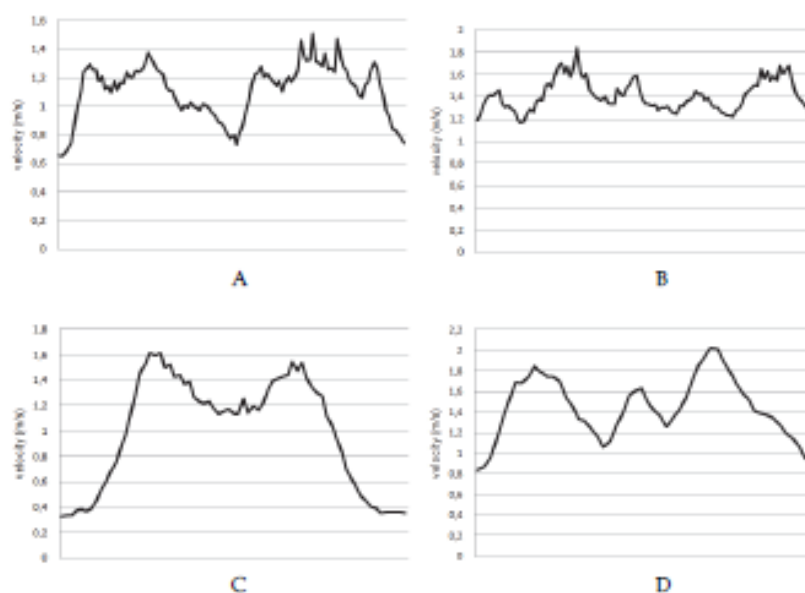


Fig. 4.2.3 Variació intracíclica de la velocitat en l'estil crol (A), esquena (B), braça (C) i papallona (D), extret de Barbosa, Marinho et al. (2011)

El crol és l'estil amb menors fluctuacions, fins al punt que alguns autors les han considerat negligibles comparades amb les d'altres estils, però s'ha comprovat que aquestes hi són i que per a poder valorar la potencia desenvolupada, cal considerar les IVV, ja que un elevat valor d'aquest paràmetre indica un treball extra per a poder compensar les pèrdues de velocitat o augments de la *drag*: Nigg (1983), citat per diferents autors (Seifert, Toussaint et al. 2010c; Figueiredo, Barbosa et al. 2012), va predir que uns canvis de velocitat del 10% resultaven en un augment de la demanda de treball o potència del 3% per a poder vèncer l'augment de la resistència de l'aigua, de manera que es pot considerar l'anàlisi de les IVV com una aproximació vàlida per a la determinació de l'eficiència propulsiva del nedador. Com a exemple, en un estudi on s'analitzaven dos grup de diferent rendiment, la IVV només augmenta en els "recreacionals" amb l'augment de velocitat, en els d'elit es manté constant, ja que aconseguen adaptar la coordinació entre els dos braços (IdC) per a aconseguir una major continuïtat propulsiva (Schnitzler, Seifert et al. 2010; Seifert, Toussaint et al.

2010c), provant que clarament aquest és un factor que permet diferenciar el nivell tècnic dels nedadors, i per tant les seves possibilitats de rendiment.

Per una altra banda, si com ja s'ha explicat, els nedadors d'alt nivell es poden distingir per un valor baix i estable d'aquest paràmetre a diferents velocitats (major uniformitat propulsiva), ja que adquireixen una gran capacitat d'adaptació a cada nova condició variant les accions tècniques per a poder generar propulsió durant el màxim temps possible i limitant les forces de frenada, els estudis que relacionin la IVV amb els canvis produïts en altres variables biomecàniques com la SL, la SR, el IdC, o amb les variacions temporals relatives en les diferents fases de la braçada, permetran saber com s'han produït aquestes adaptacions (Schnitzierl, Seifert et al. 2008), i definir la coordinació o combinació de paràmetres de rendiment més adequada, de manera que es puguin fer les modificacions necessàries en la tècnica del nedador per a millorar la seva eficiència.

Els diferents estudis relacionats amb aquesta variable, han determinat que, generalment, les noies presenten un IVV inferior al dels homes, a causa de les diferències antropomètriques, de la resistència o *drag* a vèncer i de la potència desenvolupada, igual com ja s'havia descrit en les diferències amb el IdC (Schnitzierl, Seifert et al. 2008). Pel que fa a la seva relació amb la velocitat de nedo, en canvi, els resultats són contradictoris (Barbosa, Bragada et al. 2010): mentre que hi ha estudis que no han trobat cap relació entre les IVV i la velocitat, altres han trobat disminucions de les IVV amb l'augment de velocitat o ajustaments amb una equació polinòmica de segon ordre, és a dir, que ambdues variables augmenten fins a un cert punt en el qual les IVV comencen a disminuir. L'autor d'aquest article de revisió formula la hipòtesi de que aquesta relació depèn de la prova competitiva (distància): mentre que en proves curtes aquesta relació seria positiva, en proves llargues seria negativa.

Pel que fa al mètode utilitzat, generalment s'analitza només una o màxim tres braçades, ja que són les que caben en la imatge d'una càmera fixa. S'han comparat dues maneres d'analitzar aquestes variacions intracíclics: utilitzant el maluc com a punt fixe, ja que és molt senzill de situar amb una filmació lateral d'una única càmera

de vídeo; o utilitzant el centre de masses o centre de gravetat (CdG), molt més complicat si es fa a partir d'una filmació, ja que fan falta més càmeres sincronitzades i complexos algorismes de digitalització per a calcular-lo en cada imatge.

Els resultats dels estudis mostren diferències significatives entre la IVV-CdG i la IVV-maluc, sobretot en estils com la braça o la papallona on les oscil·lacions en el pla antero-posterior són majors (Tella, Madera et al. 2010), i per tant no es poden utilitzar indistintament. Específicament, si es comparen digitalitzacions d'una sola braçada de crol nedant a màxima velocitat, es troben diferències significatives entre les dades de desplaçament, velocitat i acceleració en els tres eixos d'aquests dos punts de referència (correlacions entre -0,01 i 0,19, $p < 0,001$ en les proves T respectives), així com entre les dades dels malucs dret i esquerre (Figueiredo, Vilas-Boas et al. 2009), o entre les IVV (calculades mitjançant el coeficient de variació (CV) de la velocitat), on el maluc presentava una clara tendència a infravalorar aquestes fluctuacions en sentit horitzontal i les velocitats mínimes, mentre que sobrevalorava les màximes ($p < 0,001$ en les proves T respectives) (Psycharakis and Sanders 2009). Quan es determina en proves submaximals, les diferències són menors i les mitjanes calculades de desplaçament i velocitat són més semblants (Fernandes, Ribeiro et al. 2012). Els gràfics de trajectòria (fig.4.2.4.) mostren que, malgrat que el patró cinemàtic és semblant, el maluc no representa bé el centre de gravetat en el nedo.

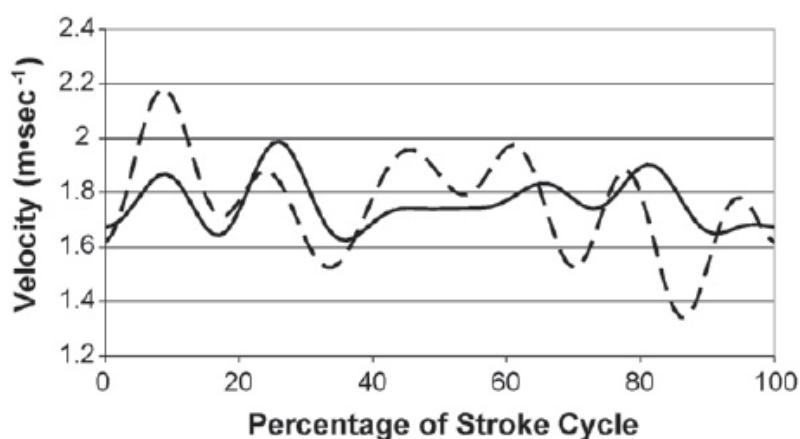


Fig.4.2.4 Velocitat intracíclica del maluc (línia contínua) i del centre de masses (línia de guions) en un nedador en un test maximal, extret Psycharakis and Sanders (2009)

Un altre tipus d'estudis són els que relacionen la IVV amb la despesa energètica. Aquests s'han realitzat amb tots els estils utilitzant un protocol progressiu i intermitent (Barbosa, Lima et al. 2006), obtenint en tots els casos relacions positives significatives. En el cas de l'estil lliure, l'autor que més hi ha treballat darrerament és el Dr. Pedro Figueiredo, de la Universitat de Porto, el qual va analitzar per una banda la relació entre la velocitat de nedo i les variacions de velocitat intracíclics en els tres eixos, determinant que si es mantenen les IVV estables, tots tres presenten correlacions significatives ($p < 0,01$), així com els valors màxim i mínims en l'eix d'avanç i la durada relativa de les fases propulsives de la braçada (Figueiredo, Kjendlie et al. 2012b). Per una altra banda, va voler determinar la relació entre la despesa i la IVV durant una prova competitiva, concretament els 200m lliures, i no va obtenir una correlació significativa en cap dels 3 eixos, plantejant que malgrat que la IVV és força indicativa de la despesa energètica, hi ha altres factors que intervenen com per exemple els canvis en el treball intern per fatiga o en la coordinació entre altres (Figueiredo, Barbosa et al. 2012).

Per tant, un altre aspecte a valorar en la recerca relacionada, són els canvis provocats per la fatiga. Dos estudis han analitzat els canvis que es produeixen en les diferents fases de la braçada (Alberty, Sidney et al. 2005) i en les diferències entre gènere (Jordà and Tella 2007), determinant que les fases propulsives augmentaven la seva durada relativa, i les no propulsives la disminuïen ($p < 0,05$), de manera que el IdC augmentava (major continuïtat de l'acció dels dos braços) tot i mantenir un patró de persecució, i també augmenta la SR, però no hi havia una modificació significativa de les IVV, el que s'explica per una inhabilitat del nedador per a minimitzar les forces de resistència, ja que la fatiga fa que es posi menys atenció en l'alineació o hidrodinàmica del cos (Alberty, Sidney et al. 2005).

Pel que fa a les diferències entre gèneres, si comparem nois i noies en una mateixa prova de màxima velocitat, en els dos casos (sense fatiga i amb fatiga) trobem diferències significatives entre gèneres ($p < 0,01$), però si comparem les velocitats mitjanes de cada fase separatament, només les noies presenten diferències significatives dins d'una mateixa prova ($p < 0,01$), concretament, sense fatiga la

velocitat de la fase d'agafada i estrebada (inici de la propulsió) és menor que la d'empenta (final de la propulsió), mentre que amb fatiga les diferències no són significatives (Jordà and Tella 2007).

Però els estudis realitzats més importants, són els que relacionen la tècnica de braçada amb les IVV, comparant les fluctuacions del CdG amb els canvis de velocitat associats a la trajectòria de la mà en la braçada, determinats a partir dels canvis de velocitat global i en cadascun dels tres eixos de la trajectòria subaquàtica del dit mig, per a poder relacionar cada canvi de velocitat de la mà, generalment associada a les diferents fases de la braçada, amb les seves possibilitats propulsives, tant qualitativa com quantitativament (Maglischo 2003) (fig.4.2.5.).

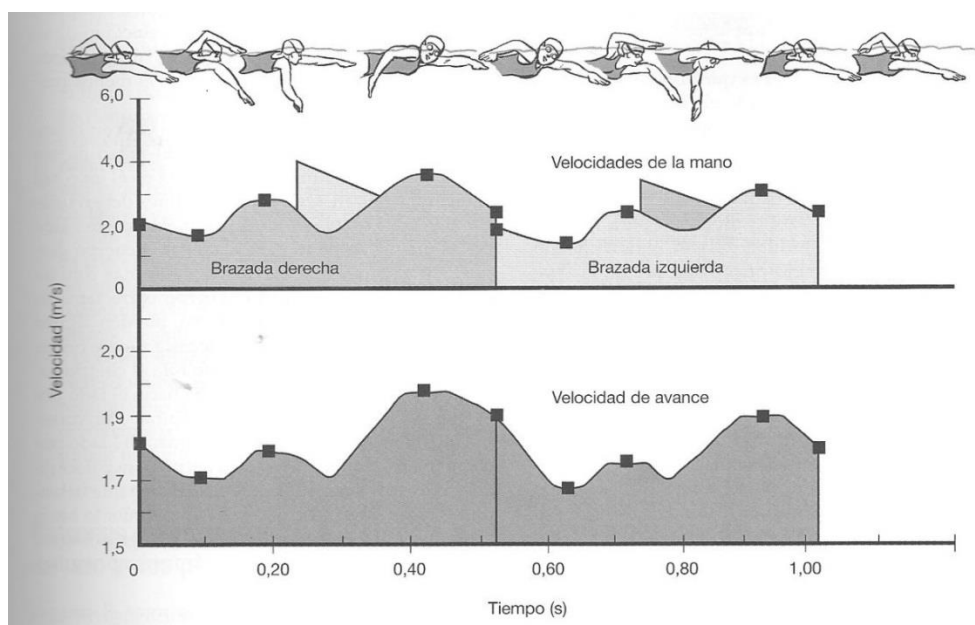


Fig.4.2.5. Exemple dels patrons de velocitat del cos i de la mà en estil lliure de Carrie Steinseifer, guanyadora 100m lliures JJOO 1984, extret de Maglischo (2003)

El Dr. Ernerst Maglischo també va ser qui va definir un patró o perfil general de la velocitat intracíclica per a cada estil relacionant aquestes dues variables. Concretament, en l'estil crol, la velocitat de la mà disminueix després de l'entrada fins que s'inicia l'agafada, va augmentant mentre realitza el moviment cap a dins, i, després d'un lleuger descens, torna a augmentar (amb valors més elevats que en

l'anterior) en el moviment cap amunt, desaccelerant quan s'apropa a la superfície per a començar el recobrament. Aquestes variacions es reproduïxen igualment en les acceleracions i desacceleracions del cos (velocitat d'avanç del nedador), ja que els canvis en la velocitat d'avanç es corresponen amb els canvis de direcció dels moviments de la mà (fases de la braçada), ja que són els que produeixen la propulsió (Jordà and Tella 2007).

A més, si analitzem diferents tipus de nedadors, es poden diferenciar dos perfils, amb un o amb dos pics, en funció de la continuïtat de les forces propulsives. Quan només obtenim un pic final és a causa d'una tracció del braç més oberta, és a dir, amb una menor component medial (centre del cos). Per una altra banda, habitualment, tots els nedadors tenen un braç més dominant que un altre, i és en aquest, o en el braç contrari a la respiració, en el qual obtenim registres més elevats.

Després d'analitzar els diferents patrons de nedo, el Dr. Maglischo destaca diferents aspectes a considerar respecte a la velocitat de les mans i la propulsió en el crol:

- S'ha d'establir una bona agafada després de l'entrada i del moviment cap avall de la mà per a poder començar la propulsió del cos
- La disminució de la velocitat durant aquesta fase d'entrada no és preocupant des del punt de vista de l'eficàcia. El braç disminueix la seva velocitat en la posició més hidrodinàmica esperant que l'altra braç acabi el seu moviment cap amunt
- El moviment cap endins és menys ràpid que el moviment cap amunt
- Les velocitats de la mà disminueixen abans de sortir de l'aigua en la part final del moviment cap amunt

4.2.4.2 Variacions d'acceleració intracíclics

Però aquesta relació gest tècnic i velocitat registrada no és adequada, ja que els moments de generació de força no es corresponen amb els pics de velocitat, sinó que aquests són posteriors, perquè el moviment genera força, que es transforma en

acceleració (segons $F=m \cdot a$), es transfereix al cos i es tradueix en l'augment progressiu de la velocitat d'avanç proporcional a aquesta acceleració, fins que hi ha la mínima acceleració, que es quan es produeix la velocitat màxima (fig.4.2.6.), de manera que l'evolució d'aquestes variables no es sincrònica o paral·lela, sinó que una és conseqüència de l'altra (Buchner, Reischle et al. 2003). A més, s'ha pogut comprovar que les diferents fases del cicle (entrada i agafada, estrebada i empenta) que s'utilitzen per a definir els moments propulsius i els que no mitjançant la filmació (Chollet, Chalies et al. 2000) no es corresponen amb els registres d'acceleració sincronitzats, ja que en funció de la velocitat, l'inici i final de la generació de força propulsiva (fases acceleratives positives i negatives) es produeix en diferents moments del cicle, ja que les condicions de la resistència del medi són variables i cal adaptar-se i modificar la força aplicada (Schnitzler, Ernwein et al. 2006), de manera que tampoc les imatges per sí soles serien adequades per a determinar la capacitat propulsiva.

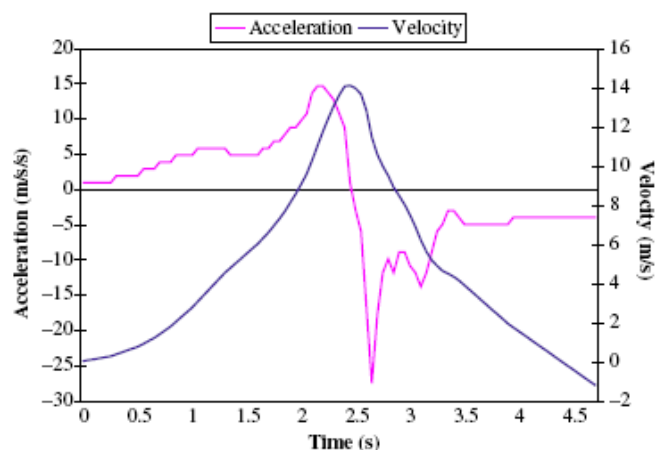


Fig.4.2.6. Gràfica exemple d'un moviment de llançament, extret de Knight, Bristow et al. (2007)

Per tant, les corbes d'acceleració són les que realment es corresponen amb la capacitat propulsiva del gest tècnic o fase específica de la braçada, reflecteixen més directament la despesa energètica associada, ja que l'acceleració és proporcional a la força externa neta involucrada (Chen and Bassett 2005), i permeten interpretar millor les dades obtingudes amb les imatges de la filmació, de manera que és molt millor treballar amb aquestes dades, ja sigui derivant-les de les dades del desplaçament,

obtingudes a partir d'una filmació o del velocímetre, o registrant-les amb un aparell que les mesuri directament com l'acceleròmetre, que s'explicarà en el següent apartat.

Les variacions d'acceleració intracíclics del cos del nedador són la suma de la interacció resultant de les forces propulsives i resistives de l'aigua i és bàsicament l'origen de la velocitat de nedo (Ungerechts 1988). A diferència d'un cotxe, la forma del qual no es modifica vagi més ràpid o més lent, ja que el motor està dissociat de l'aparell, el nedador és un cos autopropulsat, de manera que l'aplicació de més o menys forces propulsives depèn de la modificació de la configuració del cos, de la seva freqüència i de la seva amplitud, de manera que cal considerar els canvis de forma del mateix, ja que com s'ha vist anteriorment es creen modificacions en la *capa envolvent* fent que la propulsió es produeixi en condicions "inestables". La resultant de les forces resistives es deriva dels mateixos paràmetres, i per tant la combinació de moviment, forma i tipus de flux són les claus de la propulsió o avanç assolit.

Aquesta interacció amb el medi fa que la consideració de l'acció muscular per si sola no tingui cap sentit, cal sempre considerar els aspectes morfològic-funcionals i hidrodinàmics, és a dir, la interacció amb el medi, de manera que l'anàlisi d'aquesta activitat o tipus de locomoció només pot oferir resultats adequats quan es tenen en compte tots aquests factors (Ungerechts 1988). Per exemple, durant el nedo, des de la finalització d'un impuls fins a l'inici del següent, el cos pateix una desacceleració a causa de les forces de resistència hidrodinàmica, de manera que cal que el nedador apliqui novament un impuls per a tornar a accelerar-se, configurant una sèrie d'acceleracions i desacceleracions pròpies dels diferents patrons de moviment i interaccions amb el medi que ofereixen fluctuacions en la velocitats d'avanç força diferents (Craig, Termin et al. 2006).

Per tant, per a poder considerar i caracteritzar les forces generades, cal analitzar les acceleracions resultants en el cos, que queden resumides a partir del seguiment dels canvis en el centre de gravetat (CdG). Com ja s'ha dit anteriorment, el maluc no seria indicat, ja que presenta registres molt diferents, però la situació d'un punt a l'alçada de la zona lumbo-sacra (sobre la 3a i la 5a vertebres lumbars), que seria el més

semblant a la situació del CdG, es considera força més adequada (Callaway, Cobb et al. 2009), i a més permet la utilització de diferents sensors com s'explicarà en el següent apartat.

Com que la natació produeix forces en els tres eixos del moviment, ja que les accions tècniques dels diferents segments corporals són clarament tridimensionals, seria molt important considerar les acceleracions en els tres plans, ja que quan les resumim en un sol eix (el d'avanç o horitzontal) es perd informació i a més els canvis en el mateix es poden veure alterats pels canvis en altres direccions. Tot i això, les forces més efectives, i per tant les que proporcionen una major propulsió, són aquelles que es produeixen en l'eix d'avanç (Madera, Gonzalez et al. 2010).

Malgrat la clara importància que tenen les *variacions d'acceleració intracíclics* (IAV per les seves sigles en anglès) per a poder analitzar la propulsió del nedador d'una manera global, ja que si es realitzen moviments propulsius amb poques acceleracions, es disminueix la *drag* i per tant es minimitzen les possibles desacceleracions de l'avanç del cos, hi ha molt pocs estudis que analitzin aquesta variable dins del context de la natació competitiva. Revisant les publicacions relacionades, podem veure que:

- a nivell d'instrumental, s'utilitzen filmacions, velocímetres i aparells inercials, que s'analitzaran en el següent apartat
- els principals paràmetres analitzats es poden diferenciar en dos tipus:
 - els temporals: mitjana, mitjana quadràtica (*root mean square* o RMS en anglès), valor màxim i mínim de l'acceleració
 - els freqüencials: pic de potencia (PP), freqüència del PP (PPF) i la potència continguda en l'àrea espectral (SA)
- finalment, pel que fa a la seva relació amb la velocitat, les IAV es correlacionen positivament amb la RMS, el màxim, el mínim i la SA en l'estil crol a velocitats maximals (Tella, Toca-Herrera et al. 2008).

En aquest mateix estudi, també es van analitzar els efectes de la fatiga en una prova maximal, i es va veure que entre les dues proves, hi havia disminucions molt significatives ($p < 0,001$) en la mitjana quadràtica (RMS), que els autors van considerar

com el paràmetre que indicava l'eficiència propulsiva o economia de nedo, en el màxim i en el mínim, mentre que no hi havia canvis en el coeficient de variació (CV), de manera que es va poder demostrar la importància del valor de la RMS per a la caracterització de la senyal accelerativa generada pels nedadors. L'estudi freqüencial de l'amplitud espectral a través d'una transformada de Fourier, la qual no s'explicarà a causa de la complexitat matemàtica de la mateixa, però resumidament es determina quines són les freqüències dominants, la màxima i la mitjana, van concloure que en totes les aquestes variables trobem disminucions significatives en fatiga ($p < 0,001$) i que es distingeixen dos patrons coordinatius, amb un o dos pics de freqüència.

En un segon article (Madera, González et al. 2012b), els mateixos autors van decidir ampliar l'anàlisi de les IAV a la comparativa entre gèneres i nivell de rendiment. Els resultats van ser que pel que fa a les variables temporals, es trobaven diferències en totes les variables entre gèneres ($p < 0,05$), però no pel que fa al rendiment, i si s'analitzava la interacció entre gènere i nivell, només la mitjana quadràtica (RMS) presentava variacions significatives, mostrant novament la gran importància d'aquest paràmetre en la determinació de les possibilitats de rendiment. Pel que fa a les dades freqüencials, igualment es van diferenciar els dos patrons de senyal espectral, que es presenten indistintament en els dos gèneres i en els dos nivells, i en la discussió es va considerar que els patrons d'un sol pic són més eficaços, ja que tenen menys entropia (menys dispersió), i per tant suposen una millor coordinació entre les accions dels braços i de les cames.

En un altre estudi dels mateixos autors (Tella, Madera et al. 2010), es van valorar les acceleracions en els tres eixos, concretament la RMS en cada eix, comprovant que els resultats són diferents en les tres direccions i que correlacionen significativament amb la velocitat de nedo així com els índexs relacionals entre dues direccions (X-Y; Y-Z; i Z-X), de manera que aquestes dades són sensibles a les modificacions tècniques i coordinatives, i permeten determinar els canvis en l'eficiència propulsiva.

Com a conclusió, si per a optimitzar la tècnica del nedador, cal millorar les adaptacions del gest tècnic, la coordinació global de tot el cos i la capacitat de generar impuls en l'aigua per a maximitzar la seva eficiència propulsiva, és important establir

una base del coneixement dels patrons bàsics de les variacions o fluctuacions d'acceleració intracíclics (IAV), la seva relació amb la velocitat de nedo i posteriorment la seva relació amb la resta de paràmetres cinemàtics per poder analitzar i millorar el seu rendiment. Alhora cal definir els valors habitual dels nedadors d'elit d'aquestes fluctuacions, tant globals com en cada fase per a poder diferenciar quan aquestes són normals i quan són pròpies de les limitacions en les possibilitats de generar impulsió i de les forces de resistència del medi, de manera que es puguin detectar errors i fer propostes de millora en la tècnica de braçada per a millorar la propulsió generada i l'eficiència de desplaçament.

4.3 POSSIBILITATS TECNOLÒGIQUES PER A AVALUAR LA TÈCNICA I L'EFICIÈNCIA PROPULSIVA

Per a poder determinar els aspectes que defineixen el gest tècnic en la natació competitiva, els estudis realitzats s'han implementat amb tres tipus d'instruments de mesura: les càmeres de vídeo, els velocímetres i els acceleròmetres; cadascun dels quals permet obtenir un tipus de dades específic i alhora presenten certes avantatges i limitacions que s'analitzen a continuació.

4.3.1 CÀMERES DE VÍDEO

La càmera de vídeo és l'instrument utilitzat tradicionalment en l'anàlisi de la tècnica i del rendiment en natació. Inicialment, les imatges (dades qualitatives) van permetre la descripció de la trajectòria de la braçada de cada estil, però ràpidament, Counsilman (1968) i Silva (1970) en publicacions separades, es van adonar de la necessitat d'individualitzar la tècnica i d'utilitzar les lleis de la física i la hidrodinàmica per a poder definir les característiques necessàries del gest tècnic i la resultant de les forces generades (Maglischo 1993). Per tant, calia una quantificació de les dades obtingudes.

Per a poder determinar acuradament el moviment realitzat (angles articulars, inclinació de la mà, graus de rotació,...), la complexitat de la natació requereix una filmació en 3 dimensions, que es pot realitzar amb un mínim de dues càmeres sincronitzades, però que moltes vegades en requereix la utilització de tres o més, per a poder filmar tots els plans i tant dins com fora l'aigua. Alhora cal situar marcadors reflectants en cada punt anatòmic de referència i un marc de calibratge per a poder posteriorment digitalitzar cada fotograma i obtenir les coordenades de tots els punts i del centre de gravetat (CdG) en 3D, utilitzant diferents algorismes informàtics com el DLT o *direct linear transformation*. Aquest tractament, a més de ser molt llarg, complex i que implica considerables coneixements tècnics i informàtics, produeix un cert grau d'error de reconstrucció, que cal controlar per a mantenir-lo dins dels marges

de tolerància (Gourgoulis, Aggeloussis et al. 2008; Callaway, Cobb et al. 2009). Un exemple d'aquest tipus d'anàlisi el podem trobar en l'estudi de Ohgi, Ichikawa et al. (2003), on va obtenir els recorreguts de les articulacions de l'espatlla, el colze i el canell durant tot el cicle de l'estil braça (fig.4.3.1.)

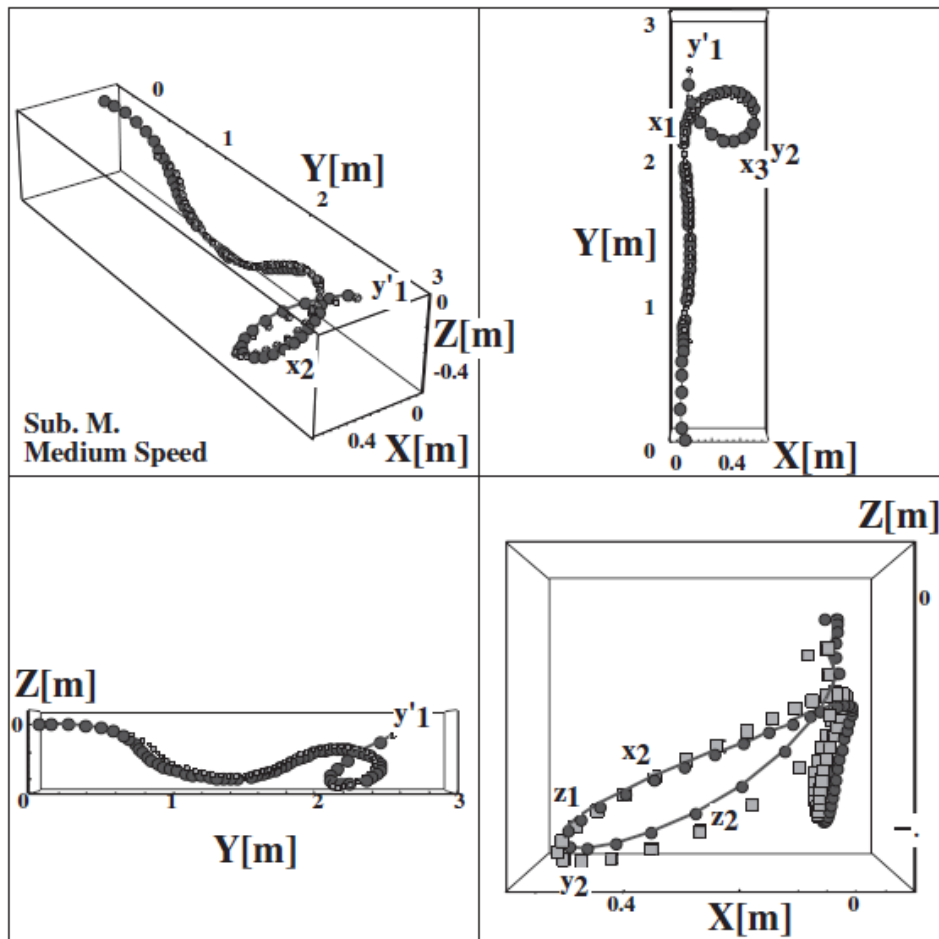


Fig.4.3.1. Il·lustració de les visions en els diferents plans dels canvis en la situació de l'articulació metacarpofalànica al llarg d'un cicle, extret de Ohgi, Ichikawa et al. (2003)

Les principals limitacions d'aquest sistema són les pròpies dels aparells i tècniques utilitzats: cal un mínim de dues càmeres ben situades i sincronitzades, un marc de referència i un software per al tractament de dades; la filmació no avarca gaire distància (màxim 2 o 3 braçades, uns 10 o 12 metres), de manera que no podem valorar proves llargues; generalment suposen un elevat cost econòmic i de mitjans, limitant la seva utilització habitual; la visió sota l'aigua és deficient (les turbulències poden tancar els moviments de les mans i alhora es produeix un efecte de refracció de

la llum en l'aigua que no permet situar els referents anatòmics en tots els *frames*); i sobretot, que el tractament de dades és complex i els resultats no són instantanis.

En canvi, presenta l'avantatge de que les dades obtingudes són fàcilment interpretables (s'obtenen imatges o reproduccions esquemàtiques amb els punts anatòmics bàsics) i aplicables posteriorment ja que es veu clarament el moviment.

Si analitzem aquest sistema en quant a les seves possibilitats de poder analitzar les variacions de velocitat o acceleracions intracíclics del centre de gravetat (CdG), ens trobem amb el principal problema de la complexitat de la digitalització per a calcular aquest punt i veure la variació de la seva trajectòria en el temps, a més de la complexitat de la sincronització de diferents càmeres. Com a mètode adaptat, com ja s'ha dit anteriorment, molts estudis han calculat les variacions utilitzant el maluc com a punt de referència, ja que en aquest cas només es necessita una càmera per a fer la filmació lateral, però els resultats són força diferents (veure apartat 4.2.4.). Una de les justificacions la podem trobar en que la posició del maluc varia amb la rotació del cos, mentre que no ho fa el CdG.

4.3.2 VELOCÍMETRE

Una alternativa a la filmació, molt més senzilla d'utilitzar, i sense la necessitat d'importants coneixements tècnics, és el velocímetre. Aquest aparell consta d'un cable que per un extrem s'uneix a un cinturó que porta el nedador a l'alçada de la zona lumbar baixa (buscant una aproximació a la situació del CdG) i per l'altre extrem està enrotllat en un *encoder lineal*, un transductor rotatiu que mitjançant l'emissió d'una senyal elèctrica indica l'angle girat i permet que a mesura que es va estirant el cable s'obtingui la distància de cable estirat, de manera que coneixent el temps transcorregut, es pot saber la velocitat d'estirament del cable i per tant la velocitat horitzontal de nedar. Aquest sistema permet obtenir directament tant la gràfica de les fluctuacions instantànies de la velocitat de nedar com la distància recorreguda, i per

tant és un aparell clarament enfocat a determinar les IVV. Si es sincronitza amb una filmació es poden determinar les diferències de velocitat en cada fase.

Els principals inconvenients que presenta és que només registra en una sola direcció, de manera que les oscil·lacions verticals poden alterar el resultat (força considerables en els estils simultanis, la braça i la papallona); suposa certa incomoditat ja que cal anar lligat a un cable, i pot ser que en algun moment interfereixi l'acció de les cames; té una limitació de distància de registre (generalment tenen un cable de 25m, és a dir, el llarg d'una piscina curta) i finalment és una tecnologia d'elevat cost que no està a l'abast de tothom i requereix una instal·lació preparada (no se'n pot fer un ús habitual). En canvi, té el benefici de que la freqüència de mostreig és molt elevada (fins a 1000Hz), que les dades obtingudes poden ser instantànies, són fàcilment interpretables i poden ser utilitzades per a la millora del rendiment, per a fer comparacions entre un mateix subjecte i també entre diferents subjectes i determinar un patró gràfic òptim.

Segons un article de Leblanc, Seifert et al. (2007), els velocímetres permeten fer quatre tipus d'investigacions diferents:

1. Anàlisi tècnic, associant les diferents fases del cicle amb la velocitat instantània
2. Diagnosi tècnica, mostrant com la modificació d'un patró de moviment pot influir en els màxims o mínims de la velocitat intracíclica
3. Comparar a nedadors de diferents nivells i determinar les diferències entre ambdós en les diferents fases del cicle
4. Determinar l'efecte de la freqüència de braçada (SR) i el ritme de nedo en les IVV, les acceleracions intracíclics a partir de la derivada, els canvis relatius en les diferents fases o la distància recorreguda en cadascuna

Costill (1987) va ser el primer en crear un sistema integrat i sincronitzat de filmació i registre de velocitat mitjançant un velocímetre per tal de poder relacionar les diferents fases de la braçada amb les fluctuacions de velocitat registrades i poder definir la seva acció propulsiva. Posteriorment, molts altres autors han fet estudis semblants, determinant diferències entre intensitats, subjectes, rendiment, estils,...la majoria dels quals ja s'han explicat en l'anterior apartat de les IVV (4.2.4.).

4.3.3 ACCELERÒMETRE

L'acceleròmetre és un aparell portàtil molt petit, afavorint la seva utilització en qualsevol situació sense interferir en el gest habitual de l'esportista, té una freqüència de mostreig mitja-alta (habitualment d'uns 100Hz a uns 250Hz), que permet proporcionar mesures suficientment detallades, i si s'envien les dades directament a l'ordinador (telemetria), es pot tenir un *feed-back* instantani de les mateixes, de manera que pot ser molt pràctic per a poder treballar durant els entrenaments i realitzar controls habituals de tècnica.

Com a consideració important, però, cal que estigui molt ben fixat per tal d'evitar possibles interferències o dades errònies si es desplaça, i el principal problema que presenten els resultats obtinguts amb aquest aparell és que les dades proporcionades no són fàcilment interpretables, i per tant no són pràctiques per a l'entrenador i menys per al nedador per a poder deduir directament com modificar el gest tècnic.

4.3.3.1 Principis de mesura dels sistemes inercials

El funcionament d'aquest aparell es basa en un sistema inercial que permet mesurar les desviacions respecte a una posició estàtica. Utilitzant la inèrcia o canvis d'acceleració en una direcció per a determinar la magnitud del desplaçament, de la mateixa manera que el sistema vestibular en l'organisme ens informa de la posició del nostre cos (desequilibris), podem mesurar els canvis de posició o orientació en els 3 eixos o dimensions (x, y, z), fet que ens permet situar novament la posició del subjecte (Luinge 2002).

Els acceleròmetres d'un eix estan formats per una massa subjecta a una molla dins d'un recipient o caixa. Com que aquesta molla està realitzada amb material piezoelèctric, que produeix un voltatge directament proporcional a la deformació per tracció o compressió, i la massa només es pot desplaçar en una sola direcció, els

registres representen l'acceleració actual en aquella direcció (fig.4.3.2.A). En un acceleròmetre de 3 eixos o dimensions (3D), cal considerar 3 direccions de desplaçament o graus de llibertat, i per tant l'aparell situa la massa inercial en un cub amb molles entre la mateixa i les parets del cub, de manera que es poden registrar els desplaçaments en qualsevol dels 3 plans de moviment (fig.4.3.2.B).

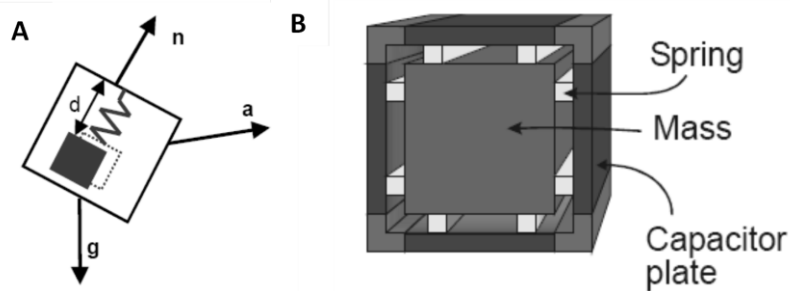


Fig.4.3.2. Esquema bàsic d'un acceleròmetre unidimensional (A) i tridimensional (B), extret de Luinge (2002)

Un altre tipus de sensor inercial són els giroscopis, que determinen la variació d'orientació de l'objecte o cos analitzat mitjançant la determinació de les acceleracions o variacions de velocitat angular. El seu disseny es basa en una massa que exerceix la seva força (pes) en una direcció i que està unida a la caixa o recipient que el conté per a poder registrar el seu desplaçament perpendicular a la força d'actuació citada (fig.4.3.3.A). El principi físic que ens permet determinar aquesta acceleració angular s'anomena *força de Coriolis*, i es basa en que quan el recipient rota en un pla perpendicular al moviment registrat, la massa experimenta una força aparent o inercial (perquè no hi ha cap agent que l'apliqui) en una direcció diferent a la d'actuació, que produeix un lleuger desplaçament perpendicular, però en sentit contrari, a aquesta primera força de gir i al vector de velocitat angular (fig.4.3.3.B). Igual que en els acceleròmetres, ajuntant 3 giroscopis que registrin els tres plans de moviment, obtindrem un giroscopi en 3 dimensions (3D).

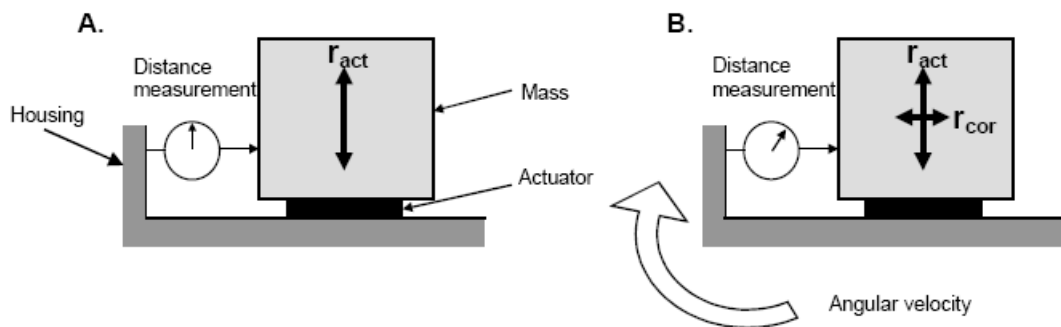


Fig.4.3.3. Esquema bàsic d'un giroscopi, extret de Luinge (2002)

La combinació d'un acceleròmetre 3D i un giroscopi 3D s'anomena unitat de mesura inercial (IMU), i permet obtenir totes les dades cinemàtiques completes d'un moviment (fig.4.3.4.). Cal no oblidar que la gravetat actua sobre qualsevol objecte, i que per tant cal eliminar el seu efecte quan es consideren els registres obtinguts de variacions de moviment, per això moltes IMU incorporen un magnetòmetre que ens permet conèixer contínuament la orientació de l'aparell respecte a la gravetat (camp magnètic). Gràcies a aquest aparell, per una banda, no perdem la referència de la força de la gravetat per a poder situar correctament la posició o inclinació de l'aparell i no incloure a les dades aquesta força, i per una altra, podem determinar a més de les acceleracions lineals i angulars, la direcció real de desplaçament en tot moment, i per tant corregir els registres d'acceleració si els eixos no estan alineats amb el moviment per a saber el valor real de l'acceleració.

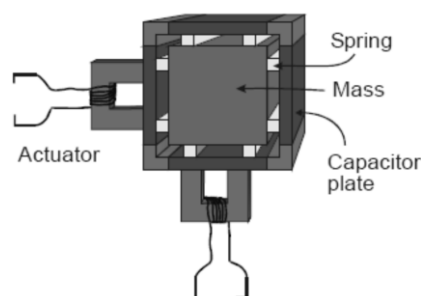


Fig.4.3.4. Esquema bàsic d'una unitat de mesura inercial de 3 eixos de moviment i de gir, extret de Luinge (2002)

Amb les dades obtingudes i el coneixement de la posició o orientació inicial, podríem determinar la variació de posició i orientació de l'objecte analitzat mitjançant una doble integració de les dades d'acceleració. Però com que sempre hi ha un grau d'error considerable en les dades obtingudes a causa d'una gran quantitat de dades que no són totes rellevants (soroll), que obliga a filtrar les dades "brutes" obtingudes, aquesta integració encara pot multiplicar aquests errors, de manera que és difícil obtenir els valors exactes de desplaçament en la direcció d'avanç mitjançant aquest càlcul i no s'acostuma a realitzar (Davey 2004).

Els acceleròmetres i IMU presenten com a principal avantatge el seu reduït volum, que juntament amb una unitat de processament de gran capacitat de registre, suposa un aparell totalment portàtil que no interfereix en la realització del gest tècnic, amb el qual podem registrar activitats de llarga durada (hores) i que també es pot integrar amb altres aparells (per exemple pulsòmetres o filmacions) per a poder sincronitzar dades i millorar l'anàlisi i l'explicació de les variacions registrades (Chen and Bassett 2005).

Presenten nombroses aplicacions relacionades amb la mesura del moviment i el rendiment esportiu:

- Determinació de l'activitat física realitzada en la seva vida diària en persones amb problemes de mobilitat: una aplicació principalment en l'àmbit mèdic, de rehabilitació i geriàtric, que detecta la posició (estirat, assegut o dret) i l'activitat del subjecte (quiet, caminant lent o ràpid, corrent, pujant o baixant escales) en base a uns llindars de registre i algorismes determinats prèviament (Knight, Bristow et al. 2007)
- Mesures d'equilibri amb inclinòmetre o giroscopi (plataformes d'estabilitat)
- Monitorització de partits: la determinació dels canvis d'acceleracions permet determinar la intensitat de desplaçament i la durada de cada fase accelerativa i per tant comparar els esforços de diferents competidors
- Mesura de la velocitat angular i l'acceleració de desplaçament d'una persona i/o de diferents segments (extremitats superiors i inferiors) per a poder

determinar correspondències amb la tècnica considerada correcta (cal establir prèviament el patró ideal mitjançant diferents llindars o corbes en els moviments claus), asimetries dreta/esquerra i la força generada en cada moviment

- Demostrar la importància de l'eficiència d'esforç en les activitats de rendiment. Com a exemple, en un estudi de Pelham, Robinson et al. (2006), després d'obtenir els registres d'una palista d'elit, i intentar ajustar les seves corbes amb un patró considerat "ideal", es va comprovar que quan l'atleta té un patró de moviment més eficient utilitza menys energia, el que suposa un major nivell de productivitat, i una disminució de les possibilitats de lesió musculoesquelètica o de fatiga per sobreutilització.

4.3.3.2 Utilització de l'accelerometria en la recerca esportiva

Per la seva mida tan reduïda, la possibilitat d'obtenir dades durant moltes hores seguides i en el context específic de la pràctica habitual, i la fàcil descàrrega i representació de les dades generades, els acceleròmetres s'estan introduint cada vegada més en la detecció del moviment, el seu anàlisi i la monitorització de l'activitat física en gent amb problemes de mobilitat. Però en l'àmbit de la investigació en el rendiment esportiu, i la seva utilització en el control de la pràctica habitual, encara no està molt estès el seu ús, en part per la falta d'estudis que determinin l'adequada interpretació de les dades directes generades per a actuar en la millora tècnica o determinar el rendiment associat (velocitat, posició) quan treballem amb dades de 3 eixos o dimensions (Knight, Bristow et al. 2007).

Una de les aplicacions en les quals podem trobar estudis és l'avaluació inercial en un sol eix (acceleròmetre uniaxial) de certs exercicis de força en els quals el desplaçament de la càrrega és lineal ("press" en banc o salts verticals), determinant la relació o corba entre càrrega i acceleració, de manera que es pot determinar la força desenvolupada i la velocitat, conèixer la potència resultant i establir un perfil específic per a cada esportista que faciliti i millori el control de la intensitat de l'entrenament i

l'aparició de la fatiga (Jidovtseff, Croisier et al. 2008). Aquest tipus d'estudis s'havien realitzat anteriorment amb velocímetres o plataformes de salt, però l'acceleròmetre permet realitzar la prova en camp i minimitza l'aparell utilitzat.

Pel que fa al tema específic de l'anàlisi de les variacions intracíclics, diferents estudis han pogut confirmar la validesa de la utilització d'un aparell de registre inercial com és l'acceleròmetre per a poder conèixer els canvis que es produeixen entre cicles en diferents tipus d'esports o activitats cíclics. Un estudi de Pfau, Witte et al. (2005) d'anàlisi del pas del cavall, ha comprovat que les IMU, fins i tot les de baix cos, si es situen de manera que controlin el moviment del tronc o centre de gravetat (CdG), permeten monitoritzar els moviments intracíclics detectant canvis de posició i variacions de velocitat intracíclics amb el mateix detall i definició que la filmació (anàlisi òptic del moviment).

Un altre estudi, va comparar els registres d'un GPS d'alta resolució, un GPS normal, un GPS de canell (dissenyat per a esportistes, econòmic i per tant amb molt poca resolució) i una IMU combinada amb un GPS senzill, i va determinar que el millor aparell per a analitzar les variacions intracíclics era aquest darrer, ja que era el que tenia major precisió, freqüència de mostreig i sobretot permetia conèixer les variacions en l'eix vertical, que afegeix una variable interessant per a poder valorar millor els canvis i el rendiment associat (Tan, Wilson et al. 2008). Els GPS serien més adequats per a determinar la velocitat de desplaçament, però cal tenir en compte que depenen d'un factor molt variable com és el nombre de satèl·lits captats i la seva triangulació, de manera que les dades poden perdre fiabilitat i variar en funció del lloc i l'hora del dia (matí/ tarda) (Janssen and Sachlikidis 2010). Per tant, podem considerar que els acceleròmetres són un aparell adequat per a mesurar canvis ràpids d'acceleració que es succeeixen dins de cada cicle, i posteriorment poder analitzar la tècnica o determinar l'eficiència propulsiva.

En un tipus d'estudi molt diferent, un grup d'investigació de la Universitat Politècnica de Catalunya va crear un sistema combinant 3 acceleròmetres (un a cada rem i un al kayak) per a monitoritzar el rendiment en rem anomenat REMOTE (Llosa,

Vilajosana et al. 2009). Amb aquesta integració de sensors, van poder obtenir la velocitat i posició a partir de les acceleracions registrades pel vaixell, el seu balanceig o inclinació, l'angle d'entrada i sortida del rem (tècnica de palada), l'acceleració dels dos remes (per a valorar la simetria i eficiència gest tècnic) i la trajectòria del rem en la palada (desplaçament), que comparada amb la tècnica correcta, permet avaluar el rendiment de l'esportista. Amb aquest exemple, es demostra que amb un sistema inercial es pot obtenir molta informació sobre la tècnica i variables biomecàniques d'un gest tècnic en un esport cíclic de resistència, però per a obtenir totes aquestes dades cal aplicar coneixements de física i informàtica força complexos per a poder programar els algorismes del software que extreuen les variables a partir de una gran quantitat de dades en brut, de manera que la seva aplicació pràctica no sempre és senzilla i està a l'abast de molt pocs.

4.3.3.3 Utilització de l'acceleròmetre en l'anàlisi de la natació competitiva

En l'àmbit de la natació específicament, els estudis que s'han realitzat amb acceleròmetres han estat principalment per a monitoritzar el nedo automàticament, facilitant la tasca dels entrenadors, ja que evitava el cronòmetre manual o la filmació, permetia obtenir dades de molts nedadors alhora, i millorar la precisió i la rapidesa d'obtenció de les mateixes.

Però el primer estudi publicat internacionalment va ser el del grup del Dr. Yuji Ohgi (Ohgi, Ichikawa et al. 2002), en el qual es va situar un acceleròmetre al canell del nedador i es va proposar la possibilitat de poder determinar les fases de la braçada en l'estil lliure i braça sincronitzant les dades obtingudes amb la filmació. Es va comprovar que no només es podien definir clarament les mateixes, a partir de llindars (màxims i mínims) i canvis simultanis en les dades dels 3 eixos, ja que hi ha patrons específics per a cada estil i per a cada fase, sinó que a més es podia detectar l'aparició de fatiga ja que la mateixa implica canvis tècnics que es poden registrar en els gràfics.

Aquest tipus d'estudi són força rellevants de cara a l'anàlisi de la tècnica de la braçada, però no es pot saber la resultant de propulsió generada en cada fase, ja que

no s'analitza el desplaçament del cos, que és al final l'aspecte més important per a poder determinar l'eficiència propulsiva. En canvi, si situem l'acceleròmetre a prop del CdG (zona lumbar baixa o sacra), s'obtenen les acceleracions del cos en els tres plans de moviment, que quan es sincronitzen amb la filmació, permeten definir els efectes propulsius de cada moviment, el moment o fase en que s'inicia i s'acaba aquesta capacitat d'avanç (vèncer les forces resistives) i si es produeix en una o diverses fases, determinant la durada de cadascuna i l'amplitud o rang en el qual es mou, de manera que podem definir en cada cas un patró d'acceleració i confirmar que l'anàlisi de les variacions d'acceleració intracíclics serien un mètode vàlid i directe per a analitzar l'eficàcia tècnica (Buchner, Reischle et al. 2003).

Una de les investigacions més rellevants realitzades és la tesi doctoral del Dr. Neil P. Davey l'any 2004, "*Acquisition and analysis of aquatic stroke data from an accelerometer based system*" en la qual va dissenyar un acceleròmetre triaxial submergible que pogués ser portat pel nedador sense que li produís cap interferència en el gest. Amb les dades obtingudes, va desenvolupar els algorismes que permetien saber quan s'impulsava el nedador de la paret, el tipus d'estil de nedo i el nombre de braçades en l'estil lliure, de manera que es poguessin definir automàticament les seves principals variables de rendiment: temps de nedo (total i per llarg) i variables del cicle (freqüència i longitud). Els resultats obtinguts es van comparar amb les dades de la presa de temps manual i de la filmació, obtenint diferències menors a $\pm 1s$ en el moment d'impulsió amb la paret, i diferències menors a ± 1 cicle en el 90% dels casos en el nombre de braçades (Davey 2004), validant per tant la seva utilització per a aquest objectiu. Posteriorment, altres autors han treballat per intentar millorar la detecció d'aquestes i altres variables relacionades (Khoo, Lee et al. 2009; Siirtola, Laurinen et al. 2011), implementar altres tipus d'acceleròmetres o sistemes integrats (filmació i IMU) (Le Sage, Bindel et al. 2010) o intentar optimitzar la correcció tècnica amb sistemes de biofeedback (Bächlin, Förster et al. 2009).

Un aspecte a considerar per a la correcta utilització d'aquest aparell és la freqüència de mostreig. Per això, en l'article citat anteriorment de Siirtola, Laurinen et al. (2011) van complementar l'estudi determinant quina és la millor freqüència per a

poder monitoritzar el nedo: després de realitzar un mostreig inicial de 50Hz, van crear series de dades de 5Hz, 10Hz i 25Hz, i van concloure que amb 5Hz es podia determinar l'estil i la intensitat de nedo, i amb 10Hz, definir amb un cert detall les accions realitzades.

Per una altra banda, cal considerar la situació de l'aparell: si bé s'ha pogut provar clarament que les variacions d'un punt fix com és el maluc són diferents a les del centre de gravetat (Figueiredo, Vilas-Boas et al. 2009), que seria el punt més indicat per a determinar el valor real de les variacions intracíclics, també s'ha demostrat que els patrons dels dos tipus d'anàlisi tenen una certa correlació, i per això es considera que a nivell relatiu es pot utilitzar un punt anatòmic fix de referència com a mètode molt més senzill que la digitalització de les filmacions en 3D, que és l'únic mètode per a poder determinar exactament la posició del centre de gravetat en cada posició (Fernandes, Ribeiro et al. 2012).

En la majoria d'estudis que utilitzen un acceleròmetre com a aparell de mesura de les IAV, s'ha situat en la zona baixa lumbar, ja que és la zona més propera al centre de gravetat i a més està situat en l'eix medial del cos i no en un lateral com el maluc, on les variacions es poden veure clarament augmentades pels moviments de rotació del tronc. Malgrat que no hi ha cap estudi que hagi validat mitjançant la fotogrametria en 3D les dades d'acceleració obtingudes des d'aquest punt de referència i les del centre de gravetat, la seva utilització en molts estudis que mesuren les IAV i IVV del cos (amb velocímetre o acceleròmetre) fan que puguem considerar-lo un punt de referència vàlid a nivell relatiu (en les mateixes condicions), i que facilita molt la presa de dades.

Per una altra banda, cal considerar les possibles alteracions de les dades a causa de les modificacions de l'orientació de l'acceleròmetre respecte a la gravetat, que pot anar afectant als diferents eixos de mesura: segons Slawson, Justham et al. (2008), la utilització del mateix acceleròmetre i la mateixa configuració en tots els tests assegura la consistència de les dades obtingudes, de manera que les comparacions entre aquestes mesures d'acceleració poden ser acceptades a nivell relatiu.

Darrerament, tant en natació com en altres esports, s'està investigant per a poder utilitzar l'acceleròmetre per a conèixer la velocitat de desplaçament, paràmetre clau

en la determinació del rendiment en moltes especialitats esportives. El problema, com ja s'ha indicat abans, és que els constants canvis en la direcció de desplaçament fan que no es pugui evitar que l'orientació de l'aparell es modifiqui contínuament, de manera pot introduir biaixos i per tant errors en els càlculs de la integral de la velocitat. Per tant, com que cal fer considerables càlculs aritmètics, pocs autors han proposat aquest tipus de recerca.

El primer en fer un estudi amb aquesta intenció en natació va ser Stamm, Thiel et al. (2011), en una prova pilot de cas únic, el qual va comparar les dades proporcionades per un velocímetre amb la integral de les dades proporcionades per l'acceleròmetre en dos casos: un a partir de les dades d'acceleració total (mitjana de les tres components o eixos) i l'altre a partir de les dades d'acceleració només en l'eix d'avanç. Va poder provar que la mitjana de velocitat en 25m estil lliure registrada amb el velocímetre ($0,964 \pm 0,086$ m/s) es corresponia amb la de integral de l'acceleració total ($0,944 \pm 0,119$ m/s), però no amb la de l'acceleració d'avanç ($1,331 \pm 0,207$ m/s), mostrant que és molt important poder diferenciar les components d'acceleració dels tres eixos.

Però qui realment va fer l'estudi complet, i a més va calcular la velocitat tenint en compte les possibles desviacions en l'orientació de l'acceleròmetre per a fer les correccions en la direcció i valor resultant i minimitzar els errors, va ser el Dr. Dadashi, de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Dadashi, Crettenanad et al. 2011), qui va fer la comparativa entre la velocitat proporcionada per un velocímetre com a valor de referència i la calculada a partir de les dades d'una IMU corregides, determinant que hi ha una correlació significativa entre les dades obtingudes amb els dos sistemes (Rho Spearman = 0,94 $p < 0,001$), amb una diferència de $0,6 \pm 5,4$ cm/s en la velocitat mitjana.

La clau per al càlcul de l'acceleració real era determinar dos marcs de referència per als eixos de moviment: el global o estàndard, que són els habituals longitudinal (paral·lel al terra de la piscina), vertical i lateral; i el del sensor, que estableix els mateixos eixos en referència al sensor (es modifiquen quan varia la direcció de moviment), per a posteriorment determinar en cada mostra o dada l'orientació dels eixos del sensor respecte al marc de referència global, mitjançant unes fórmules

complexes d'àlgebra basades en els quaternions, un tipus de nombres complexos que en física s'utilitzen per a representar orientacions d'un objecte en un espai tridimensional, que permeten la correcció de la desviació en l'angle d'orientació. El càlcul de la velocitat instantània també presentava desviacions, tot i fer la integració directa de l'acceleració corregida, i per tant calia aplicar novament algorismes, en aquest cas la mitjana de moviment geomètric (*geometric moving average* o GMA en anglès) per a dividir les dades d'acceleració en segments on el registre es manté en el mateix interval per a calcular separatament la desviació en cadascun i determinar un patró de tendència.

Per tant, es pot veure com el càlcul de la velocitat a partir de les dades proporcionades per l'acceleròmetre o IMU és molt complexa i requereix de coneixements de física aplicada molt avançats a l'abast de molt pocs, de manera que cal buscar variables més senzilles, però alhora que permetin diferenciar el rendiment, per a poder utilitzar aquests aparells per a la recerca habitual en natació competitiva.

En aquest sentit, Slawson, Justham et al. (2008) van fer un test preliminar utilitzant un acceleròmetre per a valorar les possibilitats de diferenciar l'estil de nedo i el nivell de rendiment, i van poder determinar que es pot fer amb una representació gràfica de les dades i una senzilla estadística descriptiva (mitjana, desviació estàndard, màxim, mínim i amplitud), confirmant que les dades proporcionades directament per l'acceleròmetre permeten determinar les característiques cinemàtiques bàsiques de la braçada (a partir de la durada de cada cicle), atribuir un perfil gràfic determinat a un estil o a un nedador concret, ja que presenten patrons específics en cada cas, i poder analitzar les modificacions per augments de velocitat o diferents nivells de rendiment.

Per tant podem considerar l'acceleròmetre com un aparell pràctic per a poder ser utilitzat de manera senzilla per la majoria dels entrenadors i que pot proporcionar dades útils per a la monitorització de la tècnica.

5. PROPOSTA D'ESTUDI I OBJECTIUS

Les proves de natació en aigües obertes són una activitat que s'ha començat a popularitzar fa relativament pocs anys, en la qual s'està començant a establir un calendari competitiu amb proves regulars i campionats internacionals, fet que ha contribuït a que comencin a haver-hi nedadors que es dediquen professionalment només a aquesta especialitat, de manera que s'han d'especialitzar en els requeriments fisiològics, biomecànics, neuromusculars,... específics per a aquestes proves de llarga durada (entre 1 i 6 hores). Aquests nedadors no han estat analitzats habitualment, ja que la majoria d'estudis es centren en nedadors de proves de piscina, per això es considera que l'estudi dels mateixos pot ser una aportació interessant en la millora del coneixement de les particularitats que són necessàries per a un bon rendiment en les proves d'aigües obertes, ja que s'ha demostrat que l'especialitat competitiva afecta tant a la despesa energètica relativa com a la coordinació motriu a diferents intensitats (Seifert, Komar et al. 2010).

Els articles que han analitzat aquests nedadors específicament s'han basat sobretot en l'estudi de les seves variables antropomètriques (la relació d'aquestes amb el rendiment i la comparativa entre gèneres) i les evolucions de rendiment en diferents proves. En un primer estudi de VanHeest, Mahoney et al. (2004) es va fer la comparativa antropomètrica entre aquest tipus de nedadors i els d'especialitats més curtes (piscina), determinant que en general els nedadors de llargues distàncies tenen una alçada inferior, menor pes i percentatge de massa muscular, mentre que pel que fa a les característiques fisiològiques, els resultats van mostrar que els llindars ventilatoris i els valors de consum màxim d'oxigen eren força semblants als d'altres esports d'ultraresistència en homes però no en dones, que són superiors, mostrant que la natació és un dels esports on aquestes diferències entre gèneres són inferiors. En un segon estudi de camp (amb els participants d'una prova competitiva) es va poder demostrar que les variables antropomètriques no són un aspecte significatiu a l'hora de considerar les possibilitats de rendiment en proves d'aigües obertes, ja que l'única variable que presentava una correlació significativa amb el resultat era la velocitat habitual en els entrenaments, de manera que les capacitats fisiològiques

(volum dels entrenaments) i tècniques (ritme habitual nedo) serien el factor important en la preparació (Knechtle, Baumann et al. 2010).

Per una altra banda, els estudis fets sobre rendiment són principalment l'anàlisi de les evolucions dels temps finals, tant de proves històriques en aigües obertes, com el creuament del Canal de la Mànega, com en les competicions actuals de la FINA (Fédération International de Natation). Podem destacar que en general els temps finals s'han reduït molt al llarg dels anys tant en homes com en dones, tot i que darrerament s'han estabilitzat força (Vogt, Rüst et al. 2013), que és quan s'ha començat a professionalitzar aquest esport (a partir de l'any 2000 aproximadament). Zingg, Rüst et al. (2014) van determinar que el rendiment femení ha millorat més i cada vegada està més a prop del masculí les proves de 10km, mentre que en 25km les diferències han augmentat.

En un altre tipus d'estudi, Zamparo, Bonifazi et al. (2005) van analitzar la despesa energètica dels nedadors de fons, determinant els efectes en les diferents variables fisiològiques, cinemàtiques i coordinatives després de nedar 2km, mostrant que la fatiga és un aspecte important a considerar quan es valora la tècnica d'aquests nedadors i per tant cal fer proves específiques de llarga durada en les valoracions.

Però no hi cap estudi que analitzi les característiques específiques de la cinemàtica i la tècnica d'aquests nedadors a les seves intensitats competitives. Com que, en base a tot el que s'ha exposat anteriorment, l'avanç en el medi aquàtic depèn de la resultant entre les forces propulsives i les de resistència (Ungerechts 1988), i l'equilibri d'aquests dos factors facilita el manteniment de la velocitat de desplaçament (inèrcia), ja que sinó cada vegada que es perd la inèrcia cal realitzar un esforç o aplicació de força (acceleració) extra per a poder vèncer les forces de resistència i recuperar la velocitat (Vilas-Boas 1996), l'estudi de les variacions d'acceleració intracíclics es considera un paràmetre vàlid per a analitzar les característiques temporo-espacials de la coordinació global del cos i del cicle (Vilas-Boas, Fernandes et al. 2011) i permet determinar les capacitats propulsives del nedador. Com ja s'ha dit anteriorment, seria més adequat que les variacions de velocitat intracíclics, variable molt més utilitzada habitualment en la recerca, sobretot si posteriorment es vol fer un paral·lelisme de la capacitat

propulsiva amb el gest tècnic de cada fase, perquè la resultant de l'aplicació d'una força no és la velocitat, sinó l'acceleració, coincidint per tant un màxim propulsiu amb un màxim de la corba d'acceleració i sent posterior el pic en la gràfic de velocitat (Buchner, Reischle et al. 2003).

En el cas dels nedadors d'especialitats de fons, en els quals és important establir les habilitats tècniques per tal de poder nedar més ràpid (Potdevin, Deligniers et al. 2002) i millorar l'economia, factor molt important per al rendiment en proves de llarga distància, ja que la disponibilitat de fonts energètiques és clau per al manteniment de l'esforç continuat i la intensitat específica, l'estudi de les IAV pot ser encara més important com a indicador tècnic i de rendiment. Amb una monitorització continuada de les mateixes (distàncies llargues), es pot determinar si es manté la propulsió o si hi ha un augment de les fluctuacions amb la fatiga, valorant la possible pèrdua d'eficiència i per tant un augment de la despesa energètica. A més, com que si es modifica la velocitat o ritme de nedo, cal adaptar tot el gest tècnic a les noves condicions per a mantenir novament el balanç de forces, les IAV poden ser un paràmetre que ens permeti apropar-nos a l'estudi, de manera indirecta però senzilla, de l'adequació de les modificacions per al manteniment de l'eficiència propulsiva.

Per una altra banda, cal considerar que el desplaçament en el medi aquàtic del propi cos, i concretament en aquest cas l'estil lliure o crol, suposa un gest tècnic de gran complexitat, amb la mobilització del tronc i dels quatre segments corporals amb moviments diagonals en els tres plans de moviment (Maglischo 2003), per això és necessari analitzar les acceleracions en tres dimensions. Aquest fet permet diferenciar quines són les forces que s'apliquen en l'eix d'avanç i per tant aquelles que són més útils per a la propulsió. Per això es considera que la millor opció és la utilització d'un acceleròmetre triaxial, ja que permet registrar les dades acceleratives en els tres eixos i a més, no interfereix en la realització del gest tècnic i es poden registrar les dades durant una distància relativament llarga.

Per tant, en aquesta tesi doctoral es proposarà un estudi en el qual s'analitzen les IAV en nedadors de fons d'alt rendiment a les seves intensitats de competició, amb la intenció de conèixer els seus patrons habituals d'acceleració, les variables

cinemàtiques del cicle i analitzar les modificacions que es produeixen amb els canvis d'intensitats submàximes, per a poder establir els valors de referència dels nedadors d'aquestes especialitats i ampliar la base de coneixement de la seva cinemàtica específica. Igualment, es compararan les dades de nois i noies per a determinar si hi ha diferències per gènere.

Resumint, es presenten tres objectius principals:

1. Definir els patrons habituals de les variacions d'acceleració intracíclics a tres intensitats submàximes en nedadors de fons d'alt rendiment, diferenciant els valors en funció del gènere
2. Determinar els canvis significatius de tots els paràmetres acceleratius i de cicle entre cada prova
3. Relacionar aquests paràmetres amb la velocitat, per a determinar la seva importància en funció de la intensitat

Per a poder realitzar la definició dels patrons, es realitzarà una estadística descriptiva de les dades obtingudes, obtenint la mitjana i desviació estàndard les principals variables: mitjana, mitjana quadràtica i desviació típica del valor acceleratiu, i valor màxim, mínim i amplitud de la senyal accelerativa. Alhora es determinaran les variables del cicle (freqüència, longitud i índex de cicle), per a acabar de definir la tècnica de nedo

Pel que fa a l'anàlisi comparatiu i relacional es plantegen 4 objectius secundaris:

- Determinar les diferències entre els valors mitjans de cada ritme per gènere
- Determinar les diferències entre els valors mitjans en funció del gènere per a cada ritme
- Determinar la relació entre els valors de la velocitat de nedo en tots els ritmes i cada paràmetre acceleratiu
- Determinar la relació entre la velocitat de nedo en cada ritme i els seus paràmetres corresponents

6. MATERIAL I MÈTODES

Per a la realització d'aquest estudi es va escollir treballar amb nedadors d'elit, ja que es considera que les seves dades poden ser les més rellevant per a conèixer d'una banda els valors dels millors nedadors, i alhora, poder saber quines són fluctuacions reals de les variacions d'acceleració intracíclics quan el nivell tècnic és màxim, i així poder saber si l'estudi i l'aparell utilitzat són prou sensibles per a poder detectar diferències significatives en nedadors d'alt nivell i per tant poder ser utilitzat en la recerca i millora tècnica d'aquest grup d'esportistes.

Per una altra banda, es va voler estudiar als nedadors de fons, ja que la natació d'aigües obertes és una especialitat amb una creixent importància tant a nivell competitiu com a nivell de practicants de base, però encara no s'han plantejat estudis que avaluïn exclusivament a nedadors d'aquesta especialitat.

6.1 SUBJECTES/MOSTRA

La selecció de nedadors de fons d'alt rendiment es va realitzar en base a dos criteris: per una banda la seva presència en la llista de la classificació final de les fases territorials de les competicions de fons (2000 i 3000 metres) de la temporada 2011-2012, publicat per la Real Federació Espanyola de Natació (RFEN), i per una altra, donada la baixa disponibilitat de desplaçament, que fossin de clubs de Catalunya. Es van escollir nedadors i nedadores de categories junior y sènior, i com que es va veure que fet el filtratge citat anteriorment, s'assolia un nombre de subjectes suficient per a poder realitzar l'estudi, es va procedir a contactar amb els diferents clubs per tal d'explicar el projecte de recerca i sol·licitar la seva col·laboració, permetent que els seus nedadors realitzessin els tests corresponents. Es van prioritzar aquells clubs amb més nedadors, per tal de poder realitzar diverses preses de dades en una sola sessió.

Finalment, es va aconseguir que 5 clubs o centres d'entrenament donessin el consentiment i la mostra final va ser de 12 participants o nedadors masculins (7 de categoria sènior (grup MS) i 5 juniors (grup MJ)) i 9 participants o nedadores fèmnes (4

de categoria sènior (grup FS) i 5 de juniors (grup FJ)). Per a poder assegurar que el nivell de rendiment és semblant, es van determinar els punts FINA de cadascú, una puntuació que atorga la Federació Internacional de Natació (FINA) a cada marca en funció del rècord del món del moment, i que es modifiquen cada any en funció dels canvis en les temps realitzats en competició. Les característiques dels mateixos, així com de les dues agrupacions per gènere, es presenten a continuació (taula 6.1):

| GRUP | EDAT | ALÇADA (m) | PES (kg) | PUNTS FINA |
|-----------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| FJ (n=5) | 15,60 ± 1,14 | 1,62 ± 0,06 | 55,20 ± 2,17 | 685,40 ± 45,97 |
| FS (n=4) | 22,00 ± 6,06 | 1,71 ± 0,03 | 61,75 ± 3,20 | 787,75 ± 57,03 |
| MJ (n=5) | 18,40 ± 0,55 | 1,75 ± 0,04 | 66,00 ± 6,75 | 708,00 ± 86,30 |
| MS (n=7) | 24,29 ± 4,68 | 1,79 ± 0,06 | 72,14 ± 6,01 | 768,86 ± 22,65 |
| GENDER: | | | | |
| F (n=9) | 18,44 ± 5,08 | 1,66 ± 0,07 | 58,11 ± 4,26 | 730,89 ± 72,01 |
| M (n=12) | 21,83 ± 4,61 | 1,78 ± 0,06 | 69,58 ± 6,80 | 743,50 ± 63,01 |

Taula 6.1. Característiques descriptives dels nedadors participants en l'estudi

6.2 DISSENY DE L'ESTUDI

Com que la intenció de l'estudi es monitoritzar a aquests nedadors en les seves velocitats o ritmes habituals de nedo en competició en aigües obertes, que són distàncies variables de 5km a 25km, es va seleccionar la prova de 1500m, que es la més llarga que es fa en piscina, com a referència de base. Per a determinar el ritme al qual caldria realitzar les tres proves, es van determinar les intensitats relatives (ritme mig dels 100m) de cada prova per tal de poder aproximar-se el màxim possible a la velocitat habitual de les competicions: per a la prova del 1500 s'utilitza com a referència el rècord del món del 2013, mentre que les proves dels 5km, 10km i 25km, que es realitzen en aigües obertes, s'utilitza el temps del guanyador en el darrer mundial (Barcelona 2013) (taula 6.2). Es va establir que els tres ritmes progressius que s'havien de mantenir durant els test o proves de l'estudi serien del 85%, el 90% i el

95% de la velocitat màxima del 1500m lliures, buscant un augment d'intensitat igual per a les tres proves i que alhora hi hagués un canvi significatiu entre cadascuna.

| | Prova | 1500m | 5km | 10km | 25km |
|------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Masc | Temps | 0:14:31,02 | 0:53:30,4 | 1:49:11,8 | 4:47:27,1 |
| | Ritme 100m | 58,07 | 64,21 | 65,52 | 68,99 |
| | % rel | | 90,5% | 88,6% | 84,2% |
| Fem | Temps | 0:15:36,53 | 0:56:34,2 | 1:58:19,2 | 5:07:19,7 |
| | Ritme 100m | 62,44 | 67,88 | 70,99 | 73,76 |
| | % rel | | 92% | 88% | 84,6% |

Taula 6.2. Comparativa del rècord del món en 1500m al 2013 i els temps dels guanyadors en les proves d'aigües obertes del mundial de Barcelona 2013 per a determinar les intensitats relatives de nedo.

Les proves es van realitzar en piscina de 50m, ja que per una banda la piscina evitava la variabilitat que podia haver suposat realitzar-les en un entorn d'aigües obertes, amb possibles corrents, onades, vent o variacions de temperatura de l'aigua; i per una altra, es limitaven els viratges respecte a la piscina curta o de 25m i s'aconseguia un tram de nedo constant més llarg.

Per a no allargar massa les proves es va buscar una distància intermitja que no fos massa llarga, però si el suficient per a poder tindre un registre continuat que permetés obtenir un nombre considerable de dades per a veure el comportament del nedador en la llarga distància. Finalment es va determinar que la distància de 500m era prou curta (entre 5 i 7 minuts) per a no fatigar el subjecte, facilitava una presa de dades per sessió de dos o tres subjectes, i ens proporcionava 10 parcials (llargs de 50m) per prova, que eren suficients per a poder fer una mitjana i definir el comportament o patró acceleratiu de cada nedador. Es considera que no cal fer la prova més llarga ja que la mateixa està en una zona metabòlica inferior al llindar làctic (*maximal lactate steady state* o MLSS en anglès), i Pelarigo, Denadai et al. (2011) van demostrar que si no es sobrepassa aquesta intensitat (canvi de la condició metabòlica), els valors cinemàtics del cicle no es modifiquen significativament en proves de 30 minuts.

Per tant, el protocol definitiu de l'estudi va ser de 3 proves de 500m a 85%, 90% i 95% del ritme màxim de la prova de 1500m. El descans entre cada prova era d'uns 45 a 60 segons, el temps necessari per a reiniciar el registre de l'acceleròmetre tal i com s'explicarà més endavant.

6.2.1 MATERIAL

Com que l'objectiu de l'estudi és monitoritzar les variacions d'acceleració intracíclics en les tres direccions del moviment durant el nedo, com a únic aparell per a la realització de les proves s'utilitzarà un acceleròmetre triaxial, concretament el *Ripxx* (Edas, Spring Hill, TN, USA) (fig. 6.1), un aparell portàtil de mida força reduïda (11,43 x 6,35 x 1,27cm), amb gravació autònoma (mitjançant una targeta de memòria SD de 2GB que permet realitzar fins a 80h de gravació i una bateria amb una durada màxima de 8 hores), resistent a l'aigua (tot i que no submergible) i que conté:



Fig. 6.1. Fotografia de l'aparell de registre RIPXX

- un acceleròmetre triaxial amb una freqüència de registre o mostreig de 100Hz i una amplitud de senyal de $\pm 6g$
- un giroscopi triaxial registrant sincrònicament amb l'acceleròmetre, amb una amplitud de registre de ± 500 graus/segon

- una unitat de GPS també sincronitzada, amb una freqüència de mostreig de 10Hz.

La gravació s'inicia i s'atura prement el botó "REC", i en acabar el registre es poden descarregar les dades directament a l'ordinador mitjançant un cable USB en el software específic de l'aparell *Ripxx Manager*, que crea un arxiu per cada registre. El programa a més ofereix la possibilitat de descarregar els arxius en un format *.csv (de les sigles en anglès de *comma-separated values*), és a dir, com un document que presenta totes les dades de cada mostreig (100 dades per segon) en una fila separats per comes, i és aquest format el que després ens permetrà exportar les mateixes a un full de càlcul *Excel* convertint-los en columnes i poder fer el tractament corresponent. Totes les dades dels tres dispositius es descarreguen conjuntament en cada arxiu, però en el nostre cas, com que no s'avaluen girs i les proves es fan en un espai cobert on no hi ha recepció de senyal de satèl·lits, només s'utilitzaran les dades de l'acceleròmetre. Com que aquest aparell proporciona les dades en *g* (és a dir en unitats d'acceleració de la gravetat, equivalent a $9,81\text{m/s}^2$), caldrà convertir els valors per a obtenir el valor a les unitats del sistema mètric o sistema internacional d'unitats (SI). Els càlculs de l'anàlisi estadístic es poden realitzar en qualsevol dels dos tipus de valors, ja que no suposen cap variació.

Com que el *Ripxx* no és submergible, va ser necessari posar l'aparell dins d'una bossa impermeable, concretament un model de Tribord (Decathlon, France) de 17x12cm, buscant que quedés el més ajustat possible a l'aparell (fig.6.2).



Fig. 6.2. Fotografia del RIPXX dins de la funda submergible

6.2.2 PROCEDIMENT

Prèviament a la realització de les proves, es pactava amb l'entrenador quins serien els nedadors que participarien en l'estudi i en quin ordre. Posteriorment, els nedadors realitzaven en aquest ordre el seu escalfament habitual i en acabar se'ls explicava com seria la prova: coneixent el seu temps en competició dels 1500m estil lliure, es calculava el temps parcial (ritme per a cada 100m) per a les tres intensitats que calia completar (85%, 90% i 95%) i se li indicava al nedador/a els mateixos.

A continuació, es donava l'acceleròmetre al nedador/a per tal que se'l posés a l'alçada de la zona baixa lumbar. Donada la considerable sensibilitat de l'acceleròmetre, és important que l'aparell estigui ben fixat al nedador per a evitar el registre de moviments que no pertanyen als canvis de posició del cos derivats de la tècnica de nado. En aquest cas, s'utilitzava el banyador *slip* en els nois o la part de baix d'un "biquini" en les noies per a fixar bé l'aparell, situant la part gruixuda de la bossa estanca per fora, i lligant el més fort possible el cordó de la cintura per a evitar els moviments de l'aparell (fig. 6.3). La sortida de la prova la donava l'administrador del test i es realitzava des de dins de l'aigua.



Fig. 6.3. Situació de l'aparell RIPXX en els participants de l'estudi: en un noi, directament en el banyador (primera imatge) i en una noia, posant la part de baix d'un biquini per a subjectar-lo (segona imatge).

Amb l'acceleròmetre es poden registrar totes les variables referents a l'acceleració en els tres eixos anatòmics: supero-inferior (x), medio-lateral (y) i antero-posterior (z) (fig. 6.4). Amb les dades proporcionades, també es poden delimitar els cicles, a través

d'un mínim en l'eix y, i per tant, determinar la freqüència, ja que sabem el temps que s'ha trigat en realitzar cadascun (Davey, Anderson et al. 2008).

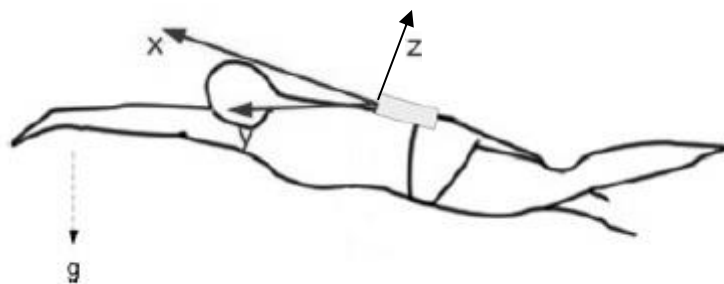


Fig. 6.4. Marc de referència dels eixos de l'acceleròmetre en el cos del nedador, on X indica els moviments cap endavant, Y els de costat a costat i Z els verticals, adaptat de Le Sage, Bindel et al. (2011)

En principi, el temps per llarg i el temps de cada prova s'obté també a partir de les dades de l'acceleròmetre, però com que en la sortida i els viratges no es neda i la velocitat de desplaçament és superior, diferents autors (Arellano 2010) han coincidit en treure el temps de viratge, concretament 7,5m abans i després de la paret, per a poder determinar la velocitat real de nedo. Per a poder determinar aquest temps, es va utilitzar un sistema de cronometratge mitjançant el software XNote Stopwatch (dnSoft Research Group, Cheboksary, Rússia): visualment es determinava quan el cap passava la línia dels 7,5m delimitada prèviament, i només clicant una tecla quedaven registrats els temps parcials en un full de càlcul d'Excel directament.

En acabar cada prova o test, es demana al participant que es tragués l'acceleròmetre per a poder parar el registre i reiniciar-lo novament per a la següent prova, i se li tornava per tal que se'l tornés a col·locar al mateix lloc. Al final, s'obtenien tres arxius diferents per a cada nedador, un per a cada intensitat.

6.2.3 VARIABLES D'ESTUDI

Per a poder determinar totes les dades necessàries per a definir els diferents paràmetres rellevants en les tres proves de l'estudi, es va definir la variable independent, que seria la velocitat o ritme de la prova, i les resultants o dependents, les que defineixen la cinemàtica de la braçada i els patrons acceleratius en els tres eixos. A continuació s'expliquen detalladament les independents i la manera de calcular-les:

- Ritme de la prova:

Aquesta variable és la que queda definida prèviament a la realització del test. Tal i com s'ha dit anteriorment, en funció de la marca acreditada pel nedador en la prova de 1500m estil lliure, es determinarà individualment per a cada participant la velocitat que ha de dur en les tres proves (85%, 90% i 95% d'aquest temps). Es donava un marge del $\pm 1\%$ per a poder donar la prova com a vàlida (taula 6.3).

| | 1500 | 500 | -1% | 1% | Ritme 100 | -1% | 1% |
|------|----------|-----------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| 100% | 15:50,00 | 05:16,67 | 05:13,50 | 05:19,83 | 01:03,33 | 01:02,70 | 01:03,97 |
| 95% | 16:37,50 | 05:32,50 | 05:29,18 | 05:35,83 | 01:06,50 | 01:05,84 | 01:07,17 |
| 90% | 17:25,00 | 05:48,33 | 05:44,85 | 05:51,82 | 01:09,67 | 01:08,97 | 01:10,36 |
| 85% | 18:12,50 | 06:04,17 | 06:00,53 | 06:07,81 | 01:12,83 | 01:12,11 | 01:13,56 |

Taula 6.3. Exemple per a un dels participants de l'estudi del càlcul dels temps per a cada prova o intensitat

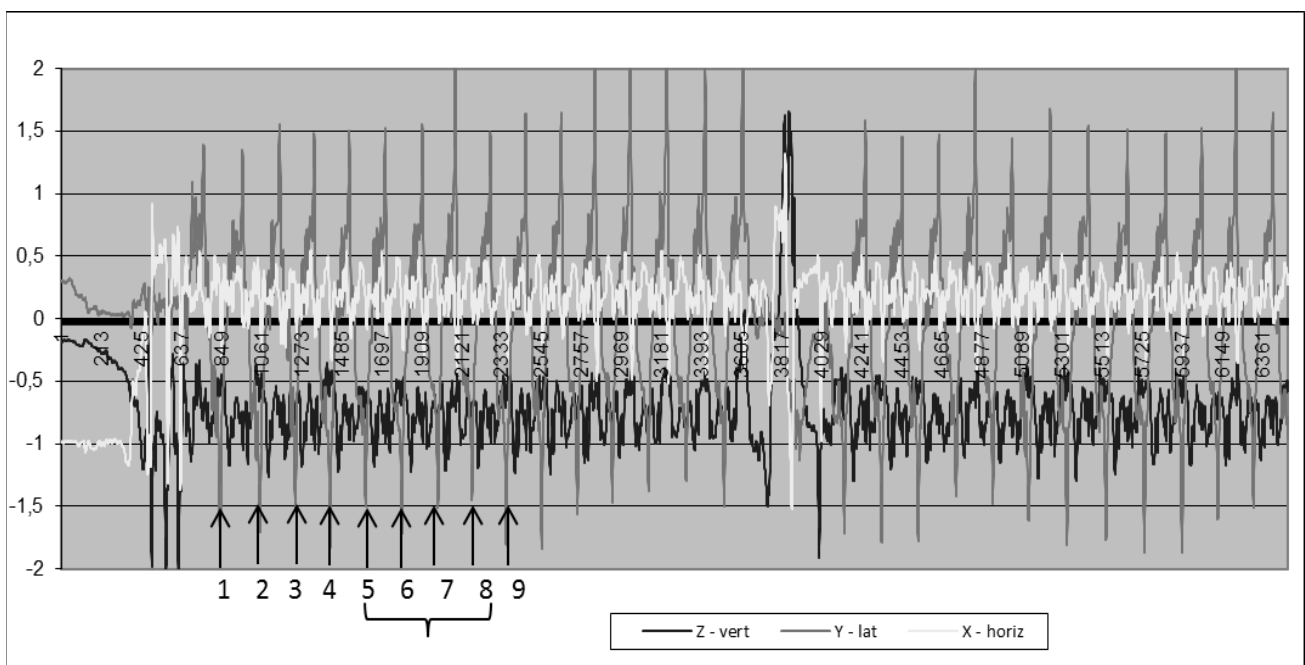
- Velocitat de nedo (V_n):

Seria la velocitat real a la qual està avançant el nedador, és a dir i com s'ha dit anteriorment, aquella velocitat només en el tram en que s'està nedant, eliminant per tant els trams de viratges i la sortida. També seria una variable independent, ja que està directament relacionada amb el ritme de la prova predefinit. En aquest cas, s'ha comptabilitzat el temps que es triga en realitzar els primers i darrers 7,5m de cada llarg de piscina, és a dir, tant les

aproximacions com els allunyaments de la paret, i es considera com a temps de nedo el que es triga en recórrer cada vegada els 35m centrals, sent per tant el càlcul de la velocitat de nedo:

$$V_n \text{ (m/s)} = 35\text{m} / (\text{Temps llarg} - (\text{temps 7,5m inicials} + \text{temps 7,5m finals}))$$

La resta de les variables, les dependents, s'obtenen a partir de les dades de l'acceleròmetre. Per a cada intensitat es determinaran totes les variables en cada llarg de piscina (50m), obtenint per tant 10 parcials de cada prova. Per a determinar-les, s'utilitzarà la mitjana de les dades de tres cicles quan la tècnica de nedo ja s'ha estabilitzat després del viratge, concretament del cinquè, sisè i setè cicle de cada llarg, que es defineixen a partir de la determinació de l'interval de files o dades que hi ha entre dos valors mínims en les dades de l'acceleració en l'eix lateral (Davey, Anderson et al. 2008) (fig. 6.4).



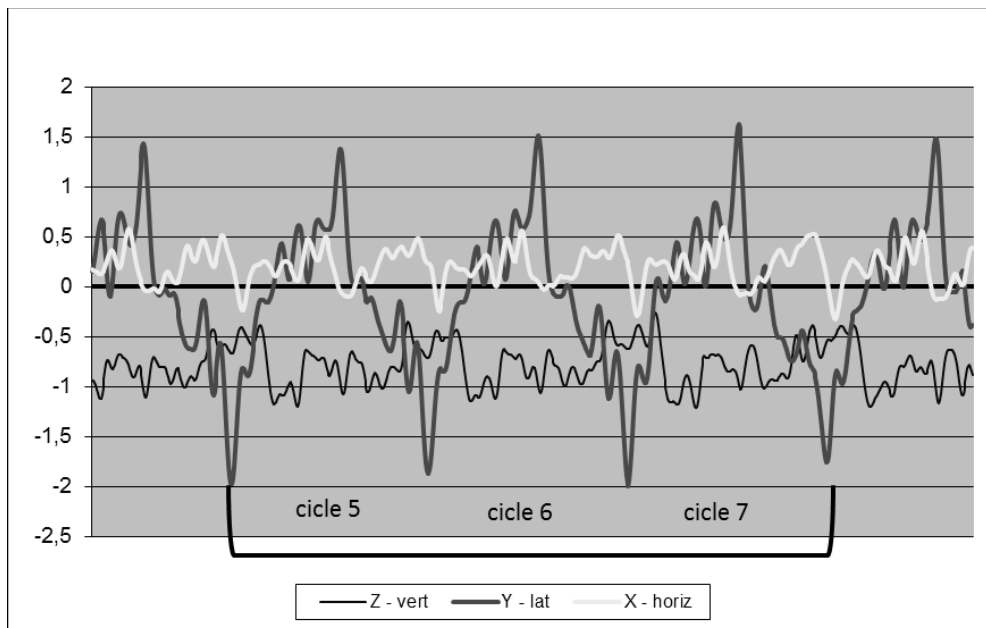


Fig. 6.4. Representació gràfica de les dades obtingues amb l'acceleròmetre en els tres eixos i la delimitació dels cicles analitzats amb un mínim de l'eix lateral: primer gràfic, visió general, i segon gràfic, visió ampliada

Com a exemple del càlcul de cadascuna d'aquestes variables, a continuació es presenta el quadre tal i com s'ha configurat en el full de càlcul del programa Microsoft Excel 2010 (taula 6.4): per a cada parcial o llarg de piscina es presenten totes les variables calculades per a cadascun dels cicles (5, 6 i 7) en els tres eixos i la freqüència de cicle (SF), i a les files de final, la mitjana de cadascuna de les variables per a poder definir els paràmetres assignats a aquest parcial de la prova.

| 90% | Parcial 100-150 | Sup- inf | Med- lat | Ant- post | TxC | SF |
|---------|--------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|--------------|
| Cicle 5 | med | -0,791 | -0,082 | 0,204 | 1,86 | 32,26 |
| | SD | 0,178 | 0,654 | 0,175 | | |
| | RMS | 0,811 | 0,658 | 0,269 | | |
| | max | -0,481 | 1,610 | 0,538 | | |
| | min | -1,232 | -1,553 | -0,342 | | |
| | rang | 0,750 | 3,163 | 0,880 | | |
| Cicle 6 | med | -0,769 | 0,047 | 0,194 | 1,80 | 33,33 |
| | SD | 0,171 | 0,727 | 0,182 | | |
| | RMS | 0,788 | 0,727 | 0,266 | | |
| | max | -0,382 | 2,007 | 0,508 | | |
| | min | -1,159 | -1,491 | -0,401 | | |
| | rang | 0,777 | 3,498 | 0,909 | | |
| Cicle 7 | med | -0,769 | -0,052 | 0,207 | 1,79 | 33,52 |
| | SD | 0,164 | 0,715 | 0,162 | | |
| | RMS | 0,786 | 0,715 | 0,263 | | |
| | max | -0,452 | 1,482 | 0,590 | | |
| | min | -1,164 | -1,891 | -0,202 | | |
| | rang | 0,712 | 3,373 | 0,793 | | |
| MED | med | -0,776 | -0,029 | 0,202 | 1,82 | 33,04 |
| | SD | 0,171 | 0,699 | 0,173 | | |
| | RMS | 0,795 | 0,700 | 0,266 | | |
| | max | -0,439 | 1,700 | 0,546 | | |
| | min | -1,185 | -1,645 | -0,315 | | |
| | rang | 0,746 | 3,345 | 0,861 | | |

Taula 6.4 Quadre exemple d'un dels participants per a la determinació de la mitjana de les dades de tres cicles en cada tram o llarg de piscina

A continuació s'explicarà cadascuna de les variables analitzades i el seu càlcul:

- Freqüència de cicle (SR per les sigles de *stroke rate* en anglès):

És el nombre de cicles o braçades que es realitzen per unitat de temps, generalment per minut. Per a determinar aquest paràmetre cal conèixer prèviament el temps que es triga en realitzar un cicle o la mitjana de diversos cicles (habitualment se'n comptabilitzen 3) i es fa el següent càlcul:

$$SR(\text{cicles}/\text{min}) = 60 * (3 \text{ cicles} / \text{temps dels tres cicles})$$

- Longitud de cicle (SL per les sigles de *stroke length* en anglès):

És la distància que s'avança en cada cicle o braçada i es determina a partir de la relació entre velocitat de nedo i la freqüència de cicle:

$$SL \text{ (m/cicle)} = V_n * 60 / SF$$

- Índex de cicle (SI per les sigles de *stroke index* en anglès):

És el producte entre la velocitat i la longitud de braçada, és a dir, la valoració de la capacitat propulsiva que es pot mantenir a certa velocitat, ja que es general quan es va més ràpid es disminueix aquesta SL. És un factor que s'utilitza habitualment en la literatura com a indicador de l'eficiència propulsiva del nedador, ja que hi ha una relació inversa entre el SI i la despesa energètica. A més, s'ha comprovat que és un dels factors claus en la predicció del potencial aeròbic ($VO_2\text{max}$) en una regressió múltiple, i que el SI és superior en nedadors internacionals respecte als nacionals en tots els estils (Sanchez and Arellano 2002). La fórmula per al seu càlcul seria:

$$SI = V_n * SL$$

- Mitjana dels valors d'acceleració:

És el valor de la mitjana aritmètica de totes les dades de cada cicle, és a dir, la suma de tots els valors entre el nombre dels mateixos, indicant la tendència central dels mateixos:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

- Desviació típica dels valors d'acceleració:

Aquesta variable és un indicador de la dispersió de les dades respecte a la mitjana. També simbolitzada com a SD (per les sigles en anglès de *standard deviation*), el seu valor correspon a l'arrel quadrada de la variança (simbolitzada com a S^2), que és la mitjana dels quadrats de les desviacions

d'una sèrie, és a dir de les diferències entre cada valor i la mitjana aritmètica.

La seva fórmula de càlcul seria:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N}}$$

- Mitjana quadràtica dels valors d'acceleració

Representada com a RMS (per les sigles en anglès de *root mean square*), és el valor quadràtic mig de totes les dades obtingudes per a l'interval analitzat, és a dir, l'arrel quadrada de la suma de cada valor elevat al quadrat (per a eliminar els valors negatius de la senyal) dividit pel nombre de dades, sent la fórmula resultant:

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

S'utilitzarà aquets valor per a caracteritzar la senyal accelerativa ja que en els diferents estudis que analitzen les IAV en natació es considera l'indicador de l'eficiència o economia de nedo, des de que Holmér, en un estudi del 1979, el va proposar com a tal (Madera, González et al. 2012b), i s'ha demostrat que presenta una correlació significativa amb el rendiment o velocitat assolida (Tella, Toca-Herrera et al. 2008).

- Valor màxim de l'acceleració:

És el valor més gran de tota la sèrie de dades.

- Valor mínim de l'acceleració:

És el valor més petit de tota la sèrie de dades.

- Amplitud dels valors d'acceleració:

És la diferència entre els valors major i menor de la sèrie de dades, és a dir, el màxim menys el mínim. També s'anomena recorregut o rang de la variable.

Finalment, per a poder caracteritzar la senyal de l'acceleració en la seva totalitat, es fa una proposta d'anàlisi mitjançant un histograma o polígon de freqüències de la mateixa, de manera que es pugui determinar en quin interval o rang d'acceleració es mou principalment el nedador, quina importància tenen els valors extrems i sobretot com es produeixen els canvis amb l'augment de velocitat de nado. Només es va analitzar la senyal de l'eix d'avanç (X), ja que és el que realment reflexa la resultant de les forces d'avanç en el nedador i per tant resumeix la capacitat propulsiva en base a les seves característiques tècniques.

Per a fer aquest anàlisi, es van determinar 10 intervals en base als màxims i mínims de tots els nedadors per tal de poder incloure totes les dades. Es van agafar les dades completes (100Hz) de tres cicles de tres llargs, concretament del tercer (100-150m), del sisè (250-300m) i del novè (400-450m) i es va calcular la distribució de totes les dades en base a les freqüències citades anteriorment i posteriorment es van relativitzar (percentatge), ja que cada nedador té una durada de cicle diferent i per tant el nombre de dades no és igual. Per a poder comprovar les diferències entre gèneres, es van agrupar les dades de tots els homes i totes les dones. L'anàlisi es va fer amb l'aplicació d'anàlisi de dades estadístiques dels fulls de càlcul del programa Excel (Office 2010).

6.3 ANÀLISI ESTADÍSTIC

Abans d'analitzar les dades, es van filtrar les mateixes per a poder eliminar el "soroll" o dades que no pertanyen a les fluctuacions "normals" de la senyal, concretament mitjançant un filtre de baix pas digital *Butterworth* que suavitza totes les dades que estan per sobre d'una freqüència determinada. El càlcul d'aquestes noves dades filtrades es va realitzar amb un complement dels fulls de càlcul de Excel. En aquest cas, es va seleccionar com a freqüència de tall 7Hz, en base a la fórmula citada en l'article de Yu, Gabriel et al. (1999).

Per a realitzar l'anàlisi estadístic, es va utilitzar el programa SPSS en la versió 15.0 (SPSS Inc, Chicago, IL, EUA), exportant les dades obtingudes després de calcular totes les variables per a les tres proves i els tres eixos en tots els subjectes (30 dades per a cada paràmetre) amb els fulls de càlcul del programa Excel en la versió 2010 (Microsoft Office, Redmont, WA, EUA).

Després, es va agrupar als subjectes per gènere, i es va realitzar un anàlisi estadístic descriptiu de totes les variables per a cada intensitat, és a dir, mitjana i desviació típica. Alhora es va valorar la normalitat de totes les series de dades, mitjançant el test de normalitat Shapiro-Wilk (S-W) perquè el nombre de subjectes és inferior a 30, per tal de definir si es podien aplicar tècniques estadístiques normals: els resultats van ser que la majoria dels paràmetres presentaven distribucions no normals, de manera que l'anàlisi calia realitzar-lo amb proves no paramètriques.

Concretament, per a determinar les diferències de les diferents variables entre intensitats i entre gènere en cada intensitat, es va aplicar la prova de *Wilcoxon* per a comparar cada intensitat per gènere i els dos gèneres per intensitat considerant $p < 0,05$ com a diferència significativa.

Finalment, per a determinar la correlació entre totes les variables i la velocitat de nedo corresponent, es va utilitzar la prova de correlació de *Spearman* (correlació rho), determinant igualment la significació en $p < 0,05$; però com que les relacions no sempre són gaire elevades (valors de r relativament baixos), en base a la proposta de Cohen 1992 citada per Madera Gil (2012), considerarem un coeficient de correlació $\rho \geq 0,5$

com a elevat i per tant molt significatiu, una $\rho \geq 0,10$ i $\rho < 0,5$ com a correlació mitja i per tant amb menor significativitat tot i la $p < 0,05$; i finalment una $\rho < 0,10$ com a correlació baixa o trivial, que no es considerarà significativa.

Es van fer 4 anàlisis, tres corresponents a cada intensitat (85%, 90% i 95%) i la global que enquadrava les dades de les tres intensitats i la velocitat respectiva de cada tram.

7. RESULTATS

Els resultats obtinguts en aquesta tesi els podem dividir en tres grans blocs: per una banda, les dades proporcionades directament per l'acceleròmetre després dels registres de les proves realitzades en la piscina; en base a aquestes, amb un posterior tractament que s'ha explicat anteriorment en l'apartat del disseny de l'estudi, s'obtenen les variables descriptives dels patrons acceleratius, les variables del cicle i la velocitat de nedo de tots els nedadors per a les tres intensitats; i finalment, l'anàlisi estadístic d'aquestes variables resultants, que ens permet determinar les diferències per intensitat, gènere i la seva possible relació amb la velocitat de nedo.

En aquesta tesi només es presentaran els resultats del tractament estadístic (descriptiu i inferencial), però no els registres de l'aparell ni les taules dels càlculs realitzats, ja que la gran quantitat de dades obtingudes, així com l'ampli tractament que s'ha hagut de fer, impossibilita la seva presentació impresa. Resumint, s'està parlant de fulls de càlcul d'Excel en els quals hi ha 100 dades per segon de cada eix, que tenint en compte que les proves duren entre 330 i 400 segons aproximadament, ocupen al voltant d'unes 35000 a 42000 files de dades totals. Com que els gràfics no permeten representar més de 30000 files, s'han de dividir les dades de cada prova en dos, quedant per tant 6 columnes en cada full, que es converteixen en 12 quan es calculen les dades filtrades. Com que s'han valorat tres intensitats, per a l'arxiu de cada nedador hi ha tres fulls com aquest, a més de tres fulls amb les dades obtingudes amb el cronòmetre, i que posteriorment, cal fer un full resum on es calculen totes les variables descriptives de cada llarg de les tres proves, amb el quadre que s'ha presentat anteriorment (pàg. 123), i que ens permeten confeccionar la taula resum amb les 30 dades (10 per prova) de cada paràmetre que resumeixen el patró acceleratiu, la cinemàtica del cicle i la velocitat per a poder fer l'anàlisi estadístic, un exemple de la qual es presenta en la taula 7.1. Cada document d'Excel ocupa entre 20 i 25MB, és a dir, que es necessiten més de 500Mb per a poder presentar totes les dades obtingudes dels 21 subjectes.

| EIX HORIZONTAL | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-------|---------|-------|
| | | RMS | med | SD | max | min | rang | TxS | SF | vel ned | LB |
| 85% | 50 | 0,28 | 0,12 | 0,249 | 0,515 | -0,715 | 1,23 | 1,76 | 34,03 | 1,337 | 2,357 |
| | 100 | 0,268 | 0,120 | 0,240 | 0,479 | -0,750 | 1,23 | 1,89 | 31,8 | 1,274 | 2,404 |
| | 150 | 0,266 | 0,122 | 0,237 | 0,485 | -0,711 | 1,20 | 1,87 | 32,14 | 1,271 | 2,372 |
| | 200 | 0,267 | 0,132 | 0,233 | 0,492 | -0,656 | 1,148 | 1,79 | 33,46 | 1,303 | 2,307 |
| | 250 | 0,259 | 0,132 | 0,224 | 0,487 | -0,630 | 1,117 | 1,84 | 32,67 | 1,276 | 2,344 |
| | 300 | 0,265 | 0,144 | 0,223 | 0,496 | -0,674 | 1,170 | 1,80 | 33,27 | 1,331 | 2,350 |
| | 350 | 0,270 | 0,146 | 0,228 | 0,469 | -0,688 | 1,157 | 1,81 | 33,15 | 1,313 | 2,377 |
| | 400 | 0,265 | 0,14 | 0,23 | 0,49 | -0,62 | 1,12 | 1,81 | 33,09 | 1,320 | 2,387 |
| | 450 | 0,274 | 0,14 | 0,23 | 0,47 | -0,69 | 1,16 | 1,85 | 32,37 | 1,285 | 2,382 |
| | 500 | 0,269 | 0,14 | 0,23 | 0,47 | -0,63 | 1,10 | 1,84 | 32,67 | 1,298 | 2,373 |
| 90% | 50 | 0,296 | 0,181 | 0,233 | 0,621 | -0,469 | 1,090 | 1,60 | 37,58 | 1,427 | 2,278 |
| | 100 | 0,287 | 0,177 | 0,226 | 0,531 | -0,589 | 1,120 | 1,72 | 34,82 | 1,368 | 2,357 |
| | 150 | 0,284 | 0,172 | 0,226 | 0,484 | -0,621 | 1,104 | 1,70 | 35,23 | 1,349 | 2,298 |
| | 200 | 0,283 | 0,170 | 0,226 | 0,513 | -0,554 | 1,067 | 1,72 | 34,95 | 1,383 | 2,345 |
| | 250 | 0,275 | 0,166 | 0,219 | 0,502 | -0,544 | 1,047 | 1,69 | 35,57 | 1,323 | 2,232 |
| | 300 | 0,273 | 0,159 | 0,222 | 0,500 | -0,570 | 1,070 | 1,68 | 35,64 | 1,361 | 2,259 |
| | 350 | 0,278 | 0,155 | 0,231 | 0,491 | -0,591 | 1,081 | 1,68 | 35,64 | 1,349 | 2,271 |
| | 400 | 0,267 | 0,145 | 0,226 | 0,490 | -0,575 | 1,065 | 1,67 | 35,86 | 1,353 | 2,261 |
| | 450 | 0,270 | 0,145 | 0,228 | 0,528 | -0,548 | 1,076 | 1,68 | 35,79 | 1,347 | 2,259 |
| | 500 | 0,275 | 0,140 | 0,238 | 0,478 | -0,673 | 1,151 | 1,67 | 35,93 | 1,356 | 2,257 |
| 95% | 50 | 0,297 | 0,129 | 0,268 | 0,655 | -0,585 | 1,240 | 1,53 | 39,22 | 1,530 | 2,340 |
| | 100 | 0,274 | 0,147 | 0,232 | 0,598 | -0,451 | 1,050 | 1,60 | 37,58 | 1,463 | 2,335 |
| | 150 | 0,250 | 0,135 | 0,211 | 0,558 | -0,391 | 0,949 | 1,61 | 37,19 | 1,425 | 2,299 |
| | 200 | 0,250 | 0,137 | 0,209 | 0,576 | -0,377 | 0,954 | 1,59 | 37,74 | 1,458 | 2,292 |
| | 250 | 0,267 | 0,130 | 0,234 | 0,596 | -0,446 | 1,042 | 1,58 | 37,89 | 1,416 | 2,243 |
| | 300 | 0,281 | 0,127 | 0,251 | 0,662 | -0,531 | 1,193 | 1,58 | 37,97 | 1,449 | 2,264 |
| | 350 | 0,258 | 0,128 | 0,224 | 0,556 | -0,427 | 0,983 | 1,58 | 37,97 | 1,446 | 2,285 |
| | 400 | 0,271 | 0,127 | 0,240 | 0,586 | -0,504 | 1,090 | 1,55 | 38,63 | 1,458 | 2,256 |
| | 450 | 0,262 | 0,127 | 0,230 | 0,581 | -0,507 | 1,088 | 1,52 | 39,39 | 1,483 | 2,259 |
| | 500 | 0,286 | 0,126 | 0,258 | 0,657 | -0,556 | 1,212 | 1,50 | 40,09 | 1,499 | 2,231 |

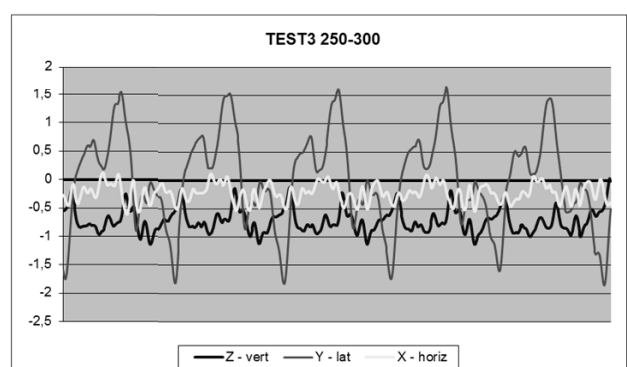
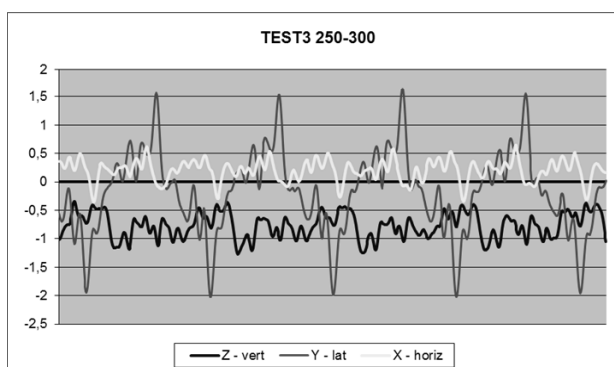
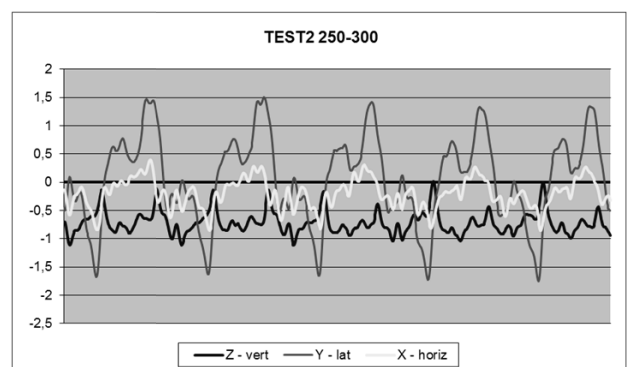
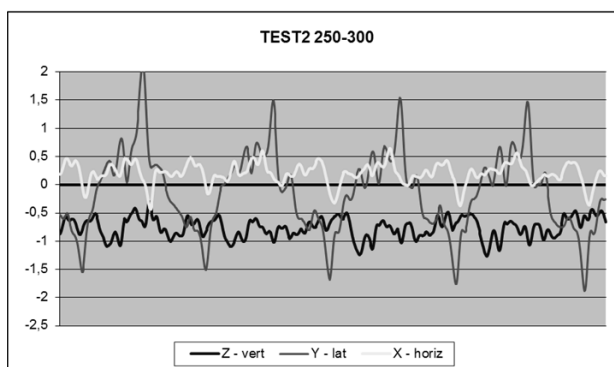
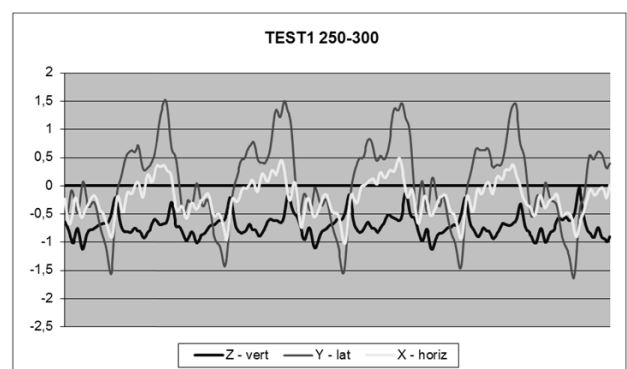
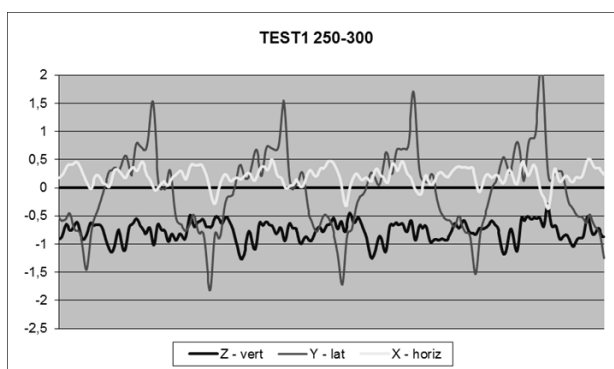
| EIX LATERAL | | | | | | | |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|------|
| | | RMS | med | SD | max | min | rang |
| 85% | 50 | 0,72 | -0,25 | 0,675 | 0,890 | -1,783 | 2,67 |
| | 100 | 0,719 | -0,27 | 0,67 | 0,79 | -1,77 | 2,56 |
| | 150 | 0,709 | -0,25 | 0,66 | 0,84 | -1,76 | 2,60 |
| | 200 | 0,707 | -0,27 | 0,66 | 0,74 | -1,76 | 2,50 |
| | 250 | 0,714 | -0,27 | 0,66 | 0,77 | -1,78 | 2,55 |
| | 300 | 0,71 | -0,26 | 0,66 | 0,80 | -1,79 | 2,59 |
| | 350 | 0,71 | -0,26 | 0,66 | 0,79 | -1,81 | 2,59 |
| | 400 | 0,73 | -0,26 | 0,68 | 0,83 | -1,87 | 2,71 |
| | 450 | 0,72 | -0,26 | 0,67 | 0,86 | -1,82 | 2,69 |
| | 500 | 0,72 | -0,26 | 0,67 | 0,85 | -1,85 | 2,70 |
| 90% | 50 | 0,70 | -0,24 | 0,66 | 0,88 | -1,83 | 2,71 |
| | 100 | 0,74 | -0,26 | 0,69 | 0,82 | -2,06 | 2,88 |
| | 150 | 0,74 | -0,27 | 0,69 | 0,84 | -2,02 | 2,86 |
| | 200 | 0,74 | -0,25 | 0,70 | 0,86 | -2,05 | 2,91 |
| | 250 | 0,75 | -0,27 | 0,70 | 0,87 | -2,07 | 2,94 |
| | 300 | 0,75 | -0,27 | 0,70 | 0,82 | -2,06 | 2,88 |
| | 350 | 0,75 | -0,27 | 0,70 | 0,84 | -2,04 | 2,88 |
| | 400 | 0,75 | -0,27 | 0,70 | 0,81 | -2,09 | 2,90 |
| | 450 | 0,76 | -0,27 | 0,71 | 0,80 | -2,11 | 2,92 |
| | 500 | 0,75 | -0,29 | 0,70 | 0,83 | -2,12 | 2,95 |
| 95% | 50 | 0,65 | -0,19 | 0,62 | 0,94 | -1,32 | 2,26 |
| | 100 | 0,63 | -0,21 | 0,60 | 0,98 | -1,28 | 2,26 |
| | 150 | 0,63 | -0,24 | 0,58 | 0,87 | -1,30 | 2,17 |
| | 200 | 0,63 | -0,21 | 0,59 | 0,96 | -1,27 | 2,23 |
| | 250 | 0,63 | -0,21 | 0,60 | 1,00 | -1,29 | 2,29 |
| | 300 | 0,62 | -0,20 | 0,59 | 0,92 | -1,35 | 2,27 |
| | 350 | 0,64 | -0,24 | 0,60 | 0,90 | -1,31 | 2,20 |
| | 400 | 0,64 | -0,21 | 0,60 | 0,91 | -1,30 | 2,22 |
| | 450 | 0,64 | -0,20 | 0,61 | 0,92 | -1,37 | 2,29 |
| | 500 | 0,64 | -0,19 | 0,61 | 0,91 | -1,27 | 2,18 |

| EIX VERTICAL | | RMS | med | SD | max | min | rang |
|--------------|-----|-------|-------|-------|--------|--------|------|
| 85% | 50 | 0,76 | -0,76 | 0,089 | -0,528 | -0,923 | 0,40 |
| | 100 | 0,764 | -0,76 | 0,10 | -0,52 | -0,92 | 0,40 |
| | 150 | 0,758 | -0,75 | 0,10 | -0,50 | -0,91 | 0,41 |
| | 200 | 0,764 | -0,76 | 0,11 | -0,50 | -0,92 | 0,41 |
| | 250 | 0,760 | -0,75 | 0,12 | -0,48 | -0,96 | 0,48 |
| | 300 | 0,77 | -0,76 | 0,10 | -0,51 | -0,94 | 0,43 |
| | 350 | 0,76 | -0,76 | 0,11 | -0,45 | -0,96 | 0,51 |
| | 400 | 0,76 | -0,75 | 0,11 | -0,45 | -0,95 | 0,50 |
| | 450 | 0,75 | -0,75 | 0,10 | -0,47 | -0,92 | 0,45 |
| | 500 | 0,76 | -0,75 | 0,11 | -0,51 | -0,97 | 0,46 |
| 90% | 50 | 0,80 | -0,79 | 0,14 | -0,48 | -1,05 | 0,57 |
| | 100 | 0,76 | -0,75 | 0,14 | -0,42 | -0,99 | 0,57 |
| | 150 | 0,76 | -0,75 | 0,15 | -0,39 | -1,03 | 0,63 |
| | 200 | 0,76 | -0,75 | 0,14 | -0,40 | -0,97 | 0,57 |
| | 250 | 0,76 | -0,75 | 0,14 | -0,39 | -1,00 | 0,61 |
| | 300 | 0,77 | -0,75 | 0,16 | -0,33 | -1,04 | 0,71 |
| | 350 | 0,769 | -0,75 | 0,15 | -0,37 | -1,03 | 0,67 |
| | 400 | 0,778 | -0,76 | 0,15 | -0,37 | -1,04 | 0,68 |
| | 450 | 0,765 | -0,75 | 0,15 | -0,36 | -1,04 | 0,67 |
| | 500 | 0,770 | -0,75 | 0,16 | -0,35 | -1,03 | 0,67 |
| 95% | 50 | 0,869 | -0,86 | 0,16 | -0,59 | -1,16 | 0,56 |
| | 100 | 0,861 | -0,85 | 0,15 | -0,58 | -1,10 | 0,52 |
| | 150 | 0,862 | -0,85 | 0,16 | -0,55 | -1,15 | 0,60 |
| | 200 | 0,866 | -0,85 | 0,15 | -0,58 | -1,10 | 0,53 |
| | 250 | 0,864 | -0,85 | 0,16 | -0,55 | -1,14 | 0,60 |
| | 300 | 0,87 | -0,85 | 0,15 | -0,57 | -1,11 | 0,54 |
| | 350 | 0,86 | -0,85 | 0,15 | -0,55 | -1,11 | 0,56 |
| | 400 | 0,87 | -0,86 | 0,15 | -0,586 | -1,10 | 0,52 |
| | 450 | 0,87 | -0,86 | 0,15 | -0,585 | -1,11 | 0,53 |
| | 500 | 0,877 | -0,86 | 0,16 | -0,58 | -1,17 | 0,59 |

Taula 7.1. Exemple dels tres quadres resum (un per a cada eix) amb la mitjana calculada de totes les variables per llarg i per prova per a un subjecte.

7.1 ANÀLISI QUALITATIU DELS PATRONS ACCELERATIUS

A continuació es presenta un exemple dels gràfics obtinguts amb les dades de l'acceleròmetre: com que cada nedador presenta un estil individual clarament diferenciat, es posaran els gràfics en els tres eixos de dos nedadors en les tres intensitats, per a poder apreciar aquest patró específic en les tres intensitats, i tres gràfics més de la comparativa de cada eix en les tres intensitats, per a poder apreciar alhora els canvis que es produeixen entre cadascuna.



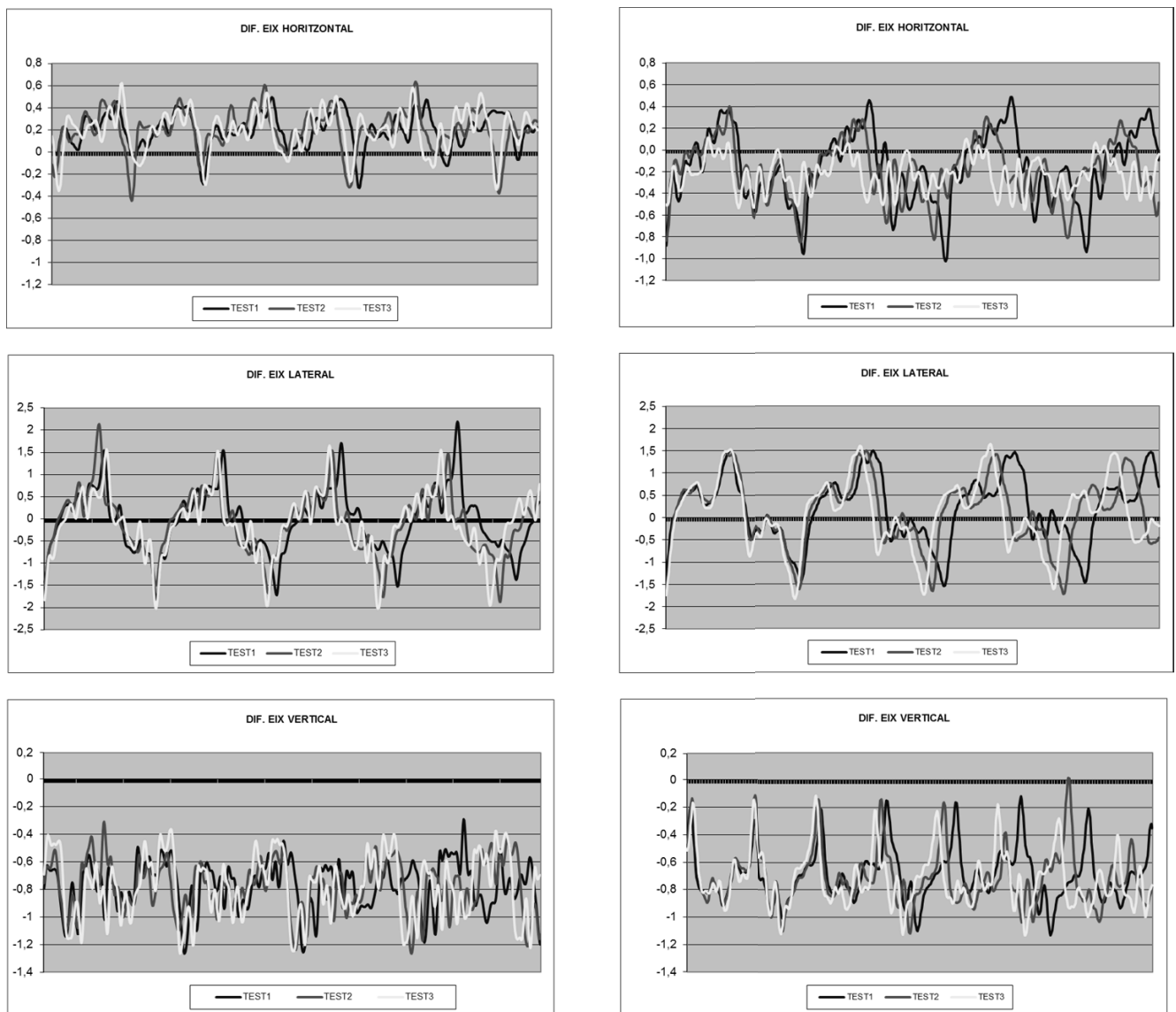


Fig. 7.1. Registres d'acceleració en els tres eixos (en unitats g) obtinguts en els 3 tests de dos participants i les gràfiques comparatives dels registres de cada eix en les tres intensitats (nedador 1, gràfics de l'esquerra, i nedador 2 gràfics de la dreta)

7.2 ANÀLISI DESCRIPTIU I COMPARATIU ENTRE GÈNERE I INTENSITAT

A continuació es presenten les mitjanes i desviacions típiques (SD) de les diferents variables descriptives en les tres intensitats per gènere, així com les diferències significatives entre cada intensitat per gènere i entre gènere per a cada intensitat. Les variables analitzades són: la velocitat, les variables cinemàtiques del cicle (freqüència, longitud i índex de cicle) (taula 7.2), i les variables descriptives de l'acceleració (mitjana, desviació típica, mitjana quadràtica, valor màxim, valor mínim i amplitud de la senyal) en les tres direccions per a cada gènere (taula 7.3, taula 7.4 i taula 7.5). A continuació de cada taula, es presenta també una representació gràfica que permet apreciar millor les diferències que es produeixen entre tots els paràmetres per intensitat i per gènere (fig. 7.2 a 7.5).

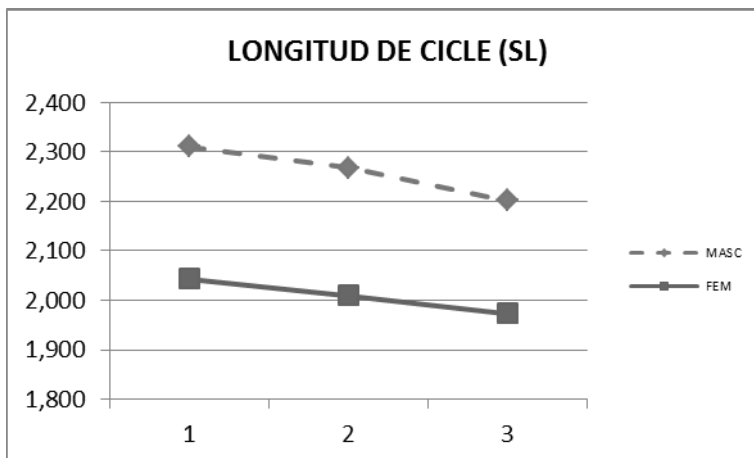
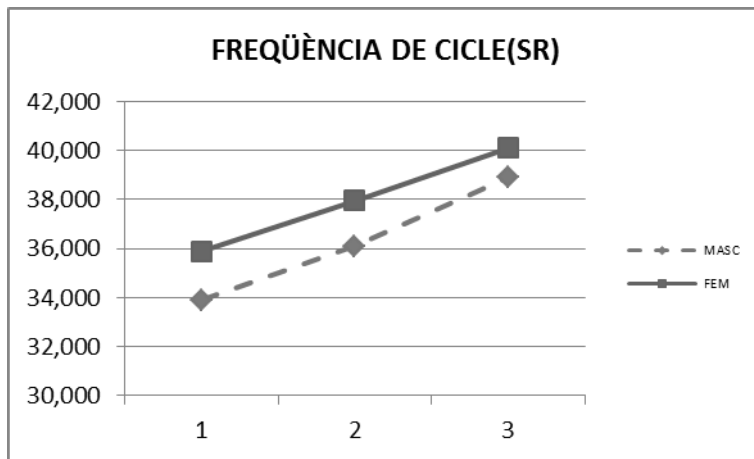
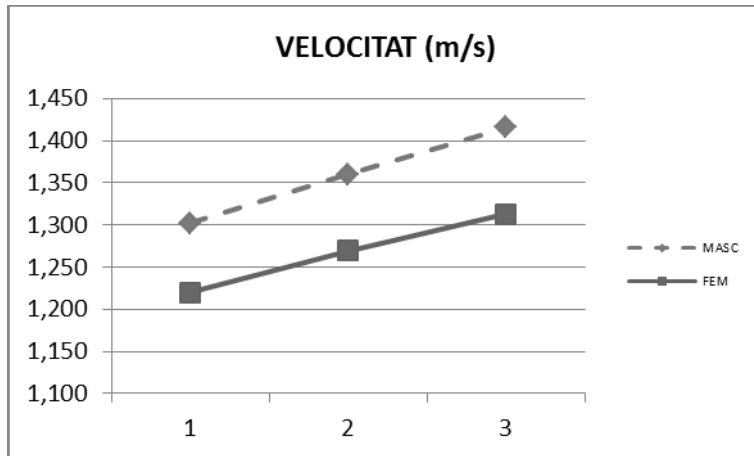
7.2.1 RESULTATS DELS PARÀMETRES CINEMÀTICS DEL CICLE

| | INT | MASC | FEM | MASC vs FEM |
|---|-----|-------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Vel prova (m/s) | 85% | 1,302 ± 0,056 | 1,220 ± 0,052 | ** |
| | 90% | 1,360 ± 0,053 ¹ | 1,270 ± 0,049 ¹ | ** |
| | 95% | 1,416 ± 0,060 ^{1,2} | 1,313 ± 0,052 ^{1,2} | ** |
| Freq. de cicle (SR) (cicles/min) | 85% | 33,908 ± 3,603 | 35,883 ± 1,805 | ** |
| | 90% | 36,110 ± 3,848 ¹ | 37,954 ± 2,076 ¹ | ** |
| | 95% | 38,890 ± 4,059 ^{1,2} | 40,097 ± 2,621 ^{1,2} | ** |
| Long. de cicle (SL) (m/cicle) | 85% | 2,310 ± 0,243 | 2,044 ± 0,103 | ** |
| | 90% | 2,267 ± 0,233 ¹ | 2,010 ± 0,117 ¹ | ** |
| | 95% | 2,201 ± 0,204 ^{1,2} | 1,973 ± 0,138 ^{1,2} | ** |
| Índex de cicle (SI) | 85% | 3,008 ± 0,346 | 2,495 ± 0,198 | ** |
| | 90% | 3,083 ± 0,327 ¹ | 2,555 ± 0,212 ¹ | ** |
| | 95% | 3,118 ± 0,327 ^{1,2} | 2,594 ± 0,242 ^{1,2} | ** |

¹p<0,05 amb el 85%; ²p<0,05 amb el 90%

*p<0,05; **p<0,01; NS diferència no significativa

Taula 7.2. Valors de la mitjana i la SD en les variables de velocitat i de cicle (SR, SL, SI) en funció del gènere per a les tres intensitats, les seves diferències i comparativa entre gèneres per a cada variable i intensitat



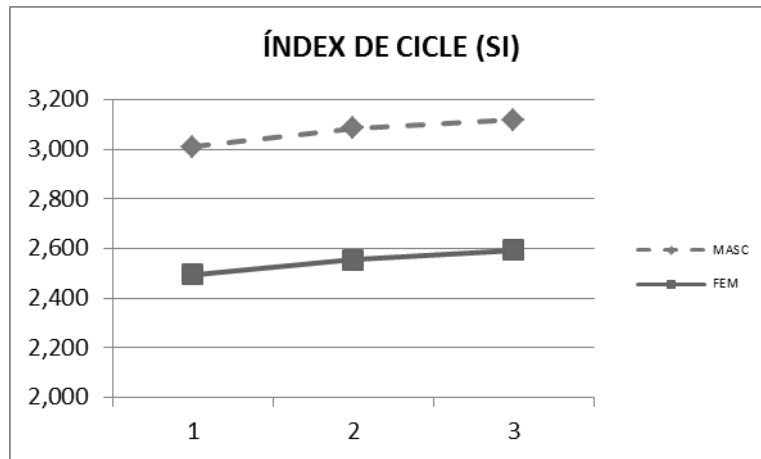


Fig. 7.2. Representació gràfica de les diferències en la velocitat i les variables de cicle (SR, SL, SI) en funció del gènere per a les tres intensitats

Pel que fa a la velocitat i les variables de cicle, es pot veure com tots els paràmetres presenten diferències significatives tant intragrup, és a dir, entre intensitats per gènere, com intergrup, és a dir, comparant els resultats de cada gènere per intensitat. Totes les variables presenten canvis progressius, augmentant o disminuint amb la intensitat, i els valors de les dones sempre són inferiors als dels homes en la longitud i índex de cicle i superiors, tot i que amb menors diferències relatives, en la freqüència de cicle.

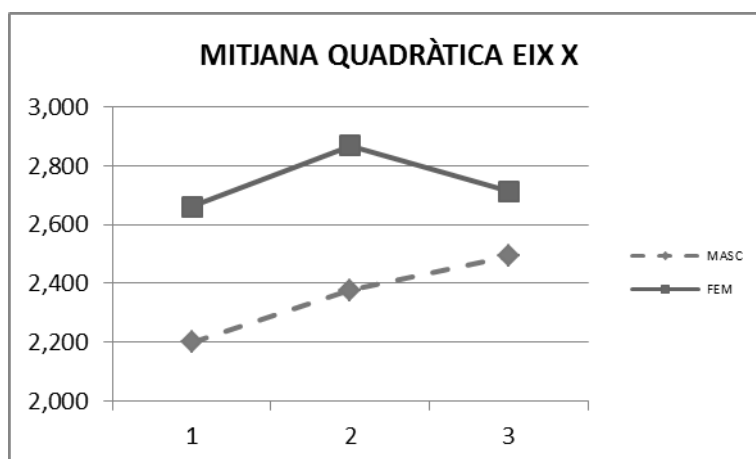
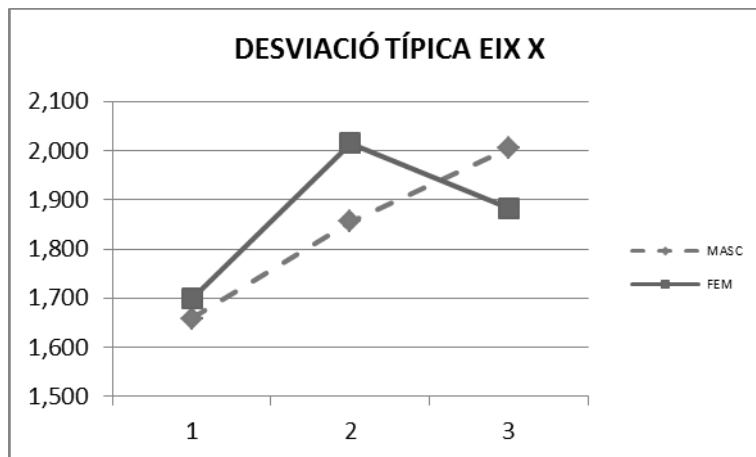
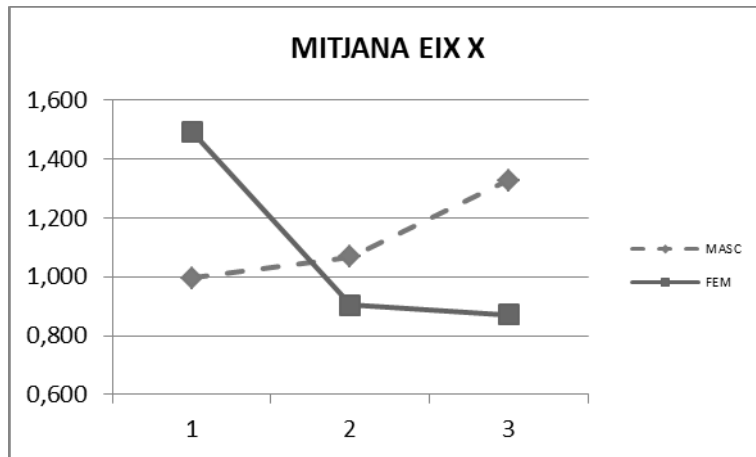
7.2.2 RESULTATS DELS PARÀMETRES D'ACCELERACIÓ EN L'EIX HORIZONTAL

| ACCELERACIÓ EIX X | INT | MASC | FEM | MASC vs FEM |
|---------------------------------|-----|------------------------------|------------------------------|-------------|
| Mitjana accel. (MED) | 85% | 0,994 ± 1,103 | 1,491 ± 1,305 | ** |
| | 90% | 1,068 ± 1,085 ¹ | 0,903 ± 1,778 | NS |
| | 95% | 1,326 ± 0,698 ^{1,2} | 0,871 ± 1,734 ^{1,2} | NS |
| Desv.tip. accel. (SD) | 85% | 1,658 ± 0,292 | 1,699 ± 0,728 | ** |
| | 90% | 1,856 ± 0,237 ¹ | 2,016 ± 0,686 ¹ | NS |
| | 95% | 2,005 ± 0,364 ^{1,2} | 1,883 ± 0,587 ² | ** |
| Mitjana quadràtica (RMS) | 85% | 2,200 ± 0,426 | 2,660 ± 0,495 | ** |
| | 90% | 2,377 ± 0,378 ¹ | 2,868 ± 0,487 ¹ | ** |
| | 95% | 2,492 ± 0,401 ^{1,2} | 2,712 ± 0,506 ² | ** |
| Accel. màxima (MAX) | 85% | 3,973 ± 1,298 | 4,865 ± 1,363 | ** |
| | 90% | 4,418 ± 1,127 ¹ | 5,031 ± 2,207 | * |
| | 95% | 5,078 ± 1,023 ^{1,2} | 4,620 ± 1,870 ² | NS |
| Accel. mínima (MIN) | 85% | -3,466 ± 1,421 | -2,188 ± 2,526 | ** |
| | 90% | -3,655 ± 1,246 ¹ | -3,521 ± 2,650 ¹ | NS |
| | 95% | -3,546 ± 1,178 | -3,289 ± 1,869 ¹ | * |
| Amplitud accel. (RANG) | 85% | 7,438 ± 1,662 | 7,053 ± 2,704 | ** |
| | 90% | 8,073 ± 1,407 ¹ | 8,552 ± 2,571 ¹ | NS |
| | 95% | 8,624 ± 1,543 ^{1,2} | 7,909 ± 2,092 ¹ | ** |

¹p<0.05 amb el 85%; ²p<0,05 amb el 90%

*p<0,05; **p<0,01; NS diferència no significativa

Taula 7.3. Valors de la mitjana i la SD en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "x" (horitzontal o antero-posterior), les seves diferències significatives i comparativa entre gèneres per a cada variable i intensitat



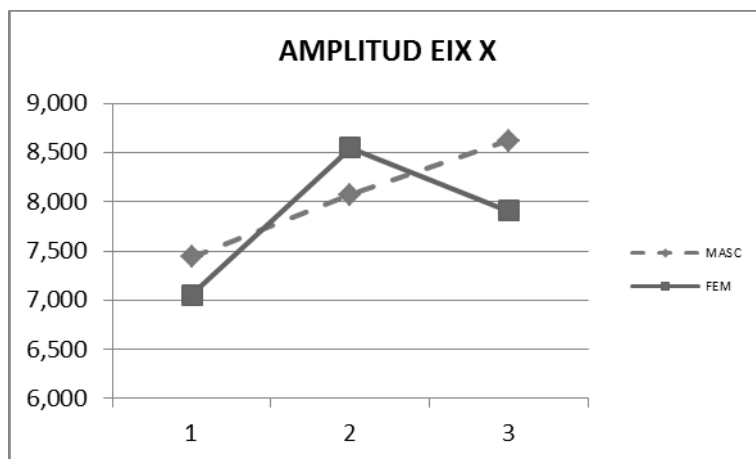
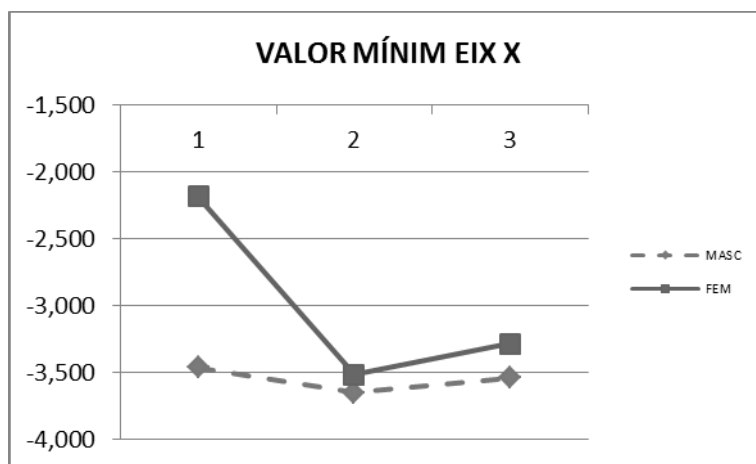
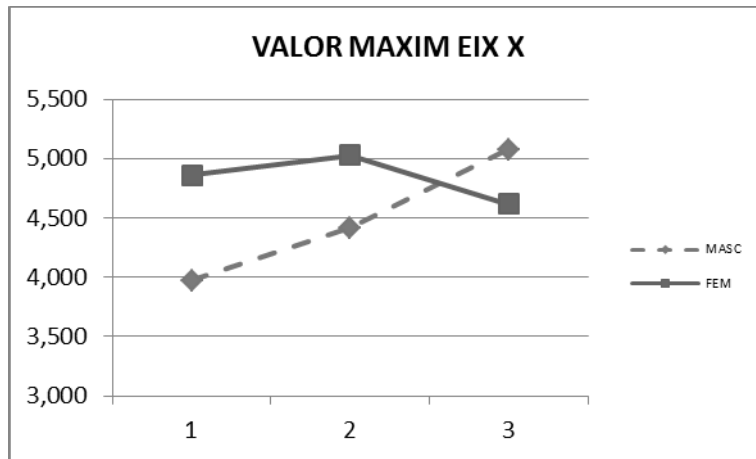


Fig. 7.3. Representació gràfica de la mitjana en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim i mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "x" (horitzontal o antero-posterior)

Pel que fa a l'anàlisi de les característiques dels patrons acceleratius en l'eix d'avanç, es pot veure com els homes presenten diferències significatives entre intensitats, tant entre les dues primeres (85%-90%) com amb la tercera (95%), amb valors progressius en totes les variables, excepte el mínim on només hi ha diferències amb la segona intensitat, que és la menor. En canvi, les dones presenten més variabilitat en els resultats, en molts casos la segona intensitat és la que presenta els valors més elevats, de manera que o només hi ha diferències significatives amb la primera prova (mitjana, valor mínim i amplitud) o a més el 95% presenta valors comparables amb el 85% (desviació típica, RMS i valor màxim). Un altre aspecte remarcable és que les desviacions típiques del gènere femení són molt superiors a les del masculí.

Pel que fa a la comparativa intergrups, podem observar com en la primera intensitat totes les variables tenen valors diferenciats en els dos gèneres, mentre que en la segona només la mitjana quadràtica i el màxim són significativament diferents i en la tercera la SD, la RMS, el mínim i l'amplitud.

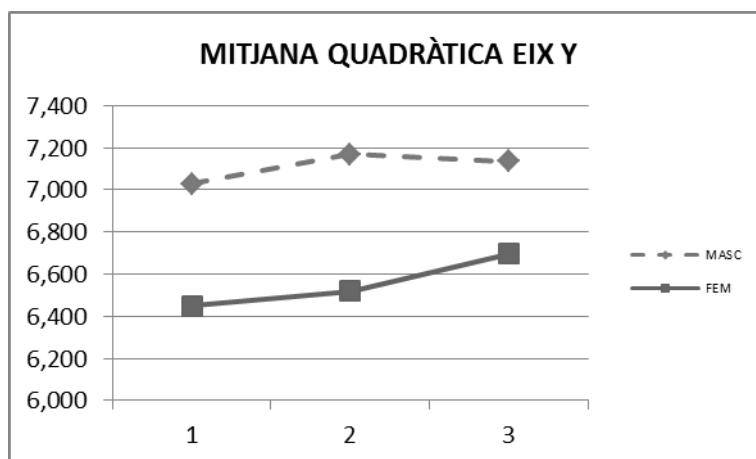
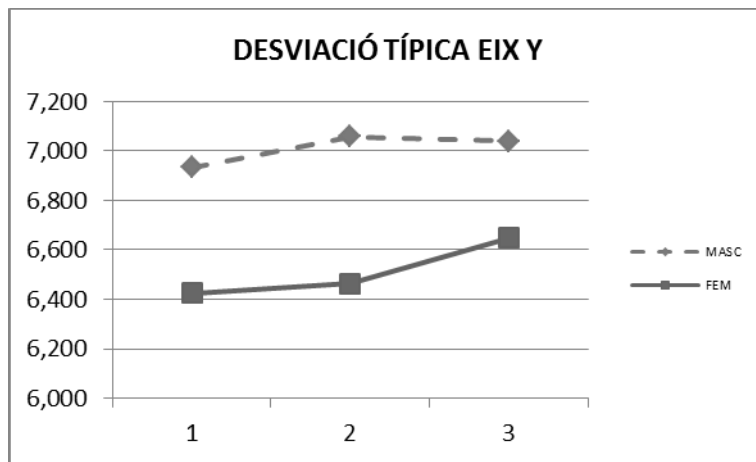
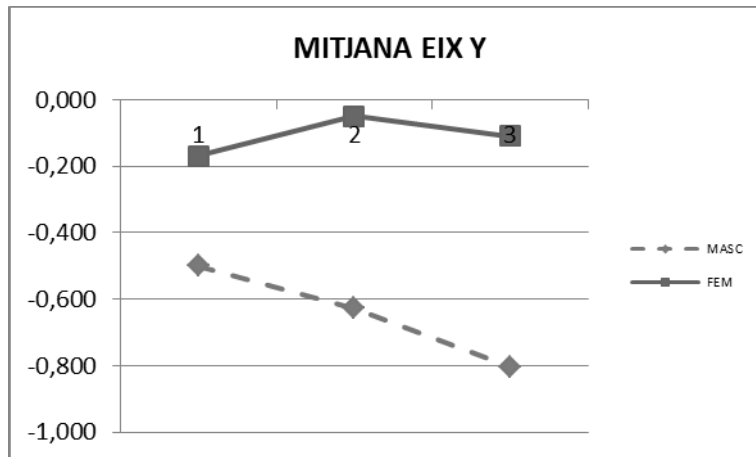
7.2.3 RESULTATS DELS PARÀMETRES D'ACCELERACIÓ EN L'EIX LATERAL

| ACCELERACIÓ EIX Y | INT | MASC | FEM | MASC vs FEM |
|---------------------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|-------------|
| Mitjana accel. (MED) | 85% | -0,499 ± 1,081 | -0,170 ± 0,594 | * |
| | 90% | -0,627 ± 1,146 ¹ | -0,049 ± 0,847 | ** |
| | 95% | -0,804 ± 0,950 ^{1,2} | -0,110 ± 0,844 | ** |
| Desv.tip. accel. (SD) | 85% | 6,934 ± 0,778 | 6,424 ± 0,838 | ** |
| | 90% | 7,058 ± 0,856 ¹ | 6,463 ± 1,020 | ** |
| | 95% | 7,039 ± 1,001 ¹ | 6,648 ± 1,018 ^{1,2} | * |
| Mitjana quadràtica (RMS) | 85% | 7,030 ± 0,727 | 6,449 ± 0,836 | ** |
| | 90% | 7,169 ± 0,786 ¹ | 6,519 ± 0,962 | ** |
| | 95% | 7,135 ± 0,956 ¹ | 6,697 ± 0,983 ^{1,2} | ** |
| Accel. màxima (MAX) | 85% | 11,113 ± 2,187 | 9,655 ± 2,193 | ** |
| | 90% | 11,100 ± 2,282 ¹ | 10,109 ± 2,122 ¹ | ** |
| | 95% | 11,014 ± 2,113 | 10,479 ± 2,334 ^{1,2} | NS |
| Accel. mínima (MIN) | 85% | -14,425 ± 3,752 | -12,521 ± 2,556 | ** |
| | 90% | -14,948 ± 4,081 ¹ | -12,660 ± 3,404 | ** |
| | 95% | -15,123 ± 3,837 ^{1,2} | -13,363 ± 3,711 ^{1,2} | ** |
| Amplitud accel. (RANG) | 85% | 25,538 ± 4,862 | 22,175 ± 4,028 | ** |
| | 90% | 26,047 ± 4,900 ¹ | 22,769 ± 4,979 ¹ | ** |
| | 95% | 26,137 ± 5,002 ^{1,2} | 23,842 ± 5,180 ^{1,2} | ** |

¹p<0.05 amb el 85%; ²p<0,05 amb el 90%

*p<0,05; **p<0,01; NS diferència no significativa

Taula 7.4. Valors de la mitjana i la SD en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "y" (medio-lateral), les seves diferències significatives i comparativa entre gèneres per a cada variable i intensitat



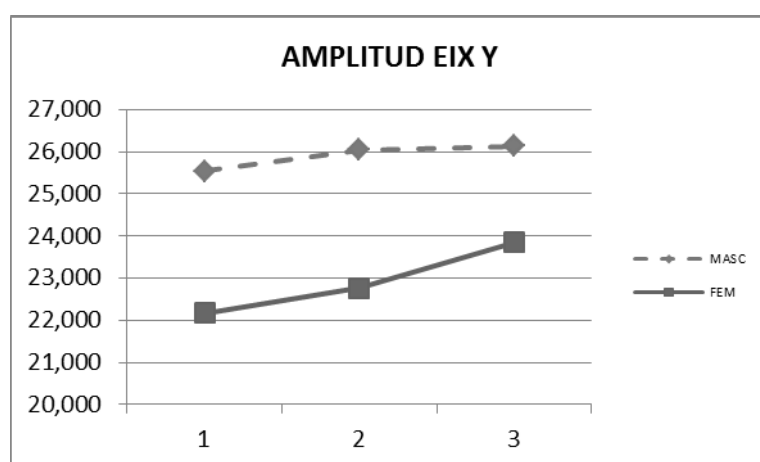
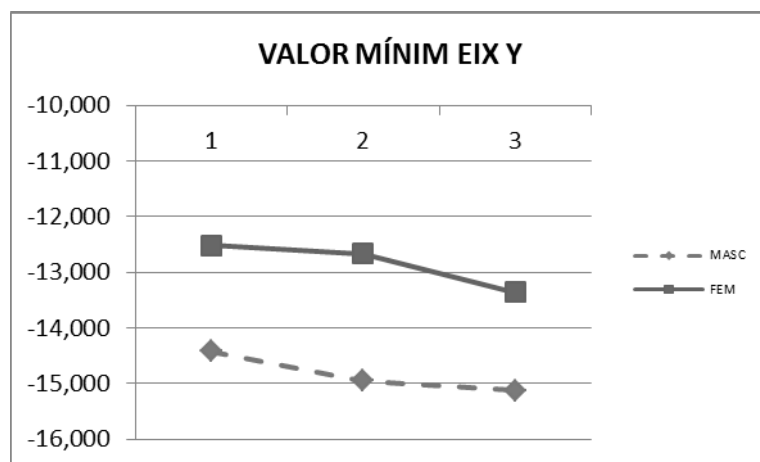
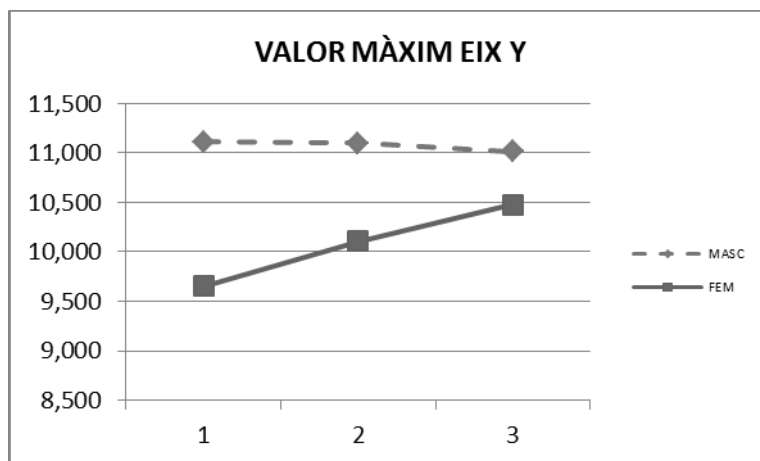


Fig. 7.4. Representació gràfica de la mitjana en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "y" (mediolateral)

Pel que fa als valors de l'acceleració en l'eix lateral, es pot veure que els resultats són clarament diferents entre ambdós grups en totes les intensitats (comparativa intergrup), excepte el màxim en el 95%. Els canvis entre intensitats per cada gènere (intragrup) són diferents en cada cas: mentre que els homes presenten diferències significatives entre totes les intensitats excepte per als valors màxims, la RMS i la desviació típica, en els quals només la prova del 85% és diferent; en les dones, només hi ha variacions significatives entre la primera i la segona intensitat en el valor màxim i l'amplitud; en la SD, la RMS i el mínim només trobem diferències entre aquestes dues intensitats i la tercera, i finalment la mitjana no es modifica significativament en cap cas.

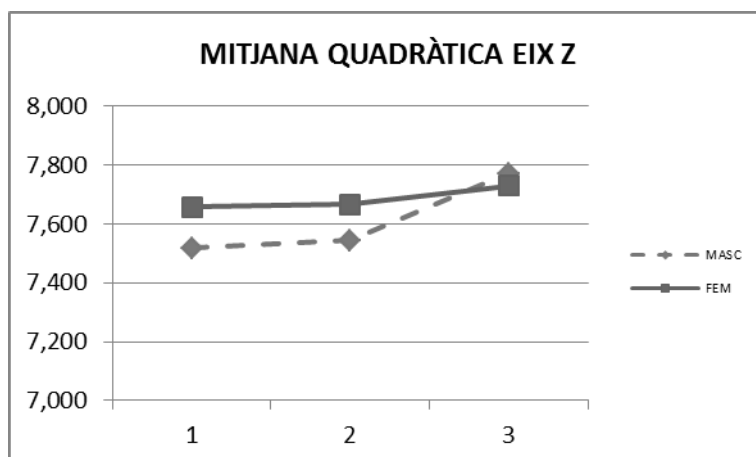
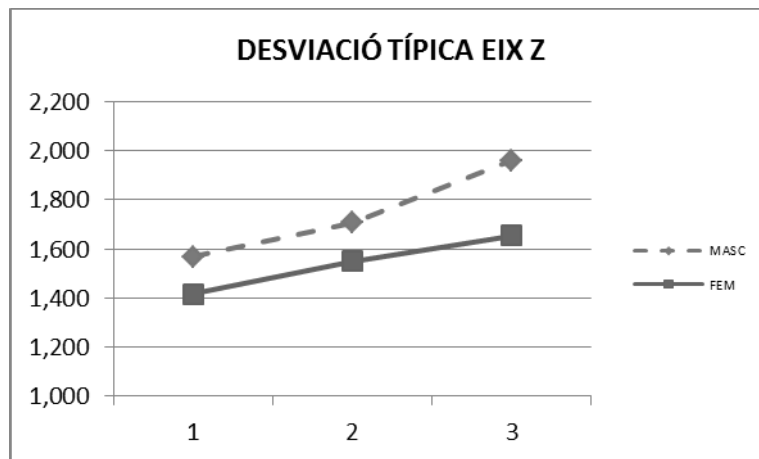
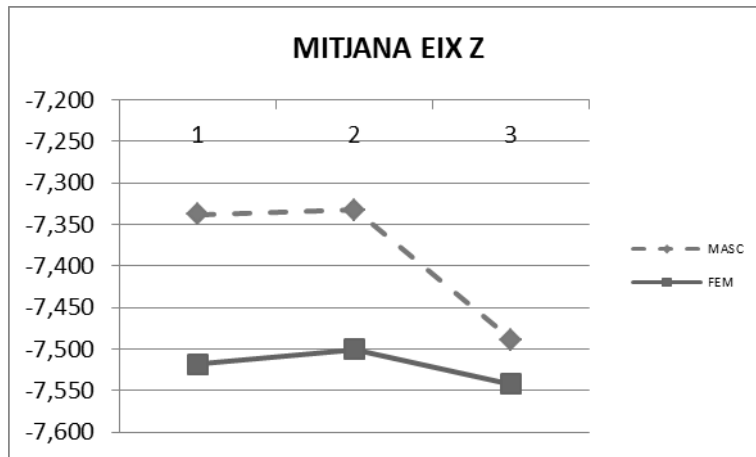
7.2.4 RESULTATS DELS PARÀMETRES D'ACCELERACIÓ EN L'EIX VERTICAL

| PARÀMETRES EIX Z | INT | MASC | FEM | MASC vs FEM |
|---------------------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|-------------|
| Mitjana accel. (MED) | 85% | -7,338 ± 0,584 | -7,518 ± 0,657 | * |
| | 90% | -7,333 ± 0,630 | -7,501 ± 0,715 | NS |
| | 95% | -7,489 ± 0,779 ^{1,2} | -7,542 ± 0,730 ² | NS |
| Desv.tip. accel. (SD) | 85% | 1,568 ± 0,408 | 1,418 ± 0,280 | ** |
| | 90% | 1,707 ± 0,371 ¹ | 1,549 ± 0,303 ¹ | ** |
| | 95% | 1,960 ± 0,538 ^{1,2} | 1,655 ± 0,334 ^{1,2} | ** |
| Mitjana quadràtica (RMS) | 85% | 7,518 ± 0,534 | 7,657 ± 0,652 | * |
| | 90% | 7,543 ± 0,565 | 7,666 ± 0,705 | NS |
| | 95% | 7,770 ± 0,649 ^{1,2} | 7,729 ± 0,720 ^{1,2} | NS |
| Accel. màxima (MAX) | 85% | -3,810 ± 1,410 | -4,061 ± 1,317 | NS |
| | 90% | -3,561 ± 1,542 ¹ | -3,647 ± 1,312 ¹ | NS |
| | 95% | -3,360 ± 2,039 ^{1,2} | -3,527 ± 1,595 ¹ | NS |
| Accel. mínima (MIN) | 85% | -10,569 ± 0,881 | -10,290 ± 0,865 | * |
| | 90% | -10,990 ± 0,795 ¹ | -10,395 ± 0,788 ¹ | ** |
| | 95% | -11,875 ± 0,937 ^{1,2} | -10,697 ± 1,032 ^{1,2} | ** |
| Amplitud accel. (RANG) | 85% | 6,760 ± 1,837 | 6,229 ± 1,498 | * |
| | 90% | 7,429 ± 1,791 ¹ | 6,748 ± 1,518 ¹ | ** |
| | 95% | 8,515 ± 2,613 ^{1,2} | 7,169 ± 1,732 ^{1,2} | ** |

¹p<0.05 amb el 85%; ²p<0,05 amb el 90%

*p<0,05; **p<0,01; NS diferència no significativa

Taula 7.5. Valors de la mitjana i la SD en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "z" (vertical o supero-inferior), les seves diferències significatives i comparativa entre gèneres per a cada variable i intensitat



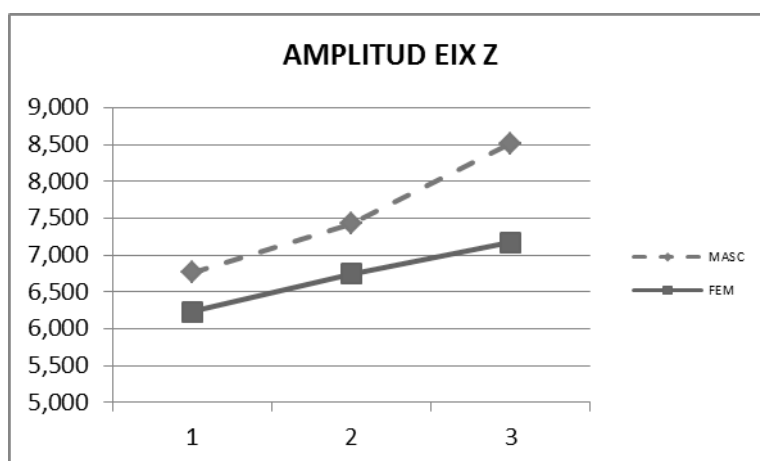
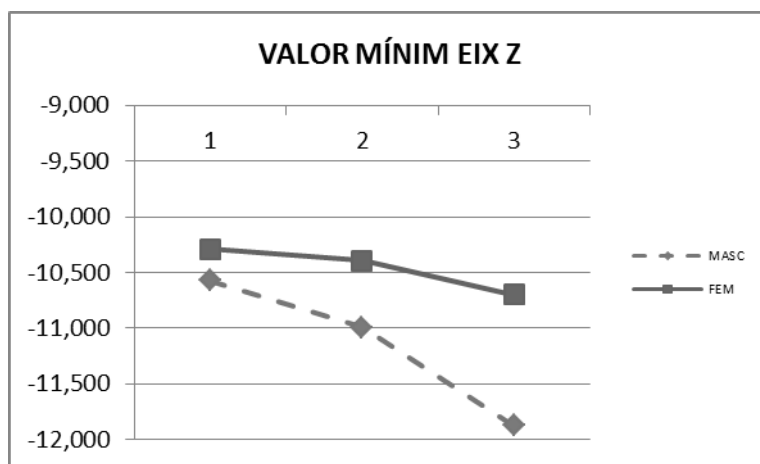
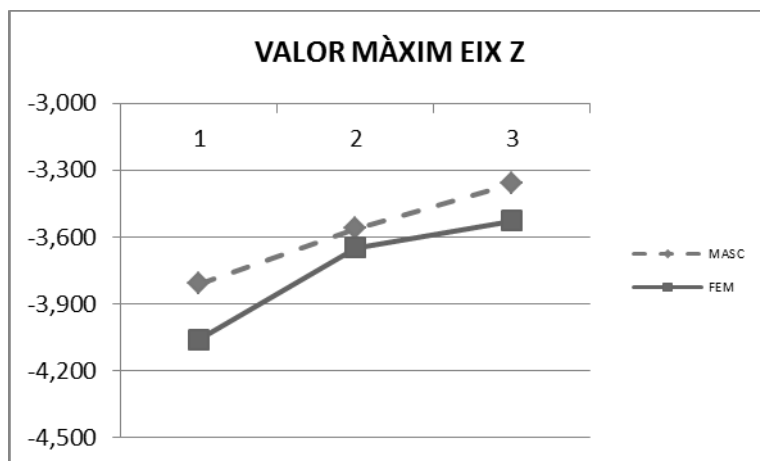


Fig. 7.5. Representació gràfica de la mitjana en les variables d'acceleració (mitjana, desviació típica, RMS, màxim, mínim i amplitud) en funció del gènere per a les tres intensitats en la direcció "z" (vertical o supero-inferior)

Analitzant els resultats de les variables descriptives de l'acceleració en la direcció "z" o vertical, es pot veure que tant els homes com les dones presenten diferències significatives entre les tres intensitats en gairebé tots els paràmetres, excepte en els valors de la mitjana per ambdós sexes i la RMS dels homes, que només el 95% és significativament major que els altres dos, i el valor màxim de les dones, on el 85% és clarament inferior.

Les diferències significatives entre ambdós grups són clares en la desviació típica, el valor mínim i l'amplitud; la mitjana i la RMS només presenta valors diferenciats en la prova del 85%, i les dades màximes no són significativament diferents en cap cas.

7.3 ANÀLISI FREQUÈNCIAL DE LA SENYAL ACCELERATIVA

Tal i com s'ha dit anteriorment, es va fer un segon anàlisi de la senyal accelerativa en l'eix horitzontal, que és el més important en la contribució a l'avanç del cos, en el qual es valorava la distribució de totes les dades agrupades en diferents intervals. Concretament, es van fer els següents grups (unitats expressades en m/s^2): <-3,6; <-2,4; <-1,2; <0; <1,2; <2,4; <3,6; <4,8; <6; >6. Els resultats descriptius (mitjana i desviació típica) en funció del gènere es presenten en la taula 7.6, i a continuació els gràfics dels polígons de freqüències resultants (fig. 7.6).

| | MASC | | | FEM | | |
|--------|---------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | 85% | 90% | 95% | 85% | 90% | 95% |
| < 3,6 | 0,015 ± 0,021 | 0,022 ± 0,034 | 0,017 ± 0,024 | 0,036 ± 0,105 | 0,063 ± 0,086 | 0,073 ± 0,123 |
| < -2,4 | 0,039 ± 0,070 | 0,044 ± 0,066 | 0,033 ± 0,024 | 0,034 ± 0,060 | 0,066 ± 0,072 | 0,060 ± 0,071 |
| < -1,2 | 0,080 ± 0,087 | 0,075 ± 0,062 | 0,062 ± 0,025 | 0,058 ± 0,092 | 0,100 ± 0,101 | 0,087 ± 0,094 |
| < 0 | 0,119 ± 0,066 | 0,123 ± 0,041 | 0,116 ± 0,038 | 0,058 ± 0,034 | 0,114 ± 0,097 | 0,108 ± 0,089 |
| < 1,2 | 0,205 ± 0,095 | 0,160 ± 0,054 | 0,168 ± 0,059 | 0,166 ± 0,080 | 0,140 ± 0,054 | 0,158 ± 0,053 |
| < 2,4 | 0,237 ± 0,093 | 0,216 ± 0,085 | 0,220 ± 0,075 | 0,268 ± 0,115 | 0,203 ± 0,112 | 0,185 ± 0,129 |
| < 3,6 | 0,196 ± 0,099 | 0,233 ± 0,113 | 0,216 ± 0,059 | 0,230 ± 0,120 | 0,159 ± 0,140 | 0,188 ± 0,129 |
| < 4,8 | 0,099 ± 0,063 | 0,107 ± 0,072 | 0,116 ± 0,066 | 0,119 ± 0,073 | 0,100 ± 0,087 | 0,100 ± 0,083 |
| < 6 | 0,009 ± 0,010 | 0,019 ± 0,019 | 0,045 ± 0,046 ¹ | 0,021 ± 0,026 | 0,041 ± 0,034 | 0,033 ± 0,038 |
| > 6 | 0,000 ± 0,001 | 0,001 ± 0,002 | 0,007 ± 0,010 ¹ | 0,009 ± 0,026 | 0,016 ± 0,043 | 0,007 ± 0,014 |

¹diferent al 85%; ²diferent al 90%; *diferent masculí-femení

Taula 7.6. Mitjana i SD dels valors d'acceleració en l'eix d'avanç en cada interval per a cada intensitat en funció del gènere i diferències significatives ($p < 0,05$) amb les intensitats anteriors i amb l'altre gènere

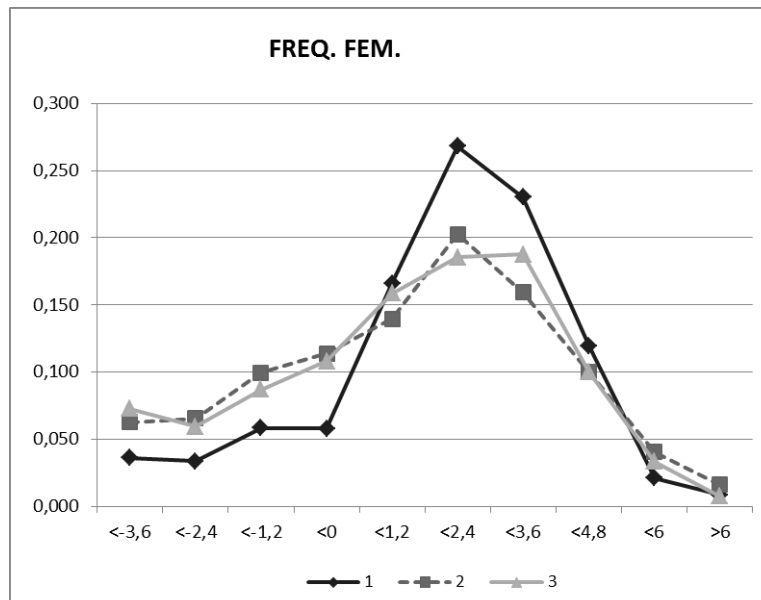
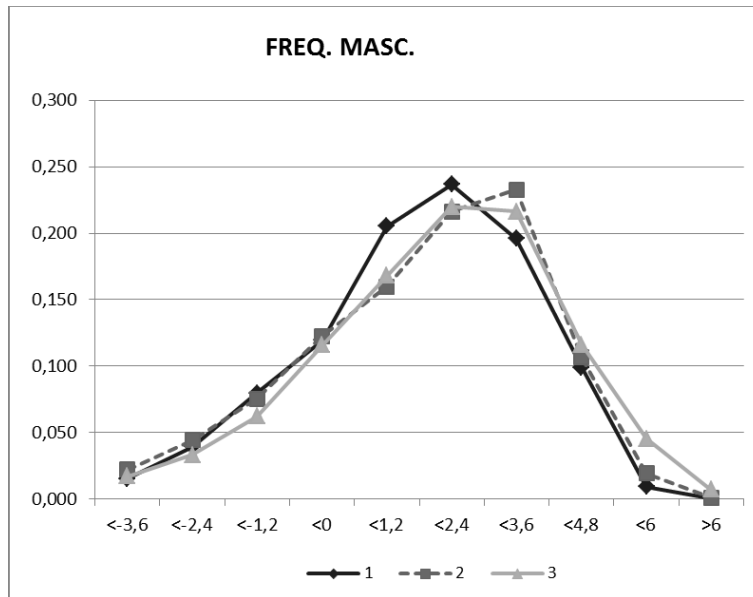


Fig. 7.6. Polígon de freqüències de les dades acceleratives en les tres intensitats per a cada gènere

Com es pot comprovar, excepte en els dos darrers intervals del gènere masculí, on la tercera intensitat presenta diferències significatives respecte a la primera, la resta de dades no presenta diferències significatives amb els canvis de ritme dins del mateix grup. Igualment, pel que fa a les diferències intergrup, tampoc hi ha cap diferència en la mateixa intensitat entre ambdós gèneres.

7.4 ANÀLISI RELACIONAL DELS DIFERENTS PARÀMETRES AMB LA VELOCITAT

Finalment, per a determinar la relació entre els diferents paràmetres i la velocitat de nedo, a continuació es presenten les correlacions entre: la velocitat en cada intensitat o prova amb el resultat de cada variable (valoració de la relació en funció del rendiment, ja que es valora la velocitat absoluta) i una correlació global de les dades de velocitat de les 3 intensitats conjuntes amb els resultats corresponents de cada variable, per a determinar quines variables presenten canvis significatius amb l'augment de ritme o intensitat (taula 7.7).

| | MASC | | | | FEM | | | |
|--------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 85% | 90% | 95% | 3 int | 85% | 90% | 95% | 3 int |
| SR | 0,471* | 0,526 ** | 0,488** | 0,608** | 0,517** | 0,284** | 0,167 | 0,522** |
| SL | 0,054 | -0,033 | 0,081 | -0,146** | 0,223* | 0,328** | 0,312** | 0,135* |
| SI | 0,343* | 0,378 ** | 0,404** | 0,367** | 0,628** | 0,691** | 0,600** | 0,680** |
| MEDx | 0,423* | 0,306** | 0,364** | 0,361** | -0,272** | -0,461** | -0,352** | -0,375** |
| SDx | 0,530* | 0,511** | 0,559** | 0,595** | 0,013 | 0,208* | 0,008 | 0,396** |
| RMSx | 0,548** | 0,546** | 0,613** | 0,644** | 0,008 | -0,082 | -0,129 | 0,079 |
| MAXx | 0,547* | 0,457** | 0,545** | 0,602** | -0,573** | -0,573** | -0,374** | -0,302** |
| MINx | 0,045 | -0,012 | -0,036 | -0,020 | -0,327** | -0,491** | -0,403** | -0,555** |
| RANG | 0,472* | 0,408** | 0,456** | 0,491** | 0,207* | 0,16 | -0,133 | 0,343** |
| MEDy | -0,109 | -0,118 | -0,317** | -0,210** | 0,104 | 0,415** | 0,348** | 0,319** |
| SDy | -0,027 | -0,244** | -0,123 | -0,066 | 0,094 | 0,143 | 0,152 | 0,211** |
| RMSy | -0,020 | -0,201* | -0,083 | -0,048 | 0,101 | 0,143 | 0,156 | 0,221** |
| MAXy | 0,390* | 0,126 | 0,087 | 0,113* | 0,218* | 0,365** | 0,228* | 0,373** |
| MINy | -0,507* | -0,345** | -0,313** | -0,362** | -0,046 | 0,111 | 0,255* | -0,002 |
| RANGy | 0,509* | 0,289** | 0,283** | 0,326** | 0,091 | 0,052 | -0,152 | 0,134* |
| MEDz | -0,092 | -0,301** | -0,165 | -0,238** | -0,013 | 0,052 | 0,074 | 0,072 |
| SDz | 0,374* | 0,297** | 0,215* | 0,466** | 0,676** | 0,418** | 0,457** | 0,579** |
| RMSz | 0,153 | 0,342** | 0,189* | 0,327** | 0,115 | -0,003 | -0,027 | -0,002 |
| MAXz | 0,165 | -0,003 | 0,06 | 0,092 | 0,487** | 0,305** | 0,425** | 0,461** |
| MINz | -0,517* | -0,605** | -0,469** | -0,674** | -0,366** | -0,23* | -0,063 | -0,225** |
| RANGz | 0,313* | 0,264** | 0,219* | 0,408** | 0,653** | 0,414** | 0,457** | 0,562** |

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

Taula 7.7. Correlacions dels diferents paràmetres amb la velocitat en cadascuna de les tres intensitats (85%, 90% i 95%) i per al global de les tres, marcant les que presenten una correlació significativa

La correlació entre la velocitat i les variables cinemàtiques de cicle és significativa i en molts casos elevada en la freqüència (SR) i en l'índex de cicle (SI) en homes i dones per a totes les intensitats i en el global de les tres, tot i que el SI masculí presenta relacions mitges en tots els casos. En el cas de la longitud de cicle (SL), només les dones presenten una correlació significativa mitja en tots els casos, els homes només en el global.

Pel que fa als canvis en els valors en la direcció d'avanç (eix "x"), en el gènere masculí tots els paràmetres menys el mínim presenten correlacions significatives: la mitjana, la RMS i el màxim presenten relacions elevades en les tres intensitats i el global, mentre que la SD i la amplitud té valors de relació mitjans. En el gènere femení, la SD, el màxim i el mínim presenten significacions mitjanes en els 4 casos (85%, 90%, 95% i global), així com el global de la RMS i l'amplitud, mentre que en la resta no hi ha cap diferència significativa ($p > 0,05$).

L'eix que presenta més variabilitat és el "y" (medio-lateral), ja que no hi ha cap correlació significativa elevada. En els homes només el valor mínim i l'amplitud tenen una correlació mitjanament significativa en totes les intensitats i en el global; en la resta de paràmetres (mitjana, SD, RMS i màxim), només una de les intensitats presenta relacions mitjanes i el global en la mitjana i el màxim. Pel que fa a les dones, només trobem significacions mitges en la mitjana i el valor màxim, en 2 o 3 intensitats respectivament i en el global; en el mínim només en el 95%, i en la desviació típica, la RMS i l'amplitud només en el global de les tres.

Finalment, en la direcció vertical (eix "z"), veiem correlacions significatives elevades per a totes les intensitats i el global en el mínim pel gènere masculí i la SD i l'amplitud en el gènere femení; correlacions mitjanes en els homes en la SD, la RMS i l'amplitud per a tots els casos i en el 90% i el global de la mitjana, i per a les dones totes les variables del màxim. Finalment, la mitjana i la RMS de les dones no presenten relacions significatives en cap cas.

8. DISCUSSIÓ

8.1 ANÀLISI QUALITATIVA DELS PATRONS ACCELERATIUS

Observant els gràfics generats per les dades d'acceleració dels dos nedadors que s'han presentat anteriorment en l'apartat 7.1 dels resultats (fig. 7.1), podem confirmar que, tal i com s'ha determinat en altres estudis (James, Burkett et al. 2011; Le Sage, Bindel et al. 2011), hi ha uns patrons bàsics específics per a aquest estil de nedo, amb uns màxims i mínims diferents per a cada eix, determinats per les diferents fases del cicle i la coordinació específica de tots els moviments del cos; i també que es pot distingir a cada nedador gràficament, ja que cadascun presenta un patró individual d'acceleració en funció de les seves adaptacions i tècnica pròpies (Slawson, Justham et al. 2008), que es manté amb lleugeres modificacions tot i augmentar la intensitat de nedo.

A grans trets podem veure com, en tots dos casos, l'eix lateral (color gris) té unes fluctuacions molt marcades en els dos sentits (amplitud d'uns 25 a 30 m/s²), per l'acció de balanceig o "rolido" del cos; l'eix vertical (color negre) presenta menys variacions extremes i no s'aprecia una ciclicitat tan marcada (corbes i pics), presentant els dos nedadors perfils força diferents i pocs canvis entre intensitats; i finalment l'eix horitzontal (color blanc), amb un rang de senyal més variable en funció de la intensitat, presenta força paral·lelismes amb la corba lateral, amb una frenada per cada pic d'aquest eix, indicant que aquests desplaçaments laterals són un fre en l'avanç, sobretot en un dels costats, el de la respiració, on la desacceleració sempre és major, i definint enmig l'acció propulsiva de cadascun dels braços, de manera que es poden apreciar les diferències entre ambdós, tant pel que fa a la durada com en l'acceleració assolida.

Amb els canvis d'intensitat, generalment augmenten les oscil·lacions de les corbes, començant amb una corba força suavitzada i apareixent petits pics dins del mateix patró a mesura que s'augmenta la velocitat de nedo, indicant que es perd la capacitat de lliscament o manteniment de la inèrcia, per un augment de la resistència frontal, canvis en la coordinació o aplicacions de la força no tan progressives, de manera que

apareixen moltes més desacceleracions que cal contrarestar amb petites aplicacions de força per a poder tornar a accelerar el cos i mantenir la velocitat de nedo. L'eix horitzontal és el que presenta més diferències en aquesta aspecte, ja que les característiques antropomètriques, fisiològiques i biomecàniques pròpies de cada nedador individualitzen molt els perfils, però sobretot les capacitats adaptatives, de manera que en alguns casos una velocitat més elevada pot presentar menors fluctuacions o amplitud si les adaptacions faciliten la interacció amb el medi i la continuïtat de les accions propulsives.

Si analitzem les diferències entre els dos nedadors, podem veure com en l'eix lateral el nedador de l'esquerra presenta uns pics màxims i mínims molt més marcats, indicant que realitza desplaçaments laterals força bruscs, com a resultant d'una força en sentit medial de considerable magnitud aplicada per la mà, que es transmet al tronc, desviant-lo en sentit contrari. Aquest fet pot causar un augment de l'esforç per dos motius: a més de la possible pèrdua d'una bona posició hidrodinàmica, que augmenta la resistència de forma, per a poder contrarestar una acceleració considerable en una direcció cal fer una força important per a trencar la inèrcia en aquella direcció i poder començar el desplaçament cap a una altra.

En l'eix vertical, el nedador de l'esquerra presenta valors inferiors, tant mínims com màxims, el que pot ser un possible indicatiu de que té més dificultats per a mantenir la horitzontalitat del cos, per una menor flotabilitat, i per tant presenta major nombre d'oscil·lacions per a poder compensar aquest factor, mentre que el nedador de la dreta, presenta unes corbes més suavitzades, més sincronitzades amb les altres dues, indicant que els canvis són el resultat de l'aplicació de forces de la mà en cada acció propulsiva. Finalment, l'eix horitzontal presenta les principals diferències en la mitjana, ja que podem veure que en el nedador de l'esquerra els valors són majoritàriament positius, mentre que en el de la dreta, la majoria estan per sota de zero, i en l'amplitud, ja que el nedador de l'esquerra presenta valors mínims i màxims molt més separats, indicant fluctuacions majors i per tant una menor economia.

Pel que fa als canvis dins del mateix eix, es pot veure com clarament cada vegada duren menys els cicles, confirmant l'augment de la freqüència amb una major velocitat de nedo, i generalment no s'observen canvis importants en l'amplitud en les tres intensitats, excepte en l'eix d'avanç, que com ja s'ha dit anteriorment és el que presenta més canvis. En aquest cas, els dos nedadors presenten adaptacions força diferents: mentre que el nedador de l'esquerra augmenta les oscil·lacions amb l'augment de la velocitat de desplaçament, tant en la part mitja de la corba com amb un augment dels màxims i mínims, el nedador de la dreta fa el contrari, és a dir, cada vegada mostra una corba més uniforme, i tot i que els valors màxims són menors, els mínims també, de manera que està millorant força l'eficiència gràcies a la minimització de les forces de resistència i a la major continuïtat de les forces generades.

Aquest anàlisi gràfic o qualitatiu ens permet comparar fàcilment als nedadors i poder apreciar les adaptacions que cadascun presenta individualment en diferents situacions directament amb les dades generades per l'aparell (sense cap tractament estadístic) i poder fer un seguiment de la seva evolució tècnica (controls a mig i llarg plaç). Si a més, es poguessin obtenir aquestes dades telemètricament, veient-les en una pantalla directament com permeten alguns acceleròmetres de major nivell i cost, durant la sessió l'entrenador podria apreciar al moment i de manera senzilla els canvis en la generació de forces propulsives, de manera que en acabar la tasca podria donar una indicació al nedador per a fer les correccions pertinents al moment.

De totes maneres, per a poder valorar adequadament els patrons i determinar exactament els canvis, cal fer un anàlisi quantitatiu o estadístic com el que es presenta a continuació. Amb aquestes dades descriptives dels patrons acceleratius i les variables cinemàtiques del cicle, es poden definir els paràmetres considerats habituals en aquest tipus de nedadors i els seus canvis, de manera que puguin servir de referència per a establir una base de coneixement d'aquest aspecte del rendiment i poder realitzar posteriors estudis comparatius.

8.2 ANÀLISI DE LES VARIABLES CINEMÀTIQUES DEL CICLE

Pel que fa al valors obtinguts d'aquestes variables en l'estudi, podem comprovar que s'assemblen amb les obtingudes en un altre estudi que també va analitzar a aquest tipus de nedadors i en aquestes intensitats (Zamparo, Bonifazi et al. 2005), tot i que en el nostre cas, els valors de les freqüències de cicle (SR) serien inferiors i les longituds de cicle (SL) superiors (taula 8.1) a velocitats semblants, fet que podríem justificar perquè en el nostre cas es van valorar nedadors de categories junior i sènior d'aigües obertes, mentre que en l'altre estudi només es van valorar nedadors de l'equip absolut, i a més en el nostre cas hi havia el doble de nedadors per grup, fet que podria ampliar la dispersió de les dades, com es pot apreciar amb una desviació típica molt més elevada, sobretot en el cas dels nois.

| | | Zamparo (2005) $n_{MASC} = 5 ; n_{FEM} = 5$ | | Dades tesi $n_{MASC} = 12 ; n_{FEM} = 9$ | |
|------|------------|--|-----------------|---|------------------|
| MASC | Vel (m/s) | $1,35 \pm 0,03$ | $1,42 \pm 0,02$ | $1,36 \pm 0,05$ | $1,41 \pm 0,06$ |
| | SR (c/min) | $37,6 \pm 1,4$ | $39,9 \pm 1,4$ | $36,11 \pm 3,84$ | $38,89 \pm 4,06$ |
| | SL (m/c) | $2,15 \pm 0,08$ | $2,12 \pm 0,08$ | $2,26 \pm 0,23$ | $2,20 \pm 0,20$ |
| FEM | Vel (m/s) | $1,29 \pm 0,03$ | $1,34 \pm 0,02$ | $1,27 \pm 0,05$ | $1,31 \pm 0,05$ |
| | SR (c/min) | $41,1 \pm 1,9$ | $43,5 \pm 2,2$ | $37,95 \pm 2,07$ | $40,09 \pm 2,62$ |
| | SL (m/c) | $1,88 \pm 0,08$ | $1,84 \pm 0,08$ | $2,01 \pm 0,11$ | $1,97 \pm 0,14$ |

Taula 8.1. Comparativa entre les dades de l'estudi de Zamparo (2005) i les obtingudes en el present estudi

Pel que fa a les diferències entre gèneres, aquestes són clarament significatives, amb valors inferiors de SL i SI i majors de SR per a les dones, seguint amb les conclusions establertes en altres d'estudis (Seifert, Boulesteix et al. 2004; Zamparo 2006).

Respecte a la relació amb la velocitat en les tres proves combinades (global), generalment en la literatura els resultats mostren tendències contradictòries en diferents estudis que s'han realitzat a majors intensitats (Craig and Pendergast 1979; Arellano, Brown et al. 1994; Sanchez and Arellano 2002). En aquest estudi, trobem correlacions positives significatives amb la velocitat en la SR i el SI, tot i que no sempre

amb valors de *rho* elevats, i en la SL la relació és força baixa ($\rho < 0,15$) en els dos gèneres i contrària, ja que en les noies és positiva i en els nois negativa. Aquesta elevada variabilitat de resultats, Madera Gil (2012), citant a Pai, Hay & Wilson (1984), ho atribueix a que no hi ha una relació òptima general per a tots els nedadors, ja que cadascun presenta una adaptació individualitzada de la SR i la SL per a poder assolir una millor velocitat de nedo. En base a tot el que s'ha exposat anteriorment, a més, es proposa la idea de que en ser un estil més lliure, no tan definit tècnicament com la resta, pot presentar una major variabilitat tècnica i coordinativa entre subjectes que limiten l'obtenció de diferències significatives.

En canvi, si analitzem les correlacions dins de cada ritme relatiu, podem veure com si bé en les noies totes les variables correlacionen amb el rendiment (*rho* mitjos i alts), en els nois la SL no té correlacions significatives, de manera que podem dir que en aquest tipus de nedadors la distància per braçada no és un aspecte clau per al rendiment, i que per tant la SR adquireix més importància. Aquest fet es correspon amb les conclusions de l'estudi de Craig, Skehan et al. (1985), que va trobar que l'augment d'intensitat en intensitats submàximes es feia principalment a través de l'augment de la SR, mentre que en intensitats superiors, hi havia una combinació entre l'augment de la SR i la disminució de la SL.

En el nostre cas, una possible explicació d'aquest factor podríem trobar-la en les particularitats que presenten les proves d'aigües obertes, en les quals molta part de la mateixa es fa darrere d'altres nedadors, el que es coneix generalment com nedar a "drafting", de manera que cal fer un menor esforç per a mantenir la velocitat de nedo ja que la resistència frontal o *drag* disminueix molt i la possibilitat d'impulsar-se en aigües remogudes és inferior. Chollet, Hue et al. (2000b) van determinar que en aquests casos augmenta la SL (m/cicle) respecte a la condició de nedo normal ($2,13 \pm 0,06$ drafting i $2,03 \pm 0,06$ lliure), però es manté la SR (cicles/min) ($38,9 \pm 0,7$ drafting i $40,0 \pm 1,1$ lliure, $p > 0,05$), podent pensar que el factor important en la regulació de la intensitat és aquest darrer paràmetre i que l'altre és més variable i depèn més de les habilitats tècniques del nedador.

Per una altra banda, si es depengués més de la SL per a l'augment de velocitat, caldria una major aplicació de força, que podria representar un augment de la fatiga

muscular, que es podria derivar en una pèrdua d'eficiència i per tant l'augment de la despesa energètica, podent ser un factor que disminueixi el rendiment prematurament. Les noies, com que generalment ja presenten menors SL (per factors antropomètrics i fisiològics) i les seves variacions de velocitat i rendiment ja depenen més de la SR, presenten correlacions significatives amb el rendiment.

8.3 ANÀLISI DE LES VARIACIONS DEL PATRONS ACCELERATIUS

Les acceleracions del cos durant el nedo, tal i com s'ha dit anteriorment, són el resultat de la interacció entre les forces que actuen en el nedador, concretament la força propulsiva generada per les accions dels diferents segments corporals del nedador i la resistència o forces de frenada que cal vèncer per a poder avançar en el medi aquàtic, traduint-se en la velocitat d'avanç assolida (Ungerechts 1988).

A causa de les grans variacions que presenten aquestes forces, pel nombre important de factors que les condicionen, les fluctuacions d'aquest registre acceleratiu són considerables. La minimització d'aquestes variacions ens indica que hi ha un bon balanç entre aquestes les dues forces oposades, de manera que es facilita el manteniment de la inèrcia adquirida (poca desacceleració). Vist des d'un altre punt de vista, si hi ha un bon "*timing*" o coordinació de les forces aplicades i les que actuen en el cos del nedador, conjuntament amb una sincronització de la resta dels moviments del cos per a adaptar-se a les condicions del medi (posició hidrodinàmica i tècnica de braçada), les IAV es reduiran molt, disminuint la despesa energètica i millorant l'eficiència propulsiva, ja que les forces de resistència de l'aigua són menors (Vilas-Boas 1996) i també es reduirà la força necessària per a mantenir la velocitat d'avanç. Per tant, en el cas de la natació no es pot associar els registres d'acceleració amb la força aplicada pel nedador o una acció motriu específica, sinó que és la interacció totes les accions en el temps i el comportament del medi el que defineix l'acceleració resultant, de manera que cal interpretar totes les dades obtingudes com una resultant multifactorial, i que la millora en els resultats serà indicatiu d'una bona adaptació tècnica global.

Per una altra banda, el caràcter tridimensional del desplaçament dels segments del nedador fa que monitoritzar els tres eixos de manera separada sigui molt més indicat per tal de poder saber realment en quina direcció es produeix l'acceleració del cos en cada moment i poder determinar com està contribuint cada component en la millora propulsiva i la seva relació amb el rendiment o velocitat assolida. Actualment en la literatura només hi ha un estudi que hagi quantificat aquestes components separatament (Tella, Madera et al. 2010), i s'ha realitzat amb un protocol molt diferent al d'aquest estudi (velocitats màximes), de manera que no es disposen de valors de referència adequats per a fer una comparació de les dades obtingudes. Per tant, la discussió es basarà principalment en determinar com es modifica cada paràmetre amb la intensitat, el gènere i la velocitat i buscar una possible justificació.

8.3.1 ANÀLISI DE LES VARIACIONS D'ACCELERACIÓ EN L'EIX HORIZONTAL

Dels tres eixos, el més important és l'horitzontal, ja que té una resultant directa en la direcció d'avanç i és el que es valora habitualment amb els estudis que utilitzen el velocímetre per a fer les avaluacions. Si valorem els resultats obtinguts en aquesta direcció, podem veure com els patrons acceleratius es modifiquen significativament en la majoria de les variables descriptives dels mateixos amb la intensitat, però els canvis per a augmentar la velocitat de nado varien molt entre gèneres. El més remarcable, si s'analitzen els gràfics, és que si bé en general els nois tenen canvis progressius amb la intensitat en tots els paràmetres menys el mínim, les noies en molts casos presenten els resultats del 90% com el més diferent, mentre que el 95% tornen a presentar valors semblants als del 85% (SD, RMS, màxim) o si més no inferiors als del 90% (mínim i amplitud). Aquest fet es podria explicar per les diferències antropomètriques i fisiològiques, que condicionen les adaptacions tècniques que poden realitzar: mentre que generalment els nois poden aplicar més força i per tant poden fer canvis de intensitat augmentant les acceleracions (força aplicada), les noies es veuen més limitades en aquest sentit i per a poder millorar la velocitat troben altres maneres,

com els canvis de coordinacions intersegmentàries i la millora de la posició hidrodinàmica.

Una altra dada a considerar és la major desviació típica de les noies en tots els paràmetres, un fet pel qual es proposen dues interpretacions: una seria que les noies presenten diverses maneres de modificar l'adaptació tècnica per a aconseguir millorar la propulsió, i l'altra que la tècnica és molt diferent entre el grup de nedadores juniors i sèniors, mentre que entre els nois hi ha major uniformitat tot i la diferència d'edat. S'haurien d'analitzar els resultats dels dos grups femenins per separat per a confirmar aquesta segona hipòtesi, i si fos així, no es podrien analitzar com un grup uniforme.

L'altra comparativa realitzada és la intergrup o comparativa per gènere en cada intensitat. Els resultats mostren que la mitjana només és diferent en la primera intensitat, quan segurament l'avantatge antropomètrica de la flotabilitat en el cas de les noies té més importància (millor posició hidrodinàmica); els resultats del màxim (més elevat en les noies excepte en el 95% que no és significatiu) i el mínim (85% molt més baix en les noies, però després els resultats tendeixen a igualar-se) es podrien atribuir a que en les velocitats més lentes les noies acceleren més i es frenen menys, però en el 95% les noies no poden accelerar tant, mostrant que la capacitat propulsiva disminueix (menor amplitud).

En canvi, si analitzem la RMS, veiem que és diferents en tots els casos i sempre superior en les noies, en contraposició amb resultats d'altres estudis (Madera Gil 2012), fet que es pot atribuir a la major intensitat utilitzada en aquesta referència (25m maximals), mostrant que les modificacions dels patrons acceleratius no sempre són iguals a intensitats baixes i altes. Si es considera aquesta RMS com el valor de l'eficiència accelerativa segons Holmer (1979) citat per Tella, Toca-Herrera et al. (2008), la interpretació seria que les noies són més eficients a intensitats baixes.

Per una altra banda, com que altres estudis que han analitzat les acceleracions intracíclics han fet anàlisis freqüencials amb transformades de Fourier (Tella, Toca-Herrera et al. 2008; Madera, Gonzalez et al. 2010; Madera, González et al. 2012b), en aquest estudi s'ha volgut fer una proposta alternativa a aquest anàlisi amb un mètode

més senzill com són els polígons de freqüències, per a veure si es podia ampliar l'estudi de la senyal accelerativa i definir millor els canvis que s'han produït. S'ha fet només en l'eix d'avanç, ja que es considera que és el més rellevant i el que hauria de presentar majors canvis, però els resultats obtinguts no mostren cap diferència significativa en les freqüències de cap dels interval en les tres intensitats, ni entre gèneres, ni intragènere (només en els dos darrers intervals (>4,8) del nois, concretament entre el 85% i el 95%).

Això es pot interpretar com que aquest anàlisi estadístic no és adequat, ja que no permet apreciar les possibles diferències entre ritmes, però també es podria pensar que l'elevada variabilitat de les dades de tots els subjectes limita l'apreciació de diferències (dades de la SD superiors al 100% de la mitjana). Com a alternativa es proposa que si es fes una agrupació com la que proposen Tella, Toca-Herrera et al. (2008), separant els subjectes en funció dels patrons (situació dels pics freqüencials), que podria indicar semblances en les adaptacions coordinatives, es podrien obtenir diferències significatives.

Finalment, pel que fa a les correlacions amb la velocitat, també hi ha clares diferències entre gèneres. En el cas dels nois, trobem relacions elevades en tres dels paràmetres, la RMS, la SD i el màxim, com en l'estudi de Pérez Ramirez (2012) i (Tella, Toca-Herrera et al. 2008), de manera que podem dir que tots ells són clarament indicatius del rendiment dels nedadors i la velocitat de nedo. La mitjana i l'amplitud, tot i ser significatives, tenen relacions mitjanes, de manera que els resultats d'aquests paràmetres no serien tan claus; i finalment els valors del mínim no serien rellevants, ja que no presenten cap correlació significativa, a diferència dels resultats obtinguts per Madera Gil (2012), indicant que a aquestes velocitats submàximes, a diferència de les màximes, minimitzar les desacceleracions no és important i que per tant la capacitat accelerativa és més important que la minimització de la resistència.

Les noies en canvi no presenten pràcticament cap relació elevada, només en el 85% i el 90% del màxim i el global del mínim negativament, aquí sí que en correspondència amb els resultats comentats anteriorment, mostrant que contràriament al nois, aquesta variable és molt important per a determinar les

capacitats propulsives en les noies a aquests ritmes, és a dir, que la minimització de les frenades és molt important, però que a intensitats baixes la capacitat propulsiva (màxim) també ho és. La majoria de relacions significatives són de nivell mitjà (la mitjana, el màxim i el mínim, i la SD i l'amplitud en el global de les tres intensitats), de manera que podem dir que els registres acceleratius no són tant rellevants per a elles, segurament pel factor que s'ha apuntat anteriorment, que els canvis d'intensitat i el millor nivell de rendiment es relacionen més amb una millor coordinació gestual i una millor capacitat adaptativa de la tècnica a les possibilitats propulsives del medi (eficàcia) que no pas a una major aplicació de forces, tot i que la major variabilitat de les dades (elevada SD en tots els paràmetres) pot influir en aquesta falta de significació. El més sorprenent seria que la RMS, que s'ha considerat un paràmetre clau en altres estudis que han analitzat les IAV (Tella, Toca-Herrera et al. 2008; Madera, González et al. 2012b), en aquest cas no presenta ni tan sols correlacions significatives ($p > 0,05$), de manera que, si més no en aquestes intensitats de nedo submàximes per a les noies, aquest paràmetre no ens serveix per a poder definir les possibilitats de rendiment ni és un indicatiu de l'eficiència.

8.3.2 ANÀLISI DE LES VARIACIONS D'ACCELERACIÓ EN L'EIX LATERAL

Els registres en l'eix lateral ens indiquen les desviacions laterals del cos, generalment associades a l'acció propulsiva de les mans en la fase cap endins i cap a fora. Aquesta component lateral de l'aplicació de la força sempre està més o menys present, i com que en l'estil crol l'aplicació de forces dels braços és alternada (dreta-esquerra), genera una reacció en direcció contrària en el cos a cada impuls. Els girs en l'eix longitudinal del cos, balanceig que anomenen habitualment "rolido", i que s'associen a un gir de la cintura escapular i zona pèlvica, són molt importants a l'hora de minimitzar aquests desplaçaments laterals, ja que facilita l'aplicació de la força en sentit contrari a l'avanç (horitzontal), i també facilita una millor posició hidrodinàmica, minimitzant la resistència frontal i per tant la força necessària per a vèncer-la (Psycharakis and McCabe 2011). Tot i que no ha estat objecte d'estudi en aquesta tesi,

aquest balanceig es podria apreciar clarament amb les dades proporcionades pel giroscopi, que registra les acceleracions angulars en cada eix de gir, i en posteriors estudis es podria valorar la possible correlació entre aquesta rotació en l'eix longitudinal i el desplaçament lateral del cos.

A més, el registre de l'acceleració en l'eix lateral és el que ens facilita la determinació de l'acció de cada braç, i per tant la delimitació de les braçades o cicles en les dades d'acceleració mitjançant la localització d'un valor extrem (en el nostre cas s'han escollit els mínims) en aquest eix, que després ens permetran delimitar els intervals del registre que corresponen a cada cicle en els altres dos eixos i poder valorar el comportament intracíclic en els mateixos. A més, els intervals delimitats permeten determinar el temps per cicle, a partir del qual es calcula la freqüència de cicle (SR) (Davey, Anderson et al. 2008) i la resta de paràmetres cinemàtics del cicle.

En el nostre estudi, s'ha pogut confirmar, com en altres que han valorat les acceleracions triaxials (Tella, Madera et al. 2010), que aquest és l'eix amb una major amplitud, amb dades fins a tres vegades superiors a les dels altres dos eixos, que presenten valors relativament semblants. Aquest aspecte es podria justificar perquè el desplaçament lateral és curt i ràpid, tornant ràpidament al centre abans d'anar cap a l'altre costat, de manera que les components laterals del vector resultant són elevades.

Els resultats obtinguts mostren diferències significatives en totes les variables i intensitats entre els dos gèneres excepte el màxim en el 95%, mostrant que les diferències tècniques d'ambdós condicionen els registres d'aquest eix.

Si considerem que teòricament l'equilibri lateral hauria d'implicar un mínim igual però de signe contrari que el màxim, i que la mitjana de les dades hauria de ser propera a zero, mostrant que no hi ha un predomini de cap dels dos costats, podem dir que en general els nedadors no presenten gaires diferències entre els dos extrems i per tant es manté aquest balanç de forces laterals. Hi ha, però, una tendència a la mitjana negativa, fet que es podria atribuir a que generalment els nedadors respiren habitualment pel mateix costat, i que en l'acció de la respiració aquest desplaçament medial de la mà augmenta en la fase propulsiva cap avall alhora que la seva velocitat en la fase cap endins i el seu desplaçament enrere disminueixen (Vezos, Gourgoulis et

al. 2007). Aquesta diferència es produeix tant en nois com en noies, però en els nostres resultats aquestes ho fan en un menor grau (mitjana més propera a zero i menor SD, així com menys amplitud per un màxim i un mínim menors), fet que es pot atribuir a les avantatges antropomètriques d'aquestes, que pot facilitar aquesta acció respiratòria (Psycharakis and Sanders 2010). Una possible representació gràfica d'aquest fet seria que el mínim o part inferior de la corba sempre té una caiguda més accentuada (en forma de V), mostrant aquest moviment més ampli, mentre que la part alta sempre és més cònca (en forma de U), sent un moviment menys bruscat i més progressiu (veure exemple fig. 8.1).

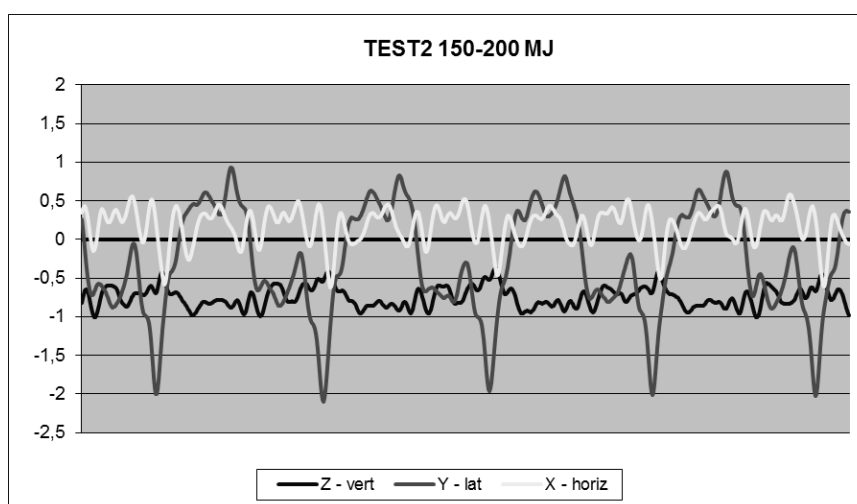


Fig. 8.1. Exemple del gràfic obtingut directament amb les dades de l'acceleròmetre per a un subjecte on es pot apreciar la caiguda important del mínim en cada cicle de l'eix lateral (Y).

Aquesta tendència es reflexa també en els canvis amb la intensitat que es produeixen en els màxims, on veiem que en els nois pràcticament no es modifica i en les noies sí, i en els mínims, que es modifiquen significativament en tots dos grups, podent pensar que segurament la respiració és el factor que provoca més canvis. L'amplitud total de la senyal també es modifica arrossegada per aquest mínim, contribuint a una diferència significativa en cada intensitat.

Per a clarificar aquestes justificacions, a continuació (fig. 8.2) es presenten com a exemple dos gràfics representatius d'un noi i una noia, en els quals es comparen les

senyals en aquest eix "Y" en les tres intensitats, on es poden apreciar les diferències entre la forma de la corba en la zona positiva i negativa, les diferències entre els màxims i els mínims, els augments en els mínims i les menors diferències en els màxims.

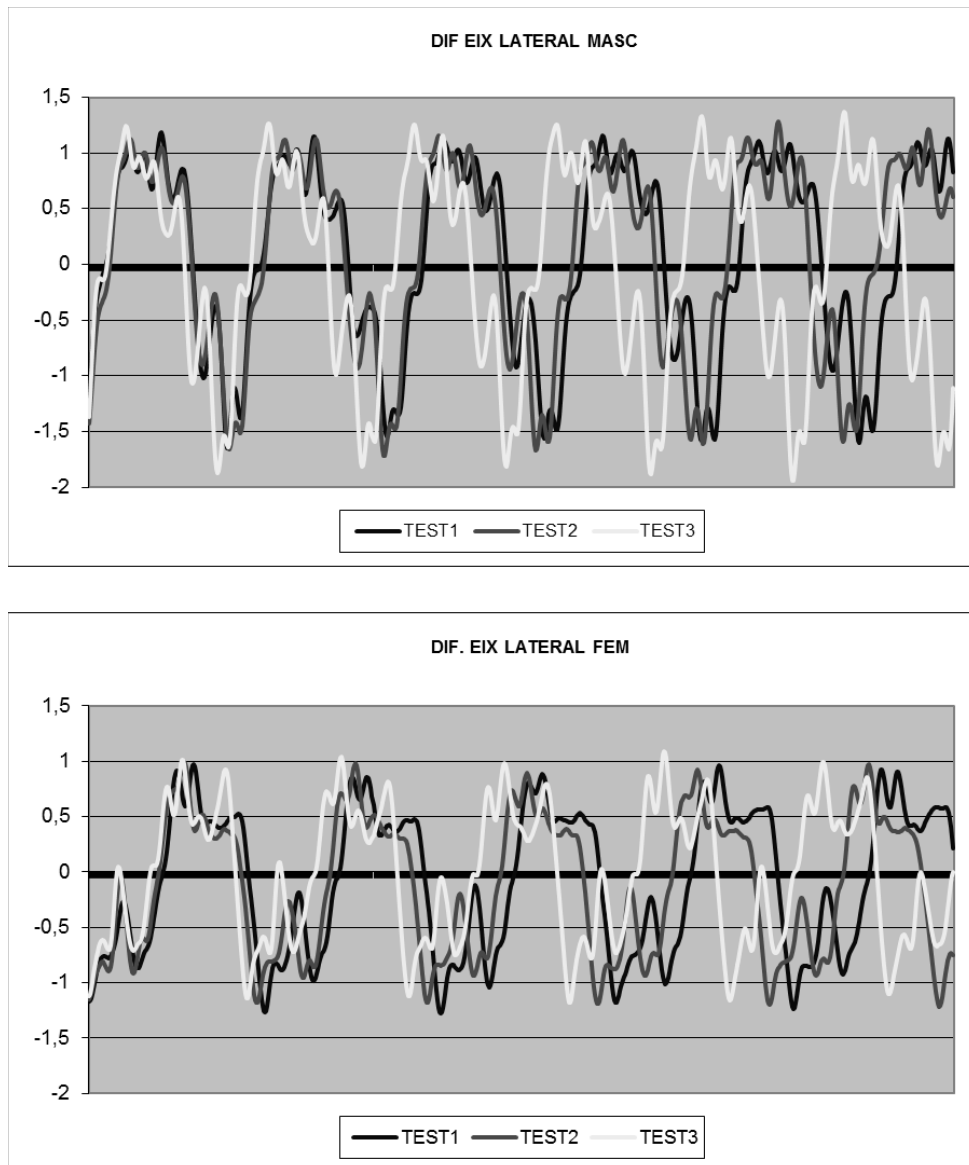


Fig. 8.2. Representació gràfica de les variacions en el registre (en unitats g) en l'eix "Y" o lateral en les tres intensitats per a un noi (primer gràfic) i una noia (segon gràfic)

Pel que fa a les correlacions amb el rendiment (velocitat de nedo en una mateixa intensitat) i amb els canvis de velocitat (3 intensitats), podem veure que en aquest eix

no hi ha cap correlació elevada en el cas de les noies, tot i que, en correspondència amb l'anàlisi dels resultats, el màxim i la mitjana presenten alguna relació significativa mitja pel que fa al rendiment i tots els paràmetres menys el mínim amb l'augment de ritme. En els nois, els resultats significatius amb el rendiment i la velocitat els trobem en el mínim i l'amplitud, trobant una relació elevada en la intensitat del 85% i mitja en la resta, i en els altres paràmetres trobem alguna relació mitja en algun ritme i amb la velocitat en la mitjana i el màxim, mostrant que hi ha importants diferències en les adaptacions de cada gènere, però que no es distingeix un factor clarament rellevant que es modifiqui amb el rendiment i per tant, els canvis de patrons en aquest eix no és un element clau en els canvis propulsius.

8.3.3 ANÀLISI DE LES VARIACIONS D'ACCELERACIÓ EN L'EIX VERTICAL

Aquest eix supero-inferior o "Z", està molt condicionat per dos factors o forces que actuen en un individu submergit en el medi aquàtic: la força de flotació o d'empenta hidrostàtica, en sentit cap amunt, determinada per les diferents distribucions de densitat del cos, el percentatge de greix corporal i la quantitat d'aire contingut en els pulmons; i la força de la gravetat, força en sentit cap avall determinada principalment pel pes o massa de la persona. El balanç entre aquestes forces contràries determina la flotabilitat de l'individu (principi d'Arquímedes): si el pes és major s'enfonsarà, mentre que si es menor flotarà. Com que aquest equilibri és un factor molt individual, ja que depèn de principalment de factors antropomètrics, el registre passiu (sense moviment) d'aquest eix presenta valors diferenciats en cada persona i per tant considerem que no seria indicat comparar les dades de tendència central dels subjectes (valor de la mitjana i RMS), com es pot confirmar per les poques diferències significatives tant en els valors intra com inter-grups (gènere) i en les correlacions amb la velocitat de nedo (només són significatives i amb una relació mitja en els homes) d'aquestes variables.

L'important per a determinar les modificacions tècniques a causa dels canvis de velocitat seria valorar les variacions intracíclics, és a dir, els canvis en les variables

de dispersió (SD, màxim, mínim i amplitud). La presència de fluctuacions de l'acceleració en aquest eix ve determinada per la major o menor component vertical de les forces propulsives; tot i que sempre hi ha una certa component en aquesta direcció, ja que la mà entra en una direcció descendent per a assolir una certa profunditat i després ha de tornar a sortir de l'aigua, hi ha un segon aspecte que influirà en la necessitat de generar majors forces: com que la força de gravetat s'aplica en el centre de gravetat i l'empenta hidrostàtica s'aplica en el centre de flotació, situat en la zona toràcica, es crea un moment de torsió (*underwater torque*) que inclina més o menys el cos (baixant les cames) i és aquesta component vertical la que cal compensar fins a aconseguir l'equilibri de forces en una posició quan més hidrodinàmica millor.

Els resultats de les variacions en aquest eix mostren diferències en tots els paràmetres intra-grup tant pels nois com per les noies, augmentant tots amb la intensitat, confirmant que cal fer canvis en la tècnica i modificar la component de la força en aquest eix per a aconseguir aquesta compensació i alhora millorar la propulsió. Entre gèneres, també trobem diferències clares excepte en el valor màxim, fet que es pot atribuir a un possible llinard pel que fa a la força de flotació.

Pel que fa a la relació amb la velocitat, els nois presenten correlacions significatives en la majoria dels paràmetres descriptius d'aquest eix excepte en el màxim, tot i que només en el cas del mínim (85% i global) aquestes relacions són elevades, de manera que podem considerar aquest eix com un paràmetre que es modifica proporcionalment amb el nivell i la intensitat, però que el mínim és el factor clau per a determinar les possibilitats de rendiment. Pel que fa a les noies, trobem correlacions significatives en tots els paràmetres de dispersió (SD, màxim, mínim amplitud), però només són elevades en la desviació típica i l'amplitud (85% i global), convertint aquests dos paràmetres en els importants per a elles per a analitzar el seu rendiment.

A continuació es presenten dos gràfics representatius dels canvis en un noi i en una noia per a representar els resultats quantitius obtinguts (fig. 8.3).

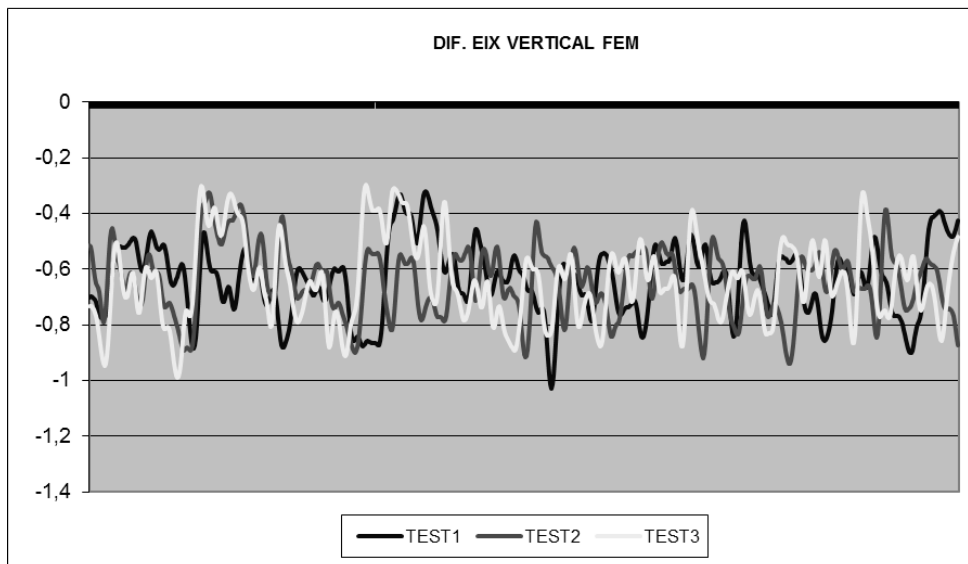
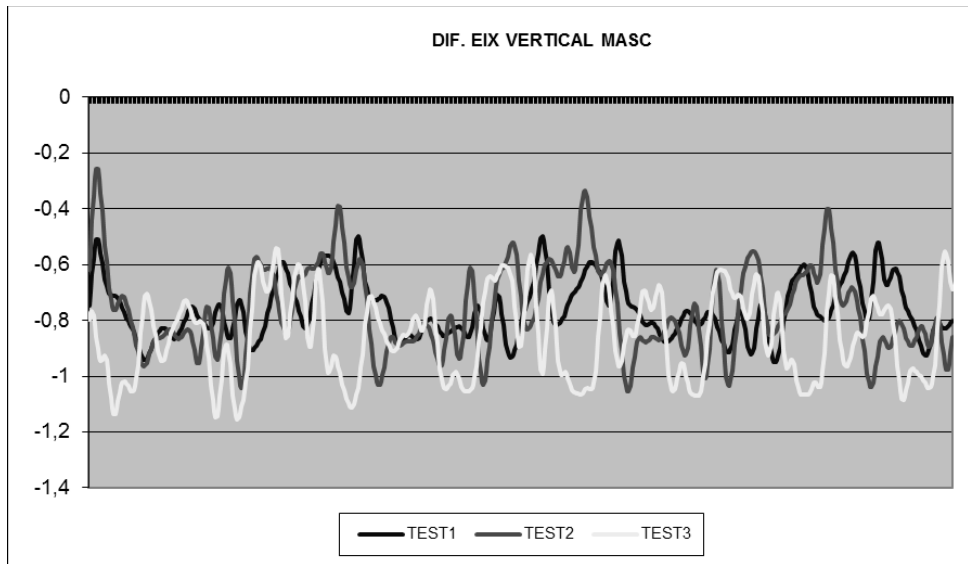


Fig. 8.3. Representació gràfica de les dades d'acceleració en l'eix vertical en les tres intensitats per a un noi i per a una noia

9. CONCLUSIONS

L'objectiu principal quan es va plantejar la realització d'aquest estudi i la tesi doctoral corresponent, era el de poder analitzar el rendiment dels nedadors de fons d'elit a diferents intensitats competitives amb un mètode assequible tant a nivell tecnològic com de tractament de dades, que servís per a millorar els coneixements dels mateixos a nivell teòric o científic, però també a nivell pràctic, per a fer una proposta d'un mètode que facilités l'anàlisi de la tècnica dels nedadors d'una manera que no limiti el gest habitual del nedador i que alhora integri totes les variables que intervenen en els condicions de nedo habituals, analitzant un paràmetre rellevant per al rendiment, la capacitat propulsiva.

Amb els resultats obtinguts s'ha pogut comprovar que la metodologia proposada permet obtenir de manera senzilla un perfil bàsic de la capacitat propulsiva dels nedadors, podent diferenciar els efectes en les diferents direccions de les accions realitzades així com la coordinació de les mateixes (canvis temporo-espacials), i en base als registres proporcionats per l'acceleròmetre, es poden definir els patrons acceleratius dels tres eixos (amb les variables descriptives bàsiques) i les variables cinemàtiques del cicle, alhora que estadísticament es poden determinar els canvis que s'han produït per a assolir majors velocitats de nedo i les diferències entre gèneres:

- Variables cinemàtiques del cicle:
 - Totes les variables (SL, SR, i SI) es modifiquen proporcionalment amb els canvis d'intensitat i en els dos gèneres
 - Les correlacions amb la velocitat són significatives en totes les variables, excepte en la SL dels nois

- En l'eix d'avanç:
 - En els nedadors els canvis són proporcionals amb la intensitat, presentant diferències significatives en els registres de totes les intensitats excepte en el mínim, mentre que les nedadores augmenten

valors del 85% al 90% i els tornen a disminuir en el 95% excepte en la RMS, on el 85% és molt superior

- Les diferències entre ambdós grups són significatives excepte en el 90% de la mitjana, la SD, la RMS, el mínim i l'amplitud i en el 95% de la RMS i el màxim
- Els nedadors presenten correlacions amb la velocitat significatives i elevades en totes les intensitats en la RMS, la SD i el màxim i intermèdies en la mitjana i l'amplitud. Les nedadores en canvi presenten només correlacions mitges en les tres intensitats en la mitjana, el màxim i el mínim, i en el global de la SD i l'amplitud, però la RMS no es relaciona significativament en cap cas

- En l'eix lateral:

- Els nedadors presenten registres del 85% diferents a la resta, però només en la mitjana, el mínim i l'amplitud el 95% és també superior a les altres dues intensitats. Les nedadores només presenten canvis significatius en les variables del 95% amb la resta de intensitats, excepte en el màxim i l'amplitud, on el 90% també és diferent, i en la mitjana, on no hi ha canvis significatius en cap cas.
- Hi ha diferències significatives entre els registres dels dos gèneres en totes les variables excepte en el 95% del màxim
- En relació amb la velocitat, els nedadors presenten coeficients significatius mitjans en tots els casos (85%, 90% 95% i global) per al mínim i l'amplitud, i en el global del màxim i la mitjana. Les nedadores només presenten relacions amb totes les intensitats en el màxim i en el global de tots els paràmetres excepte el mínim.

- En l'eix vertical:

- Tant els nedadors com les nedadores presenten diferències significatives entre totes les variables per a les tres intensitats excepte

en la RMS i la mitjana, on només el 95% és superior a la resta, i la mitjana de les noies, on el 85% és inferior.

- Entre gèneres trobem diferències en les tres intensitats per a la SD, el mínim i l'amplitud, només en el 85% en la RMS i la mitjana i el màxim no presenta canvis en cap cas
- Les relacions amb la velocitat en els nois són significatives i elevades per a totes les intensitats només en el mínim, i mitjanes en l'amplitud i la SD i la RMS; mentre que en les noies són elevades en la SD i l'amplitud, i mitjanes en el màxim i el mínim

Amb aquests resultats, posteriorment caldria fer un anàlisi interindividual de cada nedador, de manera que es poden fer propostes de millora específiques per a cada nedador en funció de la millor o menor adequació de les seves adaptacions tècniques a cada condició i ritme, millorant per tant la seva adaptació al medi i la seva eficiència propulsiva, però per a això caldria conèixer específicament a quina fase i moviment correspon cada part de la corba del gràfic, de manera que una possible ampliació a aquest estudi seria sincronitzar el registre de l'acceleròmetre amb la filmació.

Un altre aspecte a considerar per a noves propostes d'estudi seria comparar velocitats de nedo més elevades, ja que segurament les variacions de tots els paràmetres serien majors i per tant les diferències més significatives, podent determinar millor les tendències de cada paràmetre en els canvis de ritme. Igualment, si s'amplia la mostra a altres tipus de nedadors, especialistes en proves més curtes, es podrien definir millor quines són les característiques específiques que poden definir els nedadors de fons respecte als altres i alhora poder veure si les adaptacions tècniques al canvis de ritme segueixen la mateixa tendència en tots els casos. En el nostre cas, pot ser que la gran igualtat tècnica i de rendiment hagi pogut limitar les correlacions significatives trobades.

Considerem doncs que aquest estudi, amb millores en l'apartat metodològic i d'obtenció de resultats, com per exemple amb la creació d'un *software* que permeti

obtenir les dades de manera immediata, i sobretot si es poguessin obtenir les dades telemètricament i amb la filmació sincronitzada, pot facilitar la millora de la capacitat de control de l'entrenament per part dels entrenadors i per tant les possibilitats d'optimitzar les indicacions i la millora de la tècnica. El nedador viu molt de les sensacions kinestèsiques que té quan aplica força a l'aigua, quines pressions nota en la mà, en quina direcció i amb quina intensitat, i una eina com aquesta, que a l'instant li pugui indicar on hi ha un problema propulsiu, pot ser una ajuda important per a poder aguditzar aquestes sensacions i intentar modificar-les buscant l'optimització de la generació de forces en el medi.

10. BIBLIOGRAFIA

- Alberty, M., F. Potdevin, et al. (2008). "Changes in swimming technique during time to exhaustion at freely chosen and controlled stroke rates." Journal of Sports Sciences **26**(11): 1191-1200.
- Alberty, M., M. Sidney, et al. (2005). "Intracyclic velocity variations and arm coordination during exhaustive exercise in front crawl stroke." International Journal of Sports Medicine **26**(6): 471-475.
- Alberty, M. R., F. P. Potdevin, et al. (2011). "Effect of Stroke Rate Reduction on Swimming Technique During Paced Exercise." Journal of Strength and Conditioning Research **25**(2): 392-397.
- Arellano, R. (1992). Evaluación de la fuerza propulsiva en natación y su relación con el entrenamiento y la técnica (tesis), Universidad de Granada.
- Arellano, R. (1999). Vortices and propulsion. XVII International Symposium on Biomechanics in Sports: SWIMMING. R. S. J. Linsten. Perth, Australia, School of Biomedical and Sports Science. Edith Colwan University: 53-65.
- Arellano, R. (2004). "Applying biomechanical testing to swimming training." Seminario Europeo de Entrenadores de Natación Madrid 7-9 mayo.
- Arellano, R. (2010). Entrenamiento técnico de natación. Madrid, Cultivalibros.
- Arellano, R., P. Brown, et al. (1994). "Analysis of 50-M, 100-M, and 200-M Freestyle Swimmers at the 1992 Olympic Games." Journal of Applied Biomechanics **10**(2): 189-199.
- Bächlin, M., K. Förster, et al. (2009). SwimMaster: a wearable assistant for swimmer. Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing. Orlando, Florida, USA, ACM.

- Barbosa, T. M., J. A. Bragada, et al. (2010). "Energetics and biomechanics as determining factors of swimming performance: Updating the state of the art." Journal of Science and Medicine in Sport **13**(2): 262-269.
- Barbosa, T. M., R. Fernandes, et al. (2006b). "Evaluation of the Energy Expenditure in Competitive Swimming Strokes." Int J Sports Med **27**(11): 894-899.
- Barbosa, T. M., R. J. Fernandes, et al. (2008). "The influence of stroke mechanics into energy cost of elite swimmers." European Journal of Applied Physiology **103**(2): 139-149.
- Barbosa, T. M., F. Lima, et al. (2006). Relationships between energy cost, swimming velocity and speed fluctuation in competitive swimming strokes. Biomechanics and Medicine in Swimming X. J. P. Vilas-Boas, F. Alves and A. Marques. Porto, Portugese Journal of Sport Sciences Vol. 6 Suppl.2: 192-194.
- Barbosa, T. M., D. A. Marinho, et al. (2011) "Biomechanics of Competitive Swimming Strokes." Biomechanics in Applications, 367-388 DOI: 10.5772/19665.
- Berger, M. A., A. P. Hollander, et al. (1997). "Technique and energy losses in front crawl swimming." Med Sci Sports Exerc **29**(11): 1491-1498.
- Berger, M. A., A. P. Hollander, et al. (1999). "Determining propulsive force in front crawl swimming: a comparison of two methods." J Sports Sci **17**(2): 97-105.
- Berger, M. A. M., G. de Groot, et al. (1995). "Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models." Journal of Biomechanics **28**(2): 125-133.
- Bixler, B. and S. Riewald (2002). "Analysis of a swimmer's hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics." Journal of Biomechanics **35**(5): 713-717.
- Bottoni, A. S., N. Lanotte, et al. (2010). Direct measurement of stroke propulsion in real swimming by means of non invasive gauge. IXth International Symposium in

Biomechanics and Medicine in Swimming. P. L. Kjendlie, R. K. Stallman and J. Cabri. Oslo (Norway): 49.

Buchner, M., K. Reischle, et al. (2003). Measurements of the horizontal intracyclic acceleration in competitive swimming with a newly developed accelerometer-goniometer-device. Biomechanics and Medicine In Swimming IX. Saint-Étienne, Publications de l'Université de Saint-Étienne: 57-62.

Callaway, A. J., J. E. Cobb, et al. (2009). "A Comparison of Video and Accelerometer Based Approaches Applied to Performance Monitoring in Swimming." International Journal of Sports Science & Coaching **4**(1): 139-153.

Capelli, C. (1999). "Physiological determinants of best performances in human locomotion." Eur J Appl Physiol Occup Physiol **80**(4): 298-307.

Craig, A. and D. Pendergast (1979). "Relationship of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming." Medicine and Science in Sports and Exercise **11**(3): 278-283.

Craig, A., B. Termin, et al. (2006). "Simultaneous recordings of velocity and video during swimming." Portuguese Journal of Sport Sciences **6**(supl.2): 32-35.

Craig, A. B., P. L. Skehan, et al. (1985). "Velocity, stroke rate, and distance per stroke during elite swimming competition." Medicine and Science in Sports and Exercise **17**(6): 625-634.

Craik, J. (2011). "The fastskin revolution: from human fish to swimming androids." Culture Unbound EP **3**: 71-82.

Chatard, J. C. and B. Wilson (2008). "Effect of Fastskin Suits on performance, drag, and energy cost of swimming." Medicine and Science in Sports and Exercise **40**(6): 1149-1154.

- Chen, K. Y. and D. R. J. Bassett (2005). "The Technology of Accelerometry-Based Activity Monitors: Current and Future." Medicine & Science in Sports & Exercise **37**(11): S490-S500.
- Chollet, D. (1992). Approche scientifique de la natation sportive: bases biomécaniques, techniques et psychophysiologiques: apprentissage, évaluation et correction des techniques de nage. Paris, Ed.Vigot.
- Chollet, D., S. Chalies, et al. (2000). "A new index of coordination for the crawl: Description and usefulness." International Journal of Sports Medicine **21**(1): 54-59.
- Chollet, D., O. Hue, et al. (2000b). "The effects of drafting on stroking variations during swimming in elite male triathletes." European Journal of Applied Physiology **82**(5-6): 413-417.
- Dadashi, F., F. Crettenanad, et al. (2011). "Frontcrawl propulsive phase detection using inertial sensors." Portuguese Journal of Sport Science **11**(Suppl.2): 855-858.
- Davey, N., M. Anderson, et al. (2008). "Validation trial of an accelerometer-based sensor platform for swimming." Sports Technology **1**(4-5): 202-207.
- Davey, N. P. (2004). Acquisition and analysis of aquatic stroke data from an accelerometer based system PhD Thesis, Griffith University.
- Dejours, P., L. Bolis, et al. (1987). Comparative physiology life in water and on land. Padova (Italia), Liviana Press: 323-341.
- di Prampero, P. E. (1986). "The energy cost of human locomotion on land and in water." Int J Sports Med **7**(2): 55-72.
- Dickinson, M. H. (1996). "Unsteady mechanisms of force generation in aquatic and aerial locomotion." American Zoologist **36**(6): 537-554.
- Fernandes, R. J., J. Ribeiro, et al. (2012). "Kinematics of the Hip and Body Center of Mass in Front Crawl." Journal of Human Kinetics **33**: 15-23.

- Figueiredo, P., T. M. Barbosa, et al. (2012). "Energy cost and body centre of mass' 3D intracycle velocity variation in swimming." European Journal of Applied Physiology **112**(9): 3319-3326.
- Figueiredo, P., P. L. Kjendlie, et al. (2012b). "Intracycle Velocity Variation of the Body Centre of Mass in Front Crawl." International Journal of Sports Medicine **33**(4): 285-290.
- Figueiredo, P., R. Sanders, et al. (2013). "Kinematic and Electromyographic Changes During 200 m Front Crawl at Race Pace." Int J Sports Med **34**(EFirst): 49-55.
- Figueiredo, P., J. P. Vilas-Boas, et al. (2009). "Does the Hip Reflect the Centre of Mass Swimming Kinematics?" International Journal of Sports Medicine **30**(11): 779-781.
- Gourgoulis, V., N. Aggeloussis, et al. (2008). "Reconstruction accuracy in underwater three-dimensional kinematic analysis." Journal of Science and Medicine in Sport **11**(2): 90-95.
- Havriluk, R. (2007). "Variability in measurement of swimming forces: A meta-analysis of passive and active drag." Research Quarterly for Exercise and Sport **78**(2): 32-39.
- Hellard, P., J. Dekerle, et al. (2008). "Kinematic measures and stroke rate variability in elite female 200-m swimmers in the four swimming techniques: Athens 2004 Olympic semi-finalists and French National 2004 Championship semi-finalists." Journal of Sports Sciences **26**(1): 35-46.
- Hollander, A. P., G. De Groot, et al. (1986). "Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming." J Sports Sci **4**(1): 21-30.
- James, D. A., B. Burkett, et al. (2011). "An unobstructive swimming monitoring system for recreational and elite performance monitoring." Procedia Engineering **13**: 113-119.

- Janssen, I. and A. Sachlikidis (2010). "Validity and reliability of intra-stroke kayak velocity and acceleration using a GPS-based accelerometer." Sports Biomechanics **9**(1): 47-56.
- Jidovtseff, B., J.-L. Croisier, et al. (2008). "Evaluation inertielle: état de la question et perspectives." Science & Sports(23): 107-117.
- Jordà, J. and V. Tella (2007). El comportamiento de la velocidad intraciclo en natación. Biomecánica aplicada a la actividad física y el deporte P. Pérez and S. Llana, Ayuntamiento de Valencia.
- Khoo, B. H., B. K. J. Lee, et al. (2009). "System for determining within-stroke variations of speed in swimming (SWiSS)." 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM): 1927-1932.
- Knechtle, B., B. Baumann, et al. (2010). "What Influences Race Performance in Male Open-Water Ultra-Endurance Swimmers: Anthropometry or Training?" Human Movement **11**(1): 5-10.
- Knight, J., H. Bristow, et al. (2007). "Uses of accelerometer data collected from a wearable system." Personal and Ubiquitous Computing **11**(2): 117-132.
- Le Sage, T., A. Bindel, et al. (2010). "Development of a real time system for monitoring of swimming performance." Procedia Engineering **2**(2): 2707-2712.
- Le Sage, T., A. Bindel, et al. (2011). "Embedded programming and real-time signal processing of swimming strokes." Sports Engineering **14**(1): 1-14.
- Leblanc, H., L. Seifert, et al. (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.
- Luinge, H. J. (2002). Inertial sensing of human movement. PhD Thesis, University of Twente.

- Llosa, J., I. Vilajosana, et al. (2009). "REMOTE, a Wireless Sensor Network Based System to Monitor Rowing Performance." Sensors **9**(9): 7069-7082.
- Madera Gil, J. (2012). Análisis en el dominio temporal y frecuencial de la aceleración en los cuatro estilos de competición de natación. PhD, Universitat de València.
- Madera, J., L. M. González, et al. (2012b). "Analysis on the time and frequency domains of the acceleration in front crawl stroke." Journal of Human Kinetics **32**: 109-120.
- Madera, J., L. M. Gonzalez, et al. (2010). Different frequential acceleration spectrums in front crawl. IXth International Symposium in Biomechanics and Medicine in Swimming. P. L. Kjendlie, R. K. Stallman and J. Cabri. Oslo (Norway): 119-122.
- Maglischo, E. W. (1993). Swimming even faster. California, Mayfield Publishing Company.
- Maglischo, E. W. (2003). Swimming fastest: the essential reference on technique, training and program design. Champaign, IL, Human Kinetics.
- Martin, R. B., R. A. Yeater, et al. (1981). "A simple analytical model for the crawl stroke." Journal of Biomechanics **14**(8): 539-548.
- Mason, B. R., D. Formosa, et al. (2002). The use of passive drag to interpret variation in active drag measurements. XXth International Symposium on Biomechanics in Sport, Universidad de Extremadura (Cáceres).
- Matsuuchi, K., T. Miwa, et al. (2009). "Unsteady flow field around a human hand and propulsive force in swimming." Journal of Biomechanics **42**(1): 42-47.
- Matsuuchi, K. and Y. Muramatsu (2011). Investigation of the Unsteady Mechanism in the Generation of Propulsive Force While Swimming Using a Synchronized Flow Visualization and Motion Analysis System. Biomechanics in Applications. DOI: 10.5772/21238: 389-408.

- McLean, S. P., D. Palmer, et al. (2010). "Oxygen Uptake Response to Stroke Rate Manipulation in Freestyle Swimming." Medicine and Science in Sports and Exercise **42**(10): 1909-1913.
- Millet, G. P., D. Chollet, et al. (2002). "Coordination in front crawl in elite triathletes and elite swimmers." International Journal of Sports Medicine **23**(2): 99-104.
- Minette, A. E., G. Machtsiras, et al. (2009). "The optimum finger spacing in human swimming." Journal of biomechanics(42): 2188-2190.
- Nuber, G. W., F. W. Jobe, et al. (1986). "Fine wire electromyography analysis of muscles of the shoulder during swimming." The American Journal of Sports Medicine **14**(1): 7-11.
- Ohgi, Y., H. Ichikawa, et al. (2003). "Stroke phase discrimination in breaststroke swimming using a tri-axial acceleration sensor device." Sports Engineering **6**(2): 113-123.
- Ohgi, Y., H. Ichikawa, et al. (2002). "Microcomputer-based acceleration sensor device for swimming stroke monitoring." JSME International Journal, Series C (Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing) **45**(4): 960-966.
- Pai, Y.-C. and J. G. Hay (1988). "A Hydrodynamic Study of the Oscillation Motion in Swimming." International Journal of Sport Biomechanics **4**(1): 21-37.
- Pelarigo, J. G., B. S. Denadai, et al. (2011). "Stroke phases responses around maximal lactate steady state in front crawl." Journal of science and medicine in sport / Sports Medicine Australia **14**(2): 168.e161-168.e165.
- Pelayo, P., M. Alberty, et al. (2007). "Aerobic Potential, Stroke Parameters, and Coordination in Swimming Front-Crawl Performance." International Journal of Sports Physiology and Performance **2**(4): 347-359.

- Pelham, T. W., M. G. Robinson, et al. (2006). "Assessing human movement with accelerometry." Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation **27**(1): 21-28.
- Pendergast, D., C. Capelli, et al. (2006). Biophysics in swimming. Biomechanics and medicine in swimming X (Porto). J. P. Vilas-Boas, F. Alves and A. Marques. Porto, Portuguese Journal of Sport Science: 185-189.
- Pérez Ramirez, J. A. (2012). Análisis 3D de la aceleración en crol en el dominio temporal y frecuencial. Trabajo de Fin de Master, Universitat de Valencia.
- Pfau, T., T. H. Witte, et al. (2005). "A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor." Journal of Experimental Biology **208**(13): 2503-2514.
- Potdevin, F., B. Bril, et al. (2006). "Stroke frequency and arm coordination in front crawl swimming." International Journal of Sports Medicine **27**(3): 193-198.
- Potdevin, F., D. Deligniers, et al. (2002). Does estroke rate determine swimming velocity values and coordination? Biomechanics and Medicine in Swimming IX, Univ. St. Etienne.
- Potts, A. D., J. E. Charlton, et al. (2002). "Bilateral arm power imbalance in swim bench exercise to exhaustion." Journal of sports sciences. **20**(12): 975-979.
- Psycharakis, S. G. and C. McCabe (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. and R. H. Sanders (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.
- Psycharakis, S. G. and R. H. Sanders (2010). "Body roll in swimming: A review." Journal of Sports Sciences **28**(3): 229-236.

- Rouboa, A., A. J. Silva, et al. (2006). "The effect of swimmer's hand/forearm acceleration on propulsive forces generation using computational fluid dynamics." Journal of biomechanics **39**: 1239-1248.
- Sanchez, J. and R. Arellano (2002). Stroke index values according to level, gender, swimming style and event race distance. XXth International Symposium on Biomechanics in Sport, Universidad de Extremadura (Cáceres).
- Sanders, R. (1999). "Hydrodynamic characteristics of a swimmer's hand." Journal of Applied Biomechanics **15**(Article): 3-36.
- Schnitzler, C., L. Seifert, et al. (2008). "Arm coordination adaptations assessment in swimming." International Journal of Sports Medicine **29**(6): 480-486.
- Schnitzler, C., V. Ernwein, et al. (2006). Intracyclic velocity signal as a tool to evaluate propulsive phase duration. Biomechanics and medicine in swimming X (Porto). J. P. Vilas-Boas, F. Alves and A. Marques. Porto, Portuguese Journal of Sport Science: 88-90.
- Schnitzler, C., L. Seifert, et al. (2010). "Hip Velocity and Arm Coordination in Front Crawl Swimming." International Journal of Sports Medicine **31**(12): 875-881.
- Seifert, L., L. Boulesteix, et al. (2005). "The spatial-temporal and coordinative structures in elite male 100-m front crawl swimmers." International Journal of Sports Medicine **26**(4): 286-293.
- Seifert, L., L. Boulesteix, et al. (2004). "Effect of Gender on the Adaptation of Arm Coordination in Front Crawl." Int J Sports Med **25**(03): 217-223.
- Seifert, L. and D. Chollet (2009). "Modelling spatial-temporal and coordinative parameters in swimming." Journal of Science and Medicine in Sport **12**(4): 495-499.
- Seifert, L., D. Chollet, et al. (2004b). "Effect of swimming velocity on arm coordination in the front crawl: a dynamic analysis." Journal of Sports Sciences **22**(7): 651-660.

- Seifert, L., D. Chollet, et al. (2007). "Kinematic changes during a 100-m front crawl: effects of performance level and gender." Medicine and Science in Sports and Exercise **39**(10): 1784-1793.
- Seifert, L., D. Chollet, et al. (2007b). "Swimming constraints and arm coordination." Human Movement Science **26**(1): 68-86.
- Seifert, L., J. Komar, et al. (2010). "Swim Specialty Affects Energy Cost and Motor Organization." International Journal of Sports Medicine **31**(9): 624-630.
- Seifert, L., H. M. Toussaint, et al. (2010c). "Arm coordination, power, and swim efficiency in national and regional front crawl swimmers." Human Movement Science **29**(3): 426-439.
- Sharp, R. L., J. P. Troup, et al. (1982). "Relationship between power and sprint freestyle swimming." Medicine and Science in Sports and Exercise **14**(1): 53-56.
- Siirtola, P., P. Laurinen, et al. (2011). "Efficient accelerometer-based swimming exercise tracking." Proceedings 2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM 2011): 156-161.
- Slawson, S. E., L. M. Justham, et al. (2008). Accelerometer Profile Recognition of Swimming Strokes (P17). The Engineering of Sport 7, Springer Paris: 81-87.
- Smith, D. J., S. R. Norris, et al. (2002). "Performance evaluation of swimmers - Scientific tools." Sports Medicine **32**(9): 539-554.
- Stamm, A., D. V. Thiel, et al. (2011). "Towards determining absolute velocity of freestyle swimming using 3-axis accelerometers." Procedia Engineering(13): 120-125.
- Swaine, I. L. (2000). "Arm and leg power output in swimmers during simulated swimming." Medicine and Science in Sports and Exercise **32**(7): 1288-1292.
- Swaine, I. L. and T. Reilly (1983). "The freely chosen swimming stroke rate in a maximal swim and on a biokinetic bench." Med Sci Sports Exerc **15**(5): 370-375.

- Takagi, H. and B. Wilson (1998). Calculating hydrodynamic force by using pressure differences in swimming. In Biomechanics and medicine in swimming VIII. Proceedings of the VIII International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming, University of Jyväskylä, Finland, June 28 - July 2, 1998, University of Jyväskylä. Department of Biology of Physical Activity, p.101-106. Finland.
- Tan, H., A. M. Wilson, et al. (2008). "Measurement of stride parameters using a wearable GPS and inertial measurement unit." Journal of Biomechanics **41**(7): 1398-1406.
- Tella, V., J. Madera, et al. (2010). A study about the 3D acceleration in front crawl and its relation with performance. IXth International Symposium in Biomechanics and Medicine in Swimming. P. L. Kjendlie, R. K. Stallman and J. Cabri. Oslo (Norway): 173-174.
- Tella, V., J. L. Toca-Herrera, et al. (2008). "Effect of fatigue on the intra-cycle acceleration in front crawl swimming: A time-frequency analysis." Journal of biomechanics **41**(1): 86-92.
- Tourny-Chollet, C., L. Seifert, et al. (2009). "Effect of Force Symmetry on Coordination in Crawl." International Journal of Sports Medicine **30**(3): 182-187.
- Toussaint, H. and M. Truijens (2005). "Biomechanical aspects of peak performance in human swimming." Animal Biology **55**(1): 17-40.
- Toussaint, H. M. (1990). "Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers." Med Sci Sports Exerc **22**(3): 409-415.
- Toussaint, H. M. and P. J. Beek (1992). "Biomechanics of competitive front crawl swimming." Sports Med **13**(1): 8-24.
- Toussaint, H. M., A. Beelen, et al. (1988). "Propelling efficiency of front-crawl swimming." J Appl Physiol **65**(6): 2506-2512.

- Toussaint, H. M., W. Knops, et al. (1990b). "The mechanical efficiency of front crawl swimming." Med Sci Sports Exerc **22**(3): 402-408.
- Toussaint, H. M., P. E. Roos, et al. (2004). "The determination of drag in front crawl swimming." Journal of Biomechanics(37): 1655-1663.
- Toussaint, H. M., C. Van den Berg, et al. (2002). ""Pumped-up propulsion" during front crawl swimming." Medicine and Science in Sports and Exercise **34**(2): 314-319.
- Toussaint, H. M., M. van Stralen, et al. (2002b). Wave drag in front crawl swimming. XXth International Symposium on Biomechanics in Sport, Universidad de Extremadura (Cáceres).
- Ungerechts, B. (1988). The relation of peak body acceleration to phases of movements in swimming. Swimming Science V. B. Ungerechts, K. Wilke and K. Reischle. Champaign, Ill., Human Kinetics Publishers Inc.: 61-66.
- Ungerechts, B. (1988b). Biomechanics as precondition for the understanding of swimming. 6 International Symposium on biomechanics in Sports. E. Kreighbaum and A. McNeill. Bozeman, Montana: 493-497.
- VanHeest, J. L., C. E. Mahoney, et al. (2004). "Characteristics of elite open-water swimmers." Journal of Strength and Conditioning Research **18**(2): 302-305.
- Vezos, N., V. Gourgoulis, et al. (2007). "Underwater stroke kinematics during breathing and breath-holding front crawl swimming." Journal of Sports Science and Medicine **6**(1): 58-62.
- Vilas-Boas, J. P. (1996). Speed fluctuations and energy cost of different breaststroke techniques. Biomechanics and medicine in swimming VII. J. P. Troup, A. P. Hollander, D. Strasse, S. W. Trappe and J. M. Cappaert. London, E & FN Spon: 167-171.

- Vilas-Boas, J. P., R. Fernandes, et al. (2011). Intra-cycle velocity variations, swimming economy, performance, and training in swimming. World book of swimming: from science to performance. L. Seifert. NewYork, Nova Science Publishers: 119-134.
- Vogt, P., C. A. Rüst, et al. (2013). "Analysis of 10km swimming performance of elite male and female open-water swimmers." Springerplus(2): 603.
- Yu, B., D. Gabriel, et al. (1999). "Estimate of the optimum cutoff frequency for the Butterworth low-pass digital filter." Journal of Applied Biomechanics **15**(3): 318-329.
- 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.
- Zamparo, P., M. Bonifazi, et al. (2005). "Energy cost of swimming of elite long-distance swimmers." European Journal of Applied Physiology **94**(5): 697-704.
- Zamparo, P., C. Capelli, et al. (2011). "Energetics of swimming: a historical perspective." European Journal of Applied Physiology **111**(3): 367-378.
- Zamparo, P., C. Capelli, et al. (1996). "Effect of underwater torque on the energy cost, drag and efficiency of front crawl swimming." European Journal of Applied Physiology(73): 195-201.
- Zamparo, P., D. R. Pendergast, et al. (2005b). "An energy balance of front crawl." European Journal of Applied Physiology **94**(1-2): 134-144.
- Zingg, M. A., C. A. Rüst, et al. (2014). "Analysis of sex differences in open-water ultra-distance swimming performances in the FINA World Cup races in 5 km, 10 km and 25 km from 2000 to 2012." BMC Sports Sci Med Rehabil. **6**(1): 7.