



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Análisis transitorio de las fuerzas hidrodinámicas de un nadador mediante CFD

Trabajo de final de grado

Autor:

Javier Carceller Candau

Tutores:

Antonio Gil Megías
Pau Raga Nieto

Valencia, julio de 2018

Agradecimientos

*A mis familiares y amigos, por haber estado siempre ahí.
A mis tutores, Pau y Antonio, por haber aguantado estoicamente y haberse volcado
en mí cuando peor pintaban las cosas.
Y a Selina, por soportarme y apoyarme siempre.*

Resumen

Este Trabajo de Final de Grado aporta los conocimientos del campo de la Ingeniería Aeronáutica al ámbito deportivo, demostrando así la versatilidad propia de un ingeniero aeronáutico, que lejos de encerrarse en la aeronáutica tiene infinitas posibilidades para aplicar su valía.

Se estudian primero de manera teórica las fuerzas hidrodinámicas que genera un nadador en movimiento, tanto las pasivas como las activas. Posteriormente, se implementa en un software de CFD el movimiento simplificado de brazada de una geometría *dummy* 3D para poder analizar las fuerzas hidrodinámicas durante la fase activa de la natación. Este estudio se lleva a cabo de dos formas distintas. Primero se analiza el movimiento totalmente sumergido, monofásico, y posteriormente se estudia en superficie, bifásico. Con ello se compararán los resultados obtenidos de un estudio estacionario respecto de uno transitorio para valorar la necesidad de llevar a cabo un estudio transitorio, con las complicaciones que conlleva.

Resum

Aquest Treball de Final de Grau aporta els coneixements del camp de l'Enginyeria Aeronàutica al àmbit deportiu, mostrant així la versatilitat pròpia d'un enginyer aeronàutic, que lluny de tancar-se a l'aeronàutica té infinites possibilitats per aplicar la seva valia.

S'estudien primer de manera teòrica les forces hidrodinàmiques que genera un nadador en moviment, tant les passives com les actives. Posteriorment, s'implementa amb un software CFD el moviment simplificat de braçada d'una geometria 3D per poder analitzar les forces hidrodinàmiques durant la fase activa de la natació. Aquest estudi es durà a terme de dues formes distintes. Primer, s'analitzarà el moviment totalment submergit, monofàsic, i posteriorment s'estudiarà en superfície, bifàsic. Amb això, es compararan els resultats d'un estudi estacionari respecte d'un transitori per valorar la necessitat de dur a terme un estudi transitori, amb les complicacions que suposa.

Abstract

This Final Degree Project supplies aeronautical knowledge to sports, showing the versatility of an aeronautical engineer who far from exclusively work within the aeronautical field can stand out in any other engineering area.

It will be studied first in a theoretical approach the hydrodynamic forces involved in swimming, both active and passive forces. Next it will be implemented the simplified stroke movement inside a CFD software in order to analyze hydrodynamic forces during the

active phase of swimming. This study will be carried on in two different ways: First, it will be performed with the swimmer totally submerged and then, on the water surface. Finally, it will be compared the results obtained by means of a steady and unsteady study so as to prove the need of performing unsteady studies rather than steady.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación y objetivos	2
1.3. Historia de la natación	4
1.4. Evolución de la técnica de natación	5
1.5. La ingeniería en el deporte	6
2. Fundamentos teóricos	9
2.1. Introducción	9
2.2. Fuerzas hidrodinámicas	9
2.2.1. Resistencia hidrodinámica	10
2.2.2. Sustentación hidrodinámica	15
2.3. Mecánica de Fluidos Computacional: CFD	16
3. Metodología	21
3.1. Introducción	21
3.2. Geometría y caso de estudio	21
3.3. Malla base	23
3.4. Elección de modelo de turbulencia	26
3.5. Dominio de cálculo y mallado <i>overset</i>	27
3.6. Descripción del movimiento a realizar	32
3.7. Set-up del cálculo CFD	33
3.7.1. <i>Eulerian multiphase</i>	34
3.7.2. <i>VOF waves</i>	34
3.7.3. <i>Initial conditions</i>	34
3.7.4. <i>Boundary conditions</i>	35
3.7.5. <i>Implicit Unsteady. Time-step</i>	35
4. Resultados	37
4.1. Introducción	37
4.2. Estudio de independencia de malla	37
4.3. Estudio estacionario de modelos de turbulencia	40
4.4. Resultados	42
4.4.1. Estudio de inmersión	43
4.4.2. Estudio en superficie	48
4.4.3. Comparación estacionario-transitorio	50
4.4.4. Alcance de la técnica <i>overset</i> para estudios de movimiento corporal	52
5. Conclusiones y trabajos futuros	55
5.1. Conclusiones	55
5.1.1. Conclusiones del trabajo en un entorno profesional	55
5.1.2. Conclusiones del estudio CFD	56

5.2. Trabajos futuros	57
6. Pliego de condiciones	59
6.1. Introducción	59
6.2. Condiciones del puesto de trabajo	59
6.2.1. Condiciones de salud y seguridad	59
6.3. Condiciones de los recursos informáticos	62
6.3.1. Condiciones del hardware	62
6.3.2. Condiciones del software	63
7. Presupuesto	65
7.1. Actividades realizadas	65
7.2. Recursos empleados	66
7.3. Presupuestos parciales	66
7.4. Presupuesto total del proyecto	67

Índice de figuras

1.1. Simulación de lanzamiento de un misil mediante malla <i>overset</i>	4
1.2. Simulación de las líneas de corriente sobre un ciclista en STAR-CCM+	7
1.3. Michael Phelps llevando el bañador LZR Racer de Speedo en un evento promocional	7
2.1. Perfil de velocidades dentro de la capa límite	12
2.2. Movimiento de rolo en natación	14
2.3. Fuerzas hidrodinámicas producidas por la mano	16
2.4. Recorrido de la mano durante la brazada de crol	16
2.5. Subcapas en que se divide la capa límite según los valores de y^+	19
3.1. Geometría del nadador. Posición inicial adoptada.	22
3.2. Medidas del contorno empleado para el cálculo	23
3.3. Volumen de control alrededor del nadador	24
3.4. Resultado de la malla base sobre la superficie del nadador	25
3.5. Resultado de la malla base en el dominio	26
3.6. Escena de y^+ sobre la superficie del nadador	27
3.7. Caja creada para separar el brazo del cuerpo	28
3.8. Geometría del cuerpo del nadador sin los brazos	28
3.9. Imágenes del resultado de añadir el hombro al cuerpo (a) y al brazo (b)	28
3.10. Volumen de control en la zona de movimiento de los brazos	29
3.11. Geometría del cuerpo del nadador sin los brazos	30
3.12. Tipos de celda distintos en la malla <i>overset</i>	31
3.13. Interpolación de las soluciones entre una malla <i>background</i> y una malla <i>overset</i>	32
3.14. Imagen detalle de la creación de pared por aplicación de <i>ZeroGap interface</i>	32
3.15. Velocidad angular sobre el eje Z del <i>overset</i> derecho	33
4.1. Resultado de la malla base sobre la superficie del nadador	38
4.2. Evolución del tiempo de convergencia con el tamaño base	39
4.3. Número de celdas obtenidas respecto al tamaño base	39
4.4. Comparativa de von Loebbecke [8] de distintos estudios previos	40
4.5. Punto sobre el que se compara la presión puntual con los tres modelos	41
4.6. Escenas de presión para los tres modelos de turbulencia estudiados	42
4.7. Resistencia en función del tiempo para el estudio monofásico	43
4.8. Evolución del movimiento de la brazada	44
4.9. Escena de vorticidad en el instante $t = 1,0933 s$	45
4.10. Escena de velocidad en el instante $t = 8,0643 s$	46
4.11. Sustentación en función del tiempo para el estudio monofásico	46
4.12. Escena de presión sobre el cuerpo del nadador en los instantes de máxima y mínima sustentación	47
4.13. Resistencia en función del tiempo para el estudio bifásico	48

4.14. Escena de vorticidad en el instante $t = 1,093 s$	49
4.15. Sustentación en función del tiempo para el estudio bifásico	49
4.16. Comparación de velocidad sobre el cuerpo en estacionario vs transitorio . . .	51
4.17. Comparación de presión sobre el cuerpo en estacionario vs transitorio . . .	51
4.18. Escena de vorticidad donde se aprecia la presencia de la malla overset . . .	53

Índice de cuadros

3.1. Características físicas de la geometría del nadador	21
3.2. Valores de referencia de la malla base	23
3.3. Valores de refinamiento de la malla base	25
3.4. Valores de referencia de las mallas overset	29
4.1. Evolución del cálculo de la resistencia al descender el tamaño base	38
4.2. Resultados del estudio comparativo de modelos de turbulencia	41
4.3. Comparación de la resistencia obtenida con estudio estacionario vs transitorio.	50
7.1. Presupuestos parciales	66
7.2. Coste total del hardware empleado	67
7.3. Presupuesto total del proyecto sin IVA	67
7.4. Presupuesto total del proyecto con IVA	67

Capítulo 1

Introducción

Índice

1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación y objetivos	2
1.3. Historia de la natación	4
1.4. Evolución de la técnica de natación	5
1.5. La ingeniería en el deporte	6

1.1. Antecedentes

Este trabajo de final de grado pretende aplicar las técnicas aprendidas de mecánica de fluidos computacional CFD (por sus siglas en inglés *Computational Fluid Dynamics*) para estudiar en detalle las fuerzas hidrodinámicas que genera la técnica de brazada de un nadador a estilo crol simplificado.

Se han realizado numerosos estudios acerca de la natación. La mayoría de ellos han sido de carácter biomecánico, pero el desarrollo de los programas de Mecánica de Fluidos Computacional de los últimos tiempos también ha permitido realizar estudios CFD sobre la natación.

Destacan los estudios realizados por Loebbecke, comparaba el movimiento de patada de tipo delfín de los propios mamíferos marinos con los del ser humano [1]. Se puso de manifiesto que los humanos no han evolucionado de la misma forma que los delfines y otros seres marinos y que el cuerpo humano está muy lejos de las eficiencias submarinas de los delfines. El cuerpo humano tiene muchas características que no le benefician en el nado, como por ejemplo los hombros, que se sitúan de forma frontal al fluido, dificultando su adaptación a la superficie del cuerpo del nadador, y también la cadera es más ancha que la cintura.

En otro estudio [2] von Loebbecke estudió la propulsión humana mediante patadas estilo delfín. Comprobó que la eficiencia de la propulsión humana se situaba entorno al 20 %, mientras que la de los delfines es de un 56 %, casi tres veces mayor.

Otros estudios han incidido en la fase pasiva de la natación, estudiando la resistencia asociada a la misma y las formas de minimizarla. Vorontsov y Rumyantsev [3] calcularon la relación existente entre las distintas formas de resistencia que se producen en esta fase

de la natación, lo cual veremos con más detalle en el capítulo 2.2.

Lyttle demostró que para profundidades de deslizamiento mayores a 0,6 m puede tenerse únicamente en cuenta la resistencia causada por presión, mientras que para profundidades menores la resistencia causada por las olas ha de tenerse en cuenta [4].

Los estudios realizados mediante CFD son aún limitados. Bixler fue el primero que en 1997 reconoció las posibilidades del CFD en esta materia y lo aplicó en estudios posteriores, uno en 2002 [5] donde estudiaba las fuerzas hidrodinámicas que se producían por el antebrazo y otro en 2007 [6], analizando mediante CFD la resistencia hidrodinámica de la fase pasiva del movimiento.

Un estudio de Lyttle en 2006 [7] trató de abordar un análisis de mayor complejidad, el estudio de la patada de delfín. Sin embargo lo hizo en una aproximación cuasi-estática, es decir, estudiando de forma estática varias posiciones del movimiento. Sin embargo esta aproximación supone muchos errores, pues el movimiento estudiado es plenamente transitorio. Por tanto, los torbellinos producidos de forma estacionaria no serán comparables con los producidos en un caso transitorio. Además, un análisis cuasi-estacionario no contemplará la resistencia producida por la masa aparente (se verá en el capítulo 2.2) y los resultados no pueden tomarse más que como referencia de órdenes de magnitud.

Sin embargo, el estudio CFD más próximo al que con este proyecto se persigue fue realizado por von Loebbecke en 2009 [8]. En él, estudió de forma transitoria la resistencia y propulsión generadas por la patada de delfín, prestando especial atención a los contornos de velocidad y vorticidad producidos en la estela del nadador. Se vio con claridad el potencial que presenta el CFD para análisis similares, pues pudo observar que se producían en este tipo de patada torbellinos en forma de anillo muy similares a los que consiguen los propios cetáceos.

Finalmente, este proyecto se basa en el trabajo de final de grado realizado por Hernández en 2017 [9] y representa su continuación. Hernández estudió el nado de crol de forma cuasiestática, de igual forma que hizo Lyttle con la patada de delfín [7].

Vistos los principales estudios realizados hasta el momento en la materia de este proyecto, se puede entender dónde sitúa. Este Trabajo de Final de Grado realizará un estudio transitorio pero teniendo en cuenta el movimiento de brazada de un nado estilo crol, a diferencia del estudio de von Loebbecke que estudió la patada. También completa el trabajo realizado por Hernández, pues estudió el movimiento en su parte pasiva, mientras que en este caso se estudiará su parte activa, es decir, un movimiento continuo y transitorio.

1.2. Motivación y objetivos

En este proyecto se aplican los conocimientos aprendidos durante el Grado de Ingeniería Aeroespacial, tanto teóricos, como prácticos, pues se realiza un estudio mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

El proyecto culmina el Grado de Ingeniería Aeroespacial. Pese a que no parezca existir relación alguna entre la materia estudiada durante los cuatro años del grado y lo que en este proyecto se pretende analizar, sí están muy relacionados. En el Grado se ha estudiado en detalle y profundidad la aerodinámica que envuelve a perfiles, alas y otros cuerpos

habituales en la ingeniería aeroespacial. Se ha visto cómo se producen las fuerzas aerodinámicas (sustentación y resistencia) y qué se ha cambiado en cuanto a formas, tamaños y materiales a lo largo de la historia de la aeronáutica para mejorar las eficiencias. Pues bien, analizar el movimiento de un nadador no es sino aplicar los mismos conocimientos para otra geometría, pues no deja de ser un cuerpo inmerso en un fluido y las fuerzas que aparecen son las mismas que se obtienen en perfiles y alas. Por tanto, es una de las principales motivaciones del estudio poder extender todo el conocimiento obtenido durante la carrera en cualquier área, demostrando así la versatilidad que tiene un ingeniero aeronáutico.

Podemos dividir los objetivos perseguidos en tres categorías. En primer lugar, los objetivos profesionales son los siguientes:

- Trabajar dentro de un entorno de trabajo profesional y controlado.
- Tomar contacto con el mundo laboral, pues el trabajo tutorizado se asemeja a unas prácticas en empresa.
- Aprender a trabajar en equipo, pues aunque sea un trabajo individual se realizado junto con otros muchos compañeros y se vuelve necesaria la cooperación interna.

En cuanto a los objetivos académicos:

- Finalizar el Grado en Ingeniería Aeroespacial.
- Plantear y superar retos personales, realizando un trabajo original, individual y distinto a cualquier otro.
- Aprender a organizar un trabajo de largo recorrido, estableciendo hitos a superar y plazos.
- Analizar la evolución histórica que se ha producido en la natación, tanto a nivel de técnica de natación como de materiales en los bañadores de competición.

Los objetivos propios como técnico CFD son:

- Realizar una revisión bibliográfica de estudios relacionados realizados con anterioridad.
- Estudiar los diferentes tipos de fuerzas hidrodinámicas producidas por el cuerpo del nadador de forma teórica.
- Usar el software comercial STAR-CCM+ para hacer estudiar la resistencia activa causada por el nadador al realizar la brazada.
- Realizar un análisis CFD de principio a fin, teniendo que modelar todo el caso.
- Experimentar a fondo el uso de la técnica de malla *overset* y conocer su potencial.

Para esto último se requerirá de un diseño 3D del *dummy* de un nadador que se obtendrá de la comunidad de diseños 3D GrabCAD y será optimizado para adoptarlo a la postura deseada mediante AUTODESK INVENTOR.

El principal reto de este proyecto será, por tanto, conseguir que el *dummy* realice el movimiento de brazada por medio del software de cálculo STAR-CCM+, lo cual entraña

una enorme dificultad. Se han realizado numerosos estudios del deslizamiento de un nadador, es decir, sin movimiento de propulsión, pero no se ha simulado todavía en CFD el ciclo completo de nado como en este proyecto se pretende.

Para ello se hará uso de la técnica de malla *overset*, una técnica disponible en STAR-CCM+ que abre un nuevo mar de posibilidades para poder realizar proyectos aún más ambiciosos. Por tanto, es objetivo también principal probar esta técnica para hacer simulaciones de movimiento corporal y saber hasta dónde se puede llegar con ella dentro de las limitaciones computacionales con las que se cuenta para realizar el proyecto.

La técnica de malla *overset* ha demostrado su capacidad para realizar simulaciones de, por ejemplo, embarcaciones que se mueven a causa de las olas del mar, o el lanzamiento al agua de un bote salvavidas, así como la simulación del lanzamiento de un misil (figura 1.1), por lo que se quiere probar su valía también para realizar movimientos relativos entre distintas partes del cuerpo al antojo del programador.

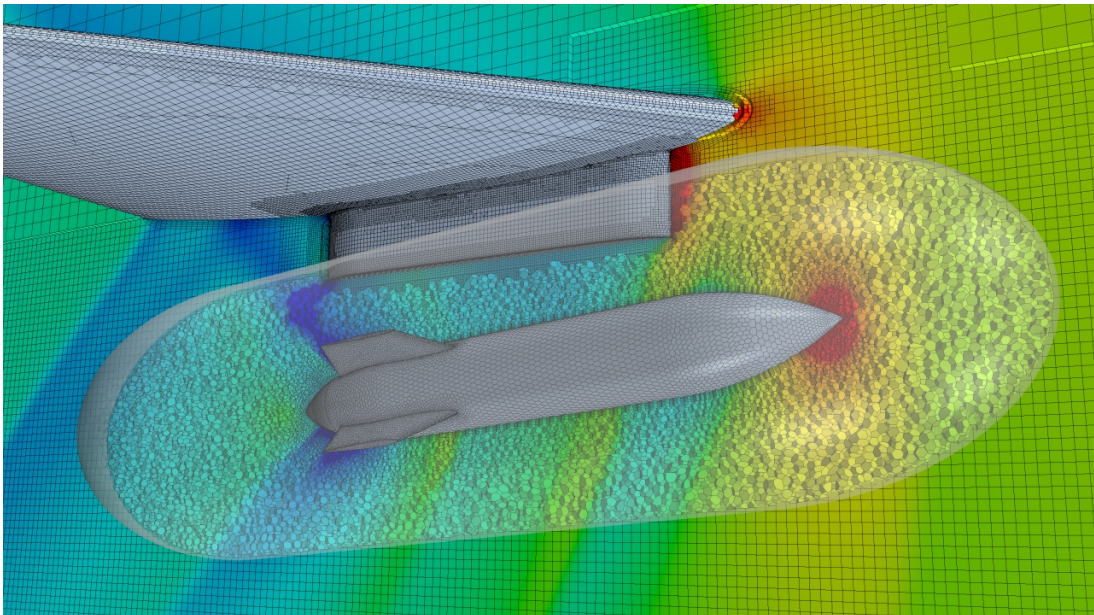


Figura 1.1: Simulación de lanzamiento de un misil mediante malla *overset*

1.3. Historia de la natación

Desde los principios de los tiempos el ser humano ha vivido rodeado de agua y no ha tenido otro remedio que adaptarse al medio y nadar, al principio para poder pescar y con el paso de los años por diversión.

La primera referencia segura que se tiene de la natación se remite a los antiguos egipcios, alrededor del 2000 a.C. cuando un escriba dejó constancia escrita de que los hijos de los faraones recibían clases de natación en las orillas del río Nilo [10]. Más tarde, alrededor del 1200 a.C. existen ilustraciones que muestran a los soldados del faraón Ramsés II nadando a través del río Orontes para escapar de los Hititas. En esta ilustración y otras posteriores se ven movimientos únicamente de brazos por encima y por debajo de la superficie del agua, pero no se aprecia ningún tipo de movimiento propulsivo utilizando las piernas [10].

La importancia de la natación fue cobrando importancia y allá por el 700 a.C., en Grecia se tenía una educación basada en las letras, la música y la actividad física, siendo la natación una de las principales actividades físicas, como demuestra una antigua ley atribuida a Solón que decía que todo niño debía saber letras y nadar [10].

Posteriormente en el imperio romano (300 a.C.) se realizaban competiciones de natación como forma de entrenamiento de los jóvenes guerreros y saber nadar cobraba importancia en la guerra, pues se tiene constancia del César nadando de un barco a otro cuando su nave fue destruida.

Sin embargo, la importancia y popularidad que tenía la natación como deporte en la sociedad no quedó de manifiesto hasta 1896, cuando el barón francés Pierre de Coubertin promovió la resurrección de los Juegos Olímpicos. En estos primeros Juegos Olímpicos modernos, que se realizaron en Atenas, participaron 241 atletas masculinos de 14 países que compitieron en diversas disciplinas de 9 deportes, entre los cuales se situaba la natación. Desde entonces la natación ha sido siempre deporte olímpico y ha seguido posicionado como uno de los deportes más populares.

Las pruebas de natación de los Juegos Olímpicos de 1896 fueron considerablemente diferentes a las que se realizan en la actualidad, pues se realizaron en mar abierto, donde las competiciones fueron de 100, 400 y 1500 metros. Para la prueba más larga, se transportaba a los participantes en barco para que volvieran solos. El agua estaba fría y el oleaje de la bahía de Zea complicaba aún más la correcta realización de las pruebas. Cuando el húngaro Alfréd Hajós ganó la prueba de 1200 metros dijo que su mayor motivación fue sobrevivir más que ganar la carrera [11].

Desde aquel año 1896 la natación no ha faltado en ninguno de los Juegos Olímpicos disputados cada cuatro años. En los Juegos Olímpicos de 1904 se incluyó por primera vez una diferencia entre estilos de natación, pues los eventos, además de distancia especificaban si se trataba de estilo libre o braza.

Tras los Juegos Olímpicos de 1908 se creó la Federación Internacional de Natación (FINA), fundada por representantes de Bélgica, Dinamarca, Alemania, Francia, Finlandia, Suecia, Reino Unido y Hungría. El objetivo de su creación era el de unificar las normas internacionales que regían el deporte de la natación y administrar las competiciones internacionales de natación. Unos años más tarde, en 1926 se fundó la Liga Europea de Natación (LEN) con el objetivo de empezar a celebrar, desde ese mismo año, campeonatos europeos de natación, que se realiza cada dos años en los años pares desde el 2000. Estos campeonatos se llevan a cabo en una piscina de 50 metros para las pruebas de natación, aunque también existe un Campeonato Europeo de Natación en Piscina Corta y en aguas abiertas.

Por su parte, la FINA, organizó el primer Campeonato Mundial de Natación en 1973 y se efectúa en cada año impar, alternándose por tanto con los europeos. Tanto en los campeonatos europeos y mundiales como en los Juegos Olímpicos se realizan multitud de eventos de natación, variando distancias y disciplinas. Actualmente las disciplinas en las que se compete en natación son: estilo libre, espalda, braza, mariposa y cuatro estilos.

1.4. Evolución de la técnica de natación

Como se ha visto ya en el apartado 1.3, en el pasado, dicese de las antiguas épocas de los egipcios, griegos y romanos, se nadaba sin una técnica concreta, con movimientos

aleatorios de brazos y piernas, aunque fueron perfeccionándose con el paso del tiempo y la creciente popularidad de la natación. Sin embargo, no fue hasta mediados del siglo XIX cuando se desarrollaron concretas técnicas que incrementaran la rapidez en el nado. Esto fue así debido a que fue en esta época cuando se empezaron a construir piscinas destinadas no sólo al baño, se produjo la invención del cronómetro y comenzaron las competiciones deportivas [12].

En los siglos XVI y XVII se solía emplear un estilo braza un tanto diferente al actual: se mantenía la cabeza siempre fuera del agua y quieta y la propulsión se realizaba dando patadas con el empeine en vez de una patada de rana. Ya en el siglo XIX se adoptó la patada de rana, pero de formas un tanto extrañas, pues tenían la concepción de que era la suela del pie la que proporcionaba impulso, lo cual es totalmente erróneo.

De la braza se pasó a una técnica de nado natural, al comprobar que así obtenían una propulsión más eficiente y con menos resistencia. En esta técnica el movimiento de recuperación del brazo lo hacían en el aire y no debajo del agua y la propulsión mediante las piernas se efectuaba meneándolas como una tijera. Es decir, era una primera aproximación a lo que es el crol actual.

La técnica de crol emergió a principios del siglo XX, gracias en parte a los hermanos Dick y Tums Cavill y Syd Davis, quien en una visita a Samoa vio la eficacia de una nueva técnica de nado en que se realizaba una brazada por el aire y sin usar las piernas, y decidió adoptar la técnica y mejorarla. Tums y Syd compitieron entre sí para probar la eficacia de la técnica y comprobaron que ganaba quien no usaba las piernas. Dick Cavill se sorprendió de estos resultados y se propuso a encontrar un movimiento de piernas que sí fuera eficaz. Tras probar algunos decidió presentarse al campeonato de 100 yardas con un movimiento de piernas usado por los nativos de Colombo. Dick no ganó, pues no tenía la técnica aún perfeccionada pero sorprendió a todos los allí presentes. El movimiento, conocido como crol, se expandió rápidamente y se dedicaron grandes esfuerzos en mejorarlo. Casi cien años más tarde el crol sigue siendo la técnica de nado más rápida y la más popular a nivel recreativo y competitivo [12].

1.5. La ingeniería en el deporte

Hace tiempo la ingeniería y el deporte eran dos ámbitos separados totalmente y nada parecía indicar que se fueran a relacionar. Sin embargo, en la actualidad la ingeniería es una de las técnicas más influyentes a la hora de perfeccionar tanto las técnicas como los materiales y formas empleadas en el deporte.

El exponente más claro de esta relación es la F1, pues el rendimiento de los monoplazas está directamente relacionado con tanto la aerodinámica del chasis como de las características propulsivas del motor. Es por ello que se realizan numerosos estudios CFD para evaluar los diseños realizados y mejorarlos, resultando en un proceso iterativo en continua evolución.

También en muchos otros deportes se han empezado a aplicar técnicas de CFD y los conceptos aerodinámicos para mejorar rendimientos, como en el ciclismo (ver figura 1.2), donde un buen estudio de la posición del ciclista y del casco puede ayudar a disminuir la resistencia generada y, por tanto, el tiempo.

Más allá de simulaciones de dinámica de fluidos computacional, también la ingeniería

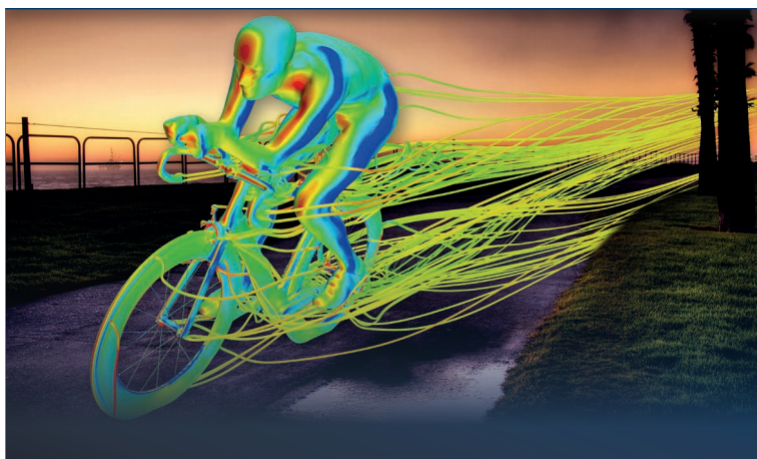


Figura 1.2: Simulación de las líneas de corriente sobre un ciclista en STAR-CCM+

de materiales ha permitido un gran avance en las competiciones deportivas. Para el caso de la F1 o de la navegación a vela han sido los materiales compuestos los que se han vuelto esenciales para un mayor rendimiento. En el caso de la natación la evolución en materiales resultó en el bañador LZR Racer de Speedo. Este bañador, compuesto de un tejido de nylon-elastano y poliuretano era ultra ligero y además repelente de agua, lo cual lo hacía más ligero al no absorber líquido como sí lo hacen otros bañadores. Esto hacía disminuir en gran medida la componente de drag de fricción generado por el cuerpo del nadador [13]. Además, un estudio biomecánico [14] concluyó que al ser tan ajustado reduce la circulación sanguínea del nadador. Esto acelera el sistema de glucólisis anaeróbica y disminuye el sistema de respiración mitocondrial aeróbico, resultando en un aumento de la fuerza en las fibras blancas de los músculos de los nadadores, sobretodo en carreras de distancia corta.



Figura 1.3: Michael Phelps llevando el bañador LZR Racer de Speedo en un evento promocional

El diseño del bañador (figura 1.3) tuvo un gran éxito, pues en los Juegos Olímpicos de Pekín 2008 el 94% de las carreras las ganaron nadadores que llevaban este bañador. Además, en un año de uso del bañador se rompieron 93 récords mundiales por nadadores que lo usaban, lo cual dejaba muy a las claras el gran beneficio que suponía llevarlo.

Para evitar lo que se llamó como 'doping tecnológico' la FINA modificó su normativa y prohibió este tipo de bañadores. Con el avance en materia de bañadores limitado por las regulaciones de la FINA, las investigaciones de ingeniería para la natación encuentran en el CFD el mejor aliado para hacer estudios de técnica de nado para seguir batiendo récords.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Índice

2.1. Introducción	9
2.2. Fuerzas hidrodinámicas	9
2.2.1. Resistencia hidrodinámica	10
2.2.2. Sustentación hidrodinámica	15
2.3. Mecánica de Fluidos Computacional: CFD	16

2.1. Introducción

El ser humano es un animal terrestre. Ha evolucionado hacia formas biomecánicas que le facilitan desplazarse andando o corriendo y es capaz de realizar movimientos precisos que no están al alcance del resto de animales. Sin embargo, no ha evolucionado para adaptarse al medio marino y no presenta eficiencias tan grandes para la natación como los peces.

A pesar de su poca predisposición natural para nadar eficazmente la técnica de natación ha evolucionado mucho y ha permitido al ser humano maximizar todas sus posibilidades y conseguir una mejora continua. Esto ha sido posible gracias a los conocimientos aprendidos en otras ramas de la ciencia, como por ejemplo la aerodinámica y la biomecánica.

Es por eso que resulta esencial conocer las fuerzas implicadas en la natación para tratar de minimizar aquellas que dificultan el movimiento y maximizar las que lo favorecen.

En este capítulo se analizará la teoría que envuelve al estudio que se realizará. Por una parte se detallarán las fuerzas que comprende la natación y su origen y posteriormente se explicarán los modelos empleados en el software de Mecánica de Fluidos Computacional para poder realizar el análisis posterior.

2.2. Fuerzas hidrodinámicas

El rendimiento de los nadadores depende en gran medida de cómo interacciona el flujo con el nadador. Además, al ser el agua un fluido mucho más denso que el aire ($\rho_w = 997,561 \text{ kg/m}^3$, $\rho_a = 1,18415 \text{ kg/m}^3$) la importancia de reducir al máximo las fuerzas que frenan el avance es aún mayor. Esta interacción produce una serie de fuerzas hidrodinámicas como son lift y drag. El lift es la fuerza perpendicular a la velocidad a la que se mueve el nadador (aunque mayoritariamente se adopta por convención que es el

fluido el que se mueve y el objeto el que está en reposo) y que tiende a elevar al nadador, mientras que el drag es la fuerza en la componente longitudinal de la velocidad y tiende a frenarlo.

Es necesario tener en cuenta que las fuerzas que aparecerán serán distintas si se estudia el caso en el que el nadador está en reposo, durante la fase de deslizamiento o si está moviéndose para propulsarse. La fase de deslizamiento, que en competición suele ser una fase totalmente sumergida tras tirarse de cabeza a la piscina o tras los giros, se conoce también como pasiva, pues el nadador no realiza ningún movimiento. A la fase de natación puramente dicha, en la que se realiza un movimiento de brazada y patada distinto en función del estilo de natación empleado, se la conoce también como activa.

Veamos entonces la naturaleza de estas fuerzas.

2.2.1. Resistencia hidrodinámica

La resistencia hidrodinámica total generada por el avance del nadador al deslizarse a través del fluido puede calcularse empleando la fórmula:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_D \quad (2.1)$$

Donde será muy importante la velocidad a la que se está moviendo el flujo, su superficie frontal, la densidad del fluido (que no dependerá de la eficiencia del nadador y, por tanto, no será motivo de análisis) y del coeficiente de resistencia, C_D , un coeficiente adimensional que dependerá en gran medida del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.2)$$

Siendo en este caso L la distancia característica del problema (para este caso sería la longitud del nadador) y μ la viscosidad dinámica del fluido (para el agua $\mu = 0,987 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$).

El número de Reynolds es un factor recurrente en la mayoría de estudios de dinámica de fluidos pues determina la importancia de las fuerzas inerciales (términos del numerador) respecto de las viscosas (término del denominador). Así, si el número de Reynolds es bajo, los términos viscosos serán relevantes y, por tanto, se podría considerar que el flujo es laminar, mientras que para Re altos el flujo se vuelve turbulento al perder importancia las fuerzas viscosas.

El flujo turbulento se puede producir cuando aparece alguna perturbación en el fluido a velocidades suficientemente altas, así como dentro de la capa límite alrededor de sólidos cuando la fricción es suficientemente importante (Re altos). La capa límite se define como la parte del fluido contigua al cuerpo sólido en la cual el flujo está sometido a fricción y la velocidad del mismo se adapta desde cero (por la condición de no-deslizamiento de la capa de fluido directamente en contacto con el sólido) a la velocidad desarrollada sin la intervención de las fuerzas viscosas. En el caso de la natación, el flujo se puede volver turbulento tanto en las fases pasivas del movimiento como en las activas [3].

Según un estudio realizado por Clarys en 1979 [15] los números de Reynolds de los nadadores de competición se sitúan entre $2 \cdot 10^5$ y $2,5 \cdot 10^6$. Estos valores se sitúan dentro del rango de valores altos de Re , por lo que presumiblemente las fuerzas inerciales serán

dominantes y, por tanto, la capa límite será turbulenta.

Para entender mejor cómo se genera la resistencia hidrodinámica, ésta puede descomponerse en la contribución de fuerzas más elementales de distinta naturaleza:

- Resistencia de fricción
- Resistencia de presión
- Resistencia de olas

Por lo que la resistencia hidrodinámica total será:

$$F = F_{fric} + F_{press} + F_{wave} \quad (2.3)$$

Siendo la componente de presión la que más relevancia tiene (94,9%) respecto a las otras (0,05% fricción y 5% olas) [3]. Sin embargo es necesario estudiar cada una de ellas para saber cómo reducirlas, pues en competición cualquier milésima ganada cuenta.

Resistencia de presión

La resistencia de presión se produce por la presión que ejerce un fluido en movimiento respecto de cualquier sólido que intercepte. Por tanto esto es aplicable para un cuerpo moviéndose respecto de un fluido estacionario.

El principio de Bernoulli establece que la presión total a lo largo de una línea de corriente se mantiene constante. Esto justifica la aparición de la resistencia por presión, pues un cambio en la energía cinética a lo largo de una línea de corriente lleva aparejada un cambio de presión proporcional. La ley de Bernoulli se puede expresar como:

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p = cst. \quad (2.4)$$

Siendo el término $\frac{1}{2}\rho V^2$ la energía cinética del fluido y p la presión estática.

La resistencia de presión se produce por la diferencia de presión del fluido entre aguas arriba (antes de encontrarse con el cuerpo) y aguas abajo (una vez superado el cuerpo) debida a la separación de la capa límite [16]. Cuando el fluido se encuentra con el nadador, no puede seguir su curso normal y es obligado a desviarse para seguir la curvatura del cuerpo. Sin embargo el flujo no puede permanecer adherido a la superficie del nadador a lo largo de toda la longitud del mismo, y la capa límite se desprende en un determinado punto. Antes de llegar al desprendimiento el fluido se ve alterado por la forma del nadador, su velocidad, la densidad del fluido y el área frontal del nadador, mientras que una vez se ha desprendido la capa límite el fluido interacciona con el flujo exterior y empiezan a formarse torbellinos [16], por lo que la velocidad de los mismos es muy baja, generando como predice el principio de Bernoulli una diferencia de presión entre las partículas fluidas anteriores y posteriores al nadador. Esto ocurre siempre a las velocidades habituales de nado, pues como ya se ha visto los números de Reynolds comunes en natación suponen flujo turbulento. Si la velocidad de nado fuera muy baja, tal que el número de Reynolds supusiera flujo laminar, entonces la capa límite no se desprendería con tanta facilidad y el gradiente de presiones generado sería menor, y con ello menor sería también la resistencia de presión.

Una forma de obtener una menor resistencia por presión sería tener un flujo completamente laminar. Esto no es posible debido a que para ello la superficie debería ser

totalmente lisa y darse a unas velocidades casi nulas, lo cual no produce ningún beneficio en la natación. Otra perspectiva es la de forzar el flujo a ser turbulento siempre, lo cual consigue que no se produzca un temprano desprendimiento de la capa límite debido a que las capas límite turbulentas son más energéticas que las laminares. Esto podría conseguirse mediante específicos diseños de bañadores, aunque prohibidos los bañadores que cubren por completo el cuerpo del nadador no podría implementarse plenamente. Esta perspectiva sería la misma que se persigue en el diseño de las pelotas de golf que están llenas de pequeños agujeros.

Esta resistencia también se puede disminuir adoptando una posición que haga que la superficie del nadador no tenga giros bruscos a los que el fluido es incapaz de adaptarse. Por tanto, se ha de intentar que el cuerpo esté lo más recto posible puesto que cuanto mayor sea el ángulo formado por el cuerpo con la dirección del movimiento mayor será el área frontal y más brusco será el salto tras el nadador, formándose torbellinos más grandes y más resistencia.

Resistencia de fricción

La resistencia de fricción es la que se genera en la capa límite, como ya se ha visto anteriormente. Es el resultado de la fricción viscosa entre la superficie del sólido y las partículas fluidas que se mueven alrededor del cuerpo.

Tomamos el sistema de referencia inverso y asumimos que el nadador está en reposo y el fluido se mueve a una determinada velocidad. Por tanto, para que se respete la continuidad del medio fluido no puede estar todo el fluido en movimiento si está en contacto con un cuerpo quieto. Es decir, que las partículas fluidas pegadas a la superficie del cuerpo han de llevar la velocidad del cuerpo (velocidad nula desde la perspectiva tomada) y adaptarse gradualmente hasta alcanzar la velocidad no perturbada (habitualmente se considera que esta adaptación finaliza al alcanzar el 99 % de la velocidad no perturbada), como se puede observar en la figura 2.1. En esta transición de la velocidad desde cero hasta el 99 % de la velocidad no perturbada (que definirá la capa límite) las partículas fluidas dentro de la capa límite pierden cantidad de movimiento con respecto a las mismas partículas fluidas antes de encontrarse con el cuerpo, lo cual resulta en una fuerza de resistencia, pues existe una zona del fluido en el que su velocidad es inferior a la velocidad no perturbada.

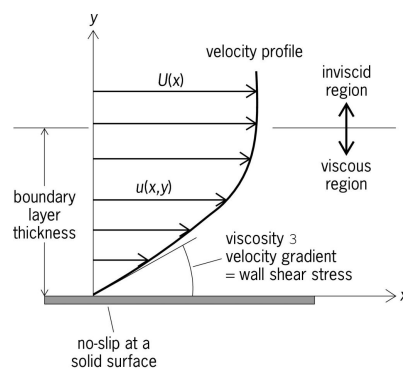


Figura 2.1: Perfil de velocidades dentro de la capa límite

Esta fuerza de resistencia causada por fricción puede calcularse como:

$$F_{fric} = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_{fr} \quad (2.5)$$

Donde S será la superficie mojada del cuerpo y C_{fr} el coeficiente de fricción. La resistencia de fricción dependerá entonces de la superficie del cuerpo que está sumergida así como del número de Reynolds (cómo es la capa límite) y de la rugosidad de la superficie.

Por una parte, capas límites turbulentas significarán una mayor resistencia de fricción, pues la formación de torbellinos usa energía cinética del nadador (o del fluido en movimiento en este caso).

Por otra parte, cuanto más rugosa sea la superficie del cuerpo (en caso del nadador su piel, pelo y bañador) mayor será la resistencia de fricción ya que la rugosidad favorece la aparición de torbellinos en la capa límite.

Visto por qué motivos se genera resistencia por fricción en el nado podemos averiguar cómo reducirla. Puesto que la resistencia por fricción dependerá de la suavidad de las superficies el afeitado del cuerpo se ha demostrado que reduce el esfuerzo que tiene que realizar el nadador y aumenta la distancia recorrida por cada brazada.

También el bañador es parte esencial para reducir la resistencia por fricción, pues ya lo demostró el bañador LZR Racer de Speedo. En este caso, materiales que repelan el agua y que sean muy finos y elásticos para adaptarse perfectamente a la superficie del cuerpo del nadador reducirán la resistencia causada por fricción.

Resistencia de olas

La resistencia de olas es la producida debida a la aparición de olas en la superficie del fluido causadas por el propio nadador. Esto ocurre cuando el nadador se desplaza sobre la superficie del agua o a pequeña profundidad, ya que las olas se disipan.

El cuerpo, en su trayectoria, desplaza agua formando olas, moviéndose el agua desde las zonas de alta presión hacia las zonas de baja presión, siendo alta presión el volumen de agua pegada al cuerpo, que es empujada hacia fuera por el cuerpo y baja presión la superficie libre en contacto con el aire y con el agua en reposo. Este movimiento de agua se produce a cambio de una energía mecánica que es producida por el nadador, generando por tanto resistencia. Además, la velocidad del nadador será superior a la velocidad a la que se desplaza la ola, por lo que el nadador interceptará la ola generando aún más resistencia que la propia derivada de la generación de la ola. La fuerza de resistencia generada por la creación de olas es proporcional a la energía contenida por la ola primaria y se puede calcular como [3] :

$$F_{wave} = \rho \frac{A^3}{\lambda^2} (V \sin \alpha)^3 \cos \alpha \Delta t \quad (2.6)$$

Donde:

- A es la amplitud de la ola.
- λ es la longitud de la ola.
- V es la velocidad de la ola, que será igual a la velocidad de nado.
- Δt es la unidad de tiempo.

- α es el ángulo formado entre las direcciones de movimiento del centro de gravedad del cuerpo y de la ola.

Se puede observar que la importancia de la velocidad aquí es cúbica, por lo que aumentos de velocidad conllevarán grandes aumentos de resistencia debido a las olas. Al aumentar la velocidad también lo hará la amplitud y longitud de las olas, de manera que llega un punto llamado velocidad de desplazamiento en que la longitud de la ola es igual a la longitud del cuerpo del nadador, de tal forma que el nadador se encuentra siempre entre dos crestas de ola y cualquier aumento de velocidad será inhibida, convirtiéndose en una especie de velocidad límite.

Esto se puede estudiar desde el llamado número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (2.7)$$

Siendo V la velocidad de nado, g la gravedad y L la longitud del nadador (su altura). La velocidad de desplazamiento se da para un número de Froude de $Fr = 0,42$, momento en el que la longitud de la ola es igual a la altura del nadador. Un menor número de Froude supondrá que el nadador viaja a una velocidad menor o que, para una determinada velocidad de nado, el nadador es más alto.

Para disminuir la resistencia causada por la formación de olas es esencial tener una buena técnica de nado. Las olas generadas serán mayores cuanto mayor sea la superficie que rompe la tensión superficial del agua. Por tanto, introducir en el agua primero los dedos y progresivamente la mano y el resto del brazo aprovechando la zona donde ya se ha roto la tensión superficial ayuda a reducir la resistencia.

También es beneficioso estirar el brazo por completo en la fase de recobro de la brazada para aumentar su longitud al entrar en el agua, lo que supone un menor número de Froude para una determinada velocidad.

Por último, resulta también en una menor resistencia de olas realizar un giro llamado rolo, en el que el nadador rota respecto de su propio eje longitudinal, de manera que el cuerpo está sin ángulo de rolo cuando uno de los brazos se encuentra totalmente estirado y gira de tal forma que facilita la extracción del brazo del agua, como se puede observar en la figura 2.2.



Figura 2.2: Movimiento de rolo en natación

Masa aparente

Por último, cabe mencionar el efecto de la llamada masa aparente [16]. Es un fenómeno no-estático que se produce cuando un cuerpo se mueve dentro de un fluido. Alrededor del

cuerpo una región del fluido se acelera instantáneamente, de tal forma que produce una fuerza debida a que, el nadador en este caso, ha de mover no sólo su cuerpo sino esa masa aparente que se acelera con él. Este efecto es el mismo que se produce en un perfil aerodinámico que vibra y que ha de tenerse en cuenta para análisis aeroelásticos.

Este fenómeno no representa la mayor resistencia producida en el movimiento de natación, pero no tenerla en cuenta significa alejarse de la realidad. Es por ello que análisis cuasi-estacionarios no pueden tener en cuenta el efecto de la masa aparente y los valores obtenidos serán menores a los reales.

Para el caso de natación, esta masa aparente se situará sobretodo en la capa límite del cuerpo así como en la estela. Una manera de calcular esta masa aparente se encuentra en [17]:

$$M_a = C_a \cdot V \cdot \rho \quad (2.8)$$

Siendo M_a la masa aparente a calcular, C_a el coeficiente de masa aparente, V es el volumen del cuerpo y ρ la densidad del fluido.

Resistencia activa

La resistencia activa es la resistencia causada por el movimiento corporal, en natación para el caso que nos atañe.

La naturaleza de las fuerzas envueltas es la misma que para la resistencia pasiva: resistencia por presión, fricción y olas. Estudios [18] han demostrado que la relación de la resistencia activa con la velocidad es cuadrática, lo cual pone de manifiesto que la principal componente de la resistencia será la causada por presión, tal y como ocurre con la resistencia pasiva.

Sin embargo, en la resistencia activa intervienen muchos más factores que en la resistencia pasiva. Además de la forma y tamaño del cuerpo cobran mucha importancia los movimientos realizados y las características antropométricas y mecánicas del cuerpo [3].

2.2.2. Sustentación hidrodinámica

La fuerza de sustentación es la fuerza aerodinámica o hidrodinámica (dependiendo de la naturaleza del fluido) que se produce en la dirección perpendicular a la velocidad del fluido. En el caso de la aeronáutica, esta fuerza es la que se emplea para vencer el peso del avión o para ascender.

En natación, la fuerza de sustentación no se emplea para tanto para mantenerse a flote (puesto que la fuerza de flotación es mucho mayor) sino para propulsarse. Cuando la mano y el brazo se introducen en el agua, ésta pasa por encima y por debajo del mismo, de tal forma que si la mano se curva de manera correcta por una parte se incrementará la velocidad del fluido y provocará un gradiente de presiones entre la palma y la parte superior de la mano que generará una fuerza, como se puede ver en la figura 2.3.

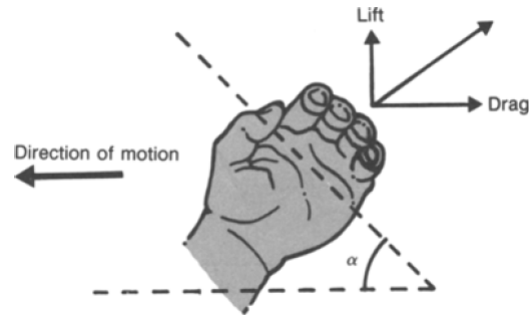


Figura 2.3: Fuerzas hidrodinámicas producidas por la mano

Para maximizar la utilización de esta fuerza, el movimiento subacuático de la mano y el brazo no se realiza totalmente en la dirección opuesta al movimiento deseado del nadador, sino que se realiza en un recorrido serpenteante (ver figura 2.4) que maximiza el tiempo en que se está produciendo esta fuerza [18].

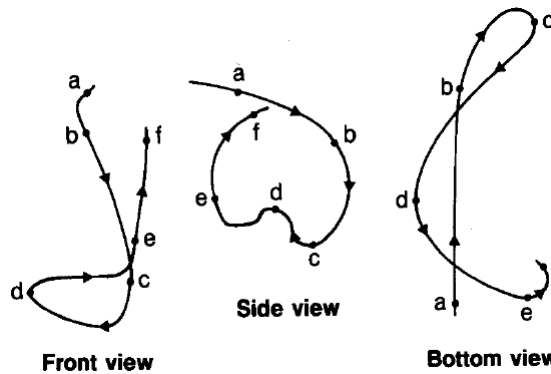


Figura 2.4: Recorrido de la mano durante la brazada de crol

Las piernas también generan fuerza de sustentación en su movimiento de patada vertical de la misma forma que lo hacen la mano y antebrazo, pero es mayor la fuerza obtenida mediante la brazada que mediante la patada.

También el cuerpo en sí mismo genera sustentación cuando se encuentra inclinado respecto a la superficie del agua. En este caso, cuanto mayor sea el ángulo que forme mayor será la componente vertical (sustentación) de la fuerza generada por el cuerpo, pero también será mayor la superficie frontal incrementando en gran medida la resistencia, por lo que este fenómeno no es deseable.

2.3. Mecánica de Fluidos Computacional: CFD

La mecánica de fluidos computacional (CFD) es la ciencia que estudia la simulación numérica de flujos de fluidos. El software empleado para este proyecto es STAR-CCM+ desarrollado en 2004 por la empresa americana CD-adapco (Computational Dynamics-Analysis and Design Application Company Ltd) y actualmente propiedad de Siemens.

El CFD se ha vuelto cada vez más popular debido a que permite obtener resultados de forma mucho más barata que realizando los experimentos equivalentes. Sin embargo no

permite realizar cualquier tipo de análisis, pues el coste computacional de cálculos muy complejos exactos puede ser excesivamente grande para lo que la industria requiere. Por tanto, se ha convertido en un excelente complemento al estudio en túnel de viento. Cada vez la investigación en materia de CFD consigue que los procesos sean cada vez más rápidos y más exactos, permitiendo ya simular flujos complejos como flujo transónico.

Un análisis mediante CFD funciona de la siguiente forma:

- Se discretiza el dominio en celdas, lo que se conoce como malla.
- Se plantean las ecuaciones de conservación en cada celda.
- El sistema de ecuaciones en derivadas parciales se discretiza en un sistema de ecuaciones algebraicas para que sea posible su resolución.
- Se resuelve el sistema de manera iterativa.

Este proceso lo lleva a cabo el usuario del software en 3 bloques, que podemos diferenciar como:

- Preproceso, donde se genera la geometría, la malla y se seleccionan las condiciones de contorno y algoritmos de cálculo.
- El propio cálculo.
- Postproceso, donde se extraen los resultados en forma de escenas de contornos de magnitudes tales como presión, velocidad o vorticidad, gráficas X-Y o simplemente valores de fuerzas, coeficientes, etc.

Dentro del preproceso, es clave la correcta discretización del dominio, es decir, la generación de la malla. Se ha elegido, para discretizar el dominio de cálculo del que se dispone, los siguientes malladores (*meshers* en inglés):

- Surface remesher: Remalla la superficie inicial para generar una malla discretizada de calidad que sea apropiada para CFD [19].
- Trimmed mesher: Genera una malla volumétrica cortando una plantilla de malla hexahédrica con la superficie de la geometría [19].
- Prism layer mesher: Añade celdas prismáticas junto a las condiciones de contorno de pared. Estas celdas prismáticas sirven para captar los gradientes térmicos y viscosos en las paredes [19].

También cabe detallar los modelos numéricos empleados para el cálculo. En primer lugar cabe diferenciar el método numérico usado. En la mayoría de *software* CFD se puede elegir entre dos opciones: *Pressure-based* y *Density-based*. El primero de ellos emplea la ecuación de continuidad para obtener la ecuación de presión, mientras que el *density-based* emplea la ecuación de continuidad para obtener el campo de velocidades. Para el presente estudio se ha optado por el *pressure-based*, ya que es el modelo habitual para estudios de flujo incompresible (es decir, $M < 0,3$), mientras que el *density-based* resulta más útil para aquellos casos en que los efectos de la densidad, es decir, de la compresibilidad, son apreciables. Para el estudio del nadador las velocidades del flujo están muy alejadas de la compresibilidad, por lo que usar *density-based* carecería de sentido. Por esto mismo, también se seleccionarán, como se verá en el capítulo 3.7, modelos de gas y líquido de

densidades constantes.

Además, el método de resolución de las ecuaciones usado o *solver* es el llamado Método de Volúmenes Finitos (*Finite Volume Method* en inglés). Este modelo transforma las ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones algebraicas, discretizando las ecuaciones de forma temporal y espacial.

Cuando se introducen las relaciones constitutivas apropiadas en las ecuaciones de conservación (ecuaciones de Navier-Stokes) se obtiene un sistema de ecuaciones (que es el sistema que resuelve el *Finite Volume Method* que se puede expresar en términos de una sola ecuación, la llamada ecuación general del transporte (ec. 2.9) [19].

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi \cdot dV + \int_A \rho \mathbf{v} \phi \cdot d\mathbf{a} = \int_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{a} + \int_V S_\phi \cdot dV \quad (2.9)$$

Existen dos *solvers* que se basan en *Finite Volume Method*, el de flujo segregado y el de flujo acoplado. Se ha escogido el de flujo segregado porque tiene menores exigencias en cuanto a coste computacional. El *solver* de flujo segregado resuelve las ecuaciones de conservación de forma secuencial. En cambio, el *solver* de flujo acoplado resuelve las ecuaciones de forma simultánea, incrementando en gran medida las exigencias computacionales. El *solver* segregado emplea un algoritmo de acoplamiento presión-velocidad (pues se está resolviendo *pressure-based*) en el que la condición de conservación de la masa en el campo de la velocidad se cumple resolviendo una ecuación de corrección de presión-velocidad, resultando en un método numérico conocido como predictor-corrector.

El tratado de la turbulencia se puede llevar a cabo siguiendo dos enfoques distintos: el RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) y el LES (*Large Eddy Scales*). El método LES calcula las escalas grandes (*Large Scales*) de la turbulencia mientras que modela las escalas pequeñas. Esto significa que el coste computacional del método LES será muy elevado al calcular de forma exacta las escalas grandes de turbulencia. Se ha escogido por tanto el método RANS, que toma que cada una de las variables que intervienen en las ecuaciones de Navier-Stokes es la suma de una componente media y una componente perturbada fluctuante, es decir, que para una variable cualquiera ϕ se tendría (ec. 2.10):

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.10)$$

Al realizar este cambio y descomponiendo las ecuaciones se obtiene un sistema de ecuaciones para las variables medias, que será idéntico a las ecuaciones originales de Navier-Stokes salvo por un término de la ecuación del transporte de cantidad de movimiento, que tiene forma de tensor y se conoce como tensor de esfuerzos de Reynolds (ec. 2.11) [19]:

$$T_t = -\rho \begin{pmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

El tensor de esfuerzos de Reynolds (ec. 2.11) ha de modelarse, para lo cual se pueden emplear dos tipos de **modelo de turbulencia** distinto, de los cuales se ha escogido el

modelo de torbellinos viscosos (*Eddy Viscosity Models* en inglés). Estos modelos se basan en la analogía entre los procesos de difusión-gradiente molecular y el movimiento turbulento.

Existen distintos modelos que aplican esta analogía. Como se verá en el capítulo 4.3 se ha realizado un estudio para una correcta elección del modelo de turbulencia. Se ha usado el modelo $\kappa - \epsilon$, el $\kappa - \omega$ y el modelo Spalart-Allmaras, y se ha optado finalmente por usar Spalart-Allmaras como se desarrolla en el capítulo 4.3.

El modelo $\kappa - \epsilon$ se llama así porque resuelve la energía cinética turbulenta κ y el ratio de disipación turbulenta ϵ mediante dos ecuaciones.

El modelo $\kappa - \omega$ también emplea dos ecuaciones, para resolver, en este caso, la energía cinética turbulenta κ y el ratio de disipación turbulenta específico ω .

El modelo de Spalart-Allmaras es un modelo desarrollado en la industria aeronáutica para el estudio de la separación del flujo en perfiles. Obtiene la viscosidad de torbellino turbulento resolviendo una ecuación del transporte para la difusividad modificada. Resuelve una sola ecuación, a diferencia de los modelos anteriores, lo cual lo hace mucho más rápido pero potencialmente menos preciso.

Relacionado con el modelado de la turbulencia aparece el tratamiento de pared. En las paredes se forma la ya mencionada capa límite, dentro de la cual se tienen los fenómenos viscosos. El tratamiento de pared se efectúa en STAR-CCM+ en función del y^+ deseado. El y^+ es una distancia de pared adimensional que permite separar la capa límite en tres subcapas distintas (ver figura 2.5).

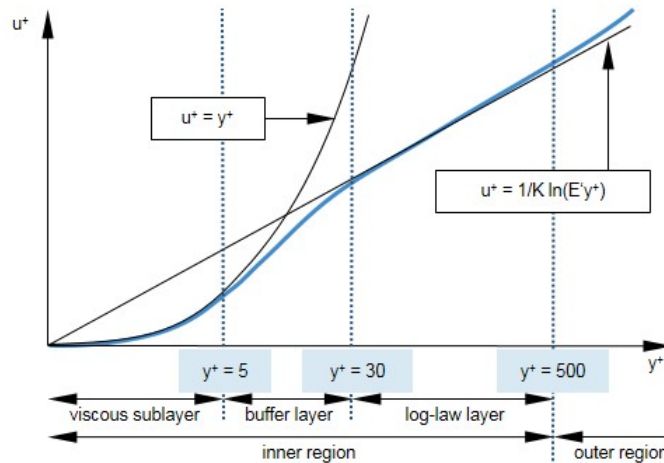


Figura 2.5: Subcapas en que se divide la capa límite según los valores de y^+

En la subcapa viscosa ($y^+ < 5$) el fluido en contacto con la pared está dominado por las fuerzas viscosas y es casi laminar. La velocidad media depende de la densidad del fluido, viscosidad, distancia de la pared y los esfuerzos tangenciales. En la subcapa logarítmica ($y^+ > 30$) dominan por igual los efectos viscosos y turbulentos. La subcapa *buffer* ($5 < y^+ < 30$) es una capa transicional de una a otra y no se puede resolver con exactitud.

Para el tratamiento de pared en este estudio se ha elegido el llamado *All y^+ treatment* que resuelve todas las zonas de subcapa viscosa y logarítmica y trata de modelar la subcapa *buffer*, ofreciendo respuestas razonables en esta subcapa. Se ha elegido este modelo puesto que se ha realizado una malla con $y^+ < 5$ en los brazos (partes móviles y donde se requiere más precisión) y con valores cercanos a $y^+ = 30$ en el resto del cuerpo. Así, se ha tratado de evitar caer de lleno en la subcapa *buffer*, aunque inevitablemente habrá zonas del cuerpo del nadador en esta subcapa.

Para este proyecto se ha realizado el estudio tanto con el nadador totalmente sumergido como con el nadador nadando en la superficie del agua. Por tanto, para el segundo caso se necesita un modelo que permita calcular **flujos multifase**, puesto que se tendrá aire y agua. Para ello se emplea el modelo *Eulerian Multiphase*. Puesto que este caso se encuadra dentro de flujos estratificados de superficie libre se usará el método del *Volume Of Fluid* (VOF), que captura la interfase de ambos fluidos al ser dos fluidos inmiscibles.

Es necesaria una buena resolución de malla para que VOF pueda predecir el movimiento y distribución de la interfase correctamente. Esta distribución de fases se calcula empleando como variable las fracciones volumétricas de cada fase (α_i) de tal forma que la fracción volumétrica se puede calcular como 2.12:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (2.12)$$

Donde V_i es el volumen de cada fase i y V el volumen total. Es evidente que la suma de las fracciones volumétricas de todas las fases debe sumar 1, ec. 2.13:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1 \quad (2.13)$$

La interfase será aquella zona en la que la fracción volumétrica de cualquier fase esté entre 0 y 1, pues 0 significa que no hay nada de fase i en dicha celda y 1 que sólo hay fase i en la celda. Todas las propiedades de las fases se pueden referir a estas fracciones volumétricas.

Finalmente, VOF permite usar también el modelo de olas *VOF waves* que simula las olas superficiales gravitatorias en la interfase entre un líquido y un gas (generalmente la atmósfera). Para el caso de simular las condiciones de la piscina se ha usado como modelo de ola un modelo *Flat wave* que modela el agua en calma, pues en una piscina no hay más olas que las causadas por los propios nadadores.

Capítulo 3

Metodología

Índice

3.1. Introducción	21
3.2. Geometría y caso de estudio	21
3.3. Malla base	23
3.4. Elección de modelo de turbulencia	26
3.5. Dominio de cálculo y mallado overset	27
3.6. Descripción del movimiento a realizar	32
3.7. Set-up del cálculo CFD	33
3.7.1. <i>Eulerian multiphase</i>	34
3.7.2. <i>VOF waves</i>	34
3.7.3. <i>Initial conditions</i>	34
3.7.4. <i>Boundary conditions</i>	35
3.7.5. <i>Implicit Unsteady. Time-step</i>	35

3.1. Introducción

3.2. Geometría y caso de estudio

Se pretende estudiar las fuerzas que se generan en natación mediante una geometría CAD 3D de un nadador estándar. Se van a analizar dos casos de estudio diferentes. En ambos se tendrá al nadador realizando un movimiento de brazada y en un caso se estudiará al nadador sumergido totalmente en agua (caso monofásico) y en el otro se tendrá al nadador en la superficie del agua (caso bifásico).

La geometría del nadador se ha obtenido de la web de GRABCAD y se ha modificado en AUTODESK INVENTOR para obtener la postura de nado deseada. Esta geometría *dummy* coincide con la empleada por [9] y tiene las características que recoge la tabla 3.1.

Características físicas	
Altura	1,90 <i>m</i>
Superficie frontal	0,1458 <i>m</i> ²
Peso	80 <i>kg</i>

Cuadro 3.1: Características físicas de la geometría del nadador

Como posición inicial del nadador se ha elegido al mismo con los dos brazos estirados hacia adelante (ver figura 3.1), posición que adoptaría al entrar al agua en la fase inicial de buceo en una competición.

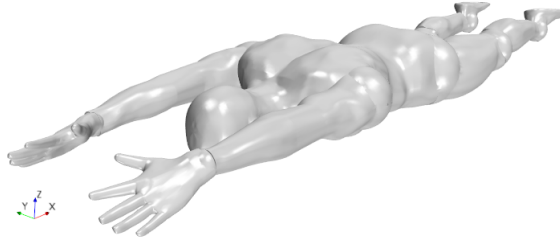


Figura 3.1: Geometría del nadador. Posición inicial adoptada.

Los ejes que regirán todo el estudio son los siguientes: se ha elegido el eje X en la dirección longitudinal del nadador, apuntando hacia los pies. El eje Z, en el plano de simetría del nadador y hacia arriba. El eje Y, por su parte, forma un triedro a derechas con los dos anteriores y se sitúa apuntando al hombro derecho del nadador. La posición de los ejes se puede observar en la figura 3.1.

Para poder trabajar con este CAD, que se tiene en formato *Parasolid text file* (.x_t), se ha de importar en el software:

File \Rightarrow *Import* \Rightarrow *Import Surface Mesh*

Una vez importado se tiene el nadador como una *Part*. El siguiente paso para poder finalizar la geometría es crear el contorno, dentro del cual se va a tener el fluido y que será similar a una piscina. Para ello vamos a crear este contorno como una nueva geometría en el módulo de CAD de STAR-CCM+:

Geometry \Rightarrow *3D-CAD Models* \Rightarrow *New*

Dentro del módulo de CAD se crea un *sketch* en forma de rectángulo y se extruye, con lo que se tiene el contorno. Se ha creado el contorno tal que en el caso bifásico la piscina tenga una profundidad de 3 metros (recomendado por la FINA) y se tomarán las medidas empleadas por Hernández [9] de 12 metros de largo y 6 metros de ancho, como se puede ver en la figura 3.2.

Una vez coexisten como partes el nadador y el contorno se sitúa al nadador en la posición deseada dentro del contorno (en el medio en este caso) mediante las opciones *Rotate* y *Translate* dentro del apartado *Transform* de la parte del nadador.

Para el caso más básico con el que se va a realizar el estudio de independencia de malla (nadador en reposo y brazos estirados) bastaría con sustraer el nadador al contorno para tener el dominio fluido:

Operations \Rightarrow *Boolean* \Rightarrow *Subtract*

Siendo el nadador y el contorno las partes implicadas y el contorno el objetivo (*target part*). Una vez se tiene el dominio fluido se puede proceder a la discretización del mismo, el mallado.

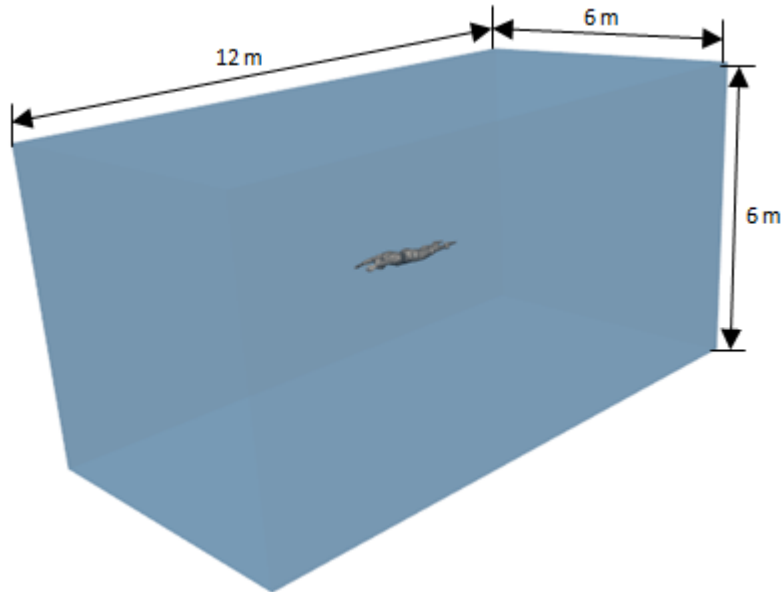


Figura 3.2: Medidas del contorno empleado para el cálculo

3.3. Malla base

Para discretizar el dominio de cálculo se han empleado los *meshers* descritos en el capítulo 2.3: *surface remesher*, *trimmed mesher* y *prism layer mesher*.

La malla se realizará como *continua based mesh*, es decir, que no se hará como una operación sino como un *mesh continuum*. Se realiza una única malla para el caso base (sin movimiento):

$$\textit{Continua} \Rightarrow \textit{New} \Rightarrow \textit{Mesh continuum}$$

A continuación se seleccionan los modelos ya mencionados en:

$$\textit{Mesh 1} \Rightarrow \textit{Models} \Rightarrow \textit{Select Models}$$

La forma en que se ha conformado la malla es la siguiente: primero se seleccionan los valores de referencia que tendrá la malla: tamaño base, espesor de la capa límite, máximo tamaño de celda, mínimo tamaño de celda, etc. Posteriormente se crean volúmenes de control en donde se refinará la malla para ser capaces de captar el flujo en más detalle. Esto se dará alrededor del cuerpo del nadador y en la estela.

Veamos primero los valores de referencia que se han empleado:

<i>Reference Values</i>	
<i>Base size</i>	Variable
<i>Maximum cell size</i>	100 %
<i>Number of prism layers</i>	2
<i>Prism layer thickness</i>	33 %
<i>Relative minimum size</i>	25 %
<i>Relative target size</i>	100 %

Cuadro 3.2: Valores de referencia de la malla base

El tamaño base (*base size*) es el tamaño a que se refieren el resto de valores (relativos). Habitualmente se suele elegir del orden de la longitud característica del problema (la cuerda alar, por ejemplo, si se estudia un perfil). Teniendo en cuenta que el brazo mide $0,77\text{ m}$ el valor del tamaño base inicial se escoge en torno a este valor. Para el estudio de independencia de malla se comenzará en un tamaño de 2 m , más del doble del tamaño del brazo y se irá descendiendo progresivamente.

El valor máximo de celda se ha elegido en 100% para que las celdas más alejadas del nadador tengan el tamaño base, un tamaño muy grande pero totalmente asumible en zonas en las que el flujo no está alterado. En cuanto a los valores de capa límite y de valores mínimos y objetivos se han dejado los valores que STAR-CCM+ ofrece por defecto, puesto que en las zonas en las que interesa tener una malla refinada se especificarán estos valores de referencia mediante controles volumétricos.

A continuación creamos los volúmenes de control sobre los que refinar la malla. Para ello se crean nuevas partes de tipo bloque:

Geometry \Rightarrow *Parts* \Rightarrow *New shape part* \Rightarrow *Block*

Se seleccionan los vértices de los bloques para que ocupen la región del espacio en la que se desea realizar un refinamiento volumétrico. Un bloque se ha situado rodeando al nadador y alargándose a lo largo de la estela y el otro recubrirá toda la superficie del agua, para que el software sea capaz de interpretar correctamente la interfase entre agua y aire, como se observa en la figura 3.3.

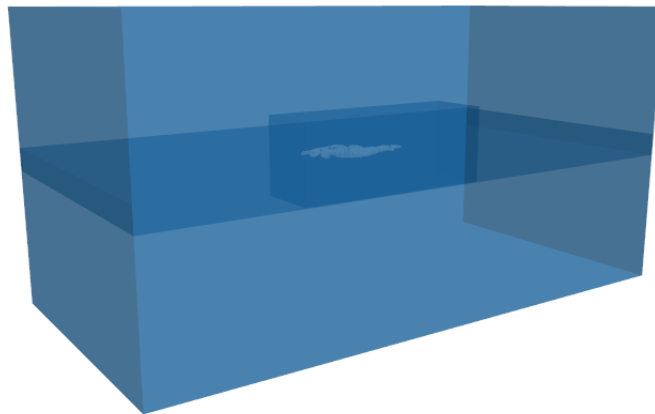


Figura 3.3: Volumen de control alrededor del nadador

Una vez se tiene el volumen de control creado se crea el control volumétrico de malla:

Continua \Rightarrow *Mesh1* \Rightarrow *Volumetric Controls* \Rightarrow *New*

El refinamiento en este control volumétrico se hará sobre el *surface remesher* y el *trimmer*, especificando nuevos valores de tamaño para el tamaño de celda. Para eso activamos la opción de *Customize Surface Remesher* y *Customize Isotropic Size* y en *Custom size* introducimos el valor deseado, $12,5\%$. Con este valor se consigue un refinamiento de cuatro fases como se verá en la figura 3.5.

Finalmente, para terminar el refinamiento se efectúa un refinamiento superficial sobre la superficie del nadador. Para ello se ha de crear la región fluida, seleccionando el resultado de la operación *subtract* (el dominio):

Domino ⇒ *Assign Parts to Regions*

Y se especifica que se quiere una región por cada parte, un *boundary* por cada superficie y que no se creen *interfaces*.

Una vez se tiene la región creada, hacemos el refinamiento sobre el *boundary* que forma el cuerpo del nadador. Para ello se habilitarán las casillas de *Custom surface size* y *Custom Prism Mesh*, situadas en:

Regions ⇒ *Fluid* ⇒ *Boundaries* ⇒ *Nadador.Cuerpo* ⇒ *Mesh Conditions*

Y en la pestaña de *Mesh Values* especificamos los valores que se recogen en la tabla 3.3.

<i>Mesh Values</i>	
<i>Number of prism layers</i>	5
<i>Prism layer thickness</i>	25 %
<i>Relative minimum size</i>	0,1 %
<i>Relative target size</i>	0,78 %

Cuadro 3.3: Valores de refinamiento de la malla base

Con estos valores tan pequeños de tamaño de celda se consigue captar la forma de los dedos (parte más crítica para el mallado en esta geometría) y que toda la superficie del cuerpo del nadador tenga un tamaño de celda 16 veces más fino.

Teniendo la malla y refinado listos se genera la malla, con lo que la malla sobre el nadador se puede observar en la figura 3.4 y se ve cómo la malla se adapta perfectamente a la superficie del cuerpo del nadador.

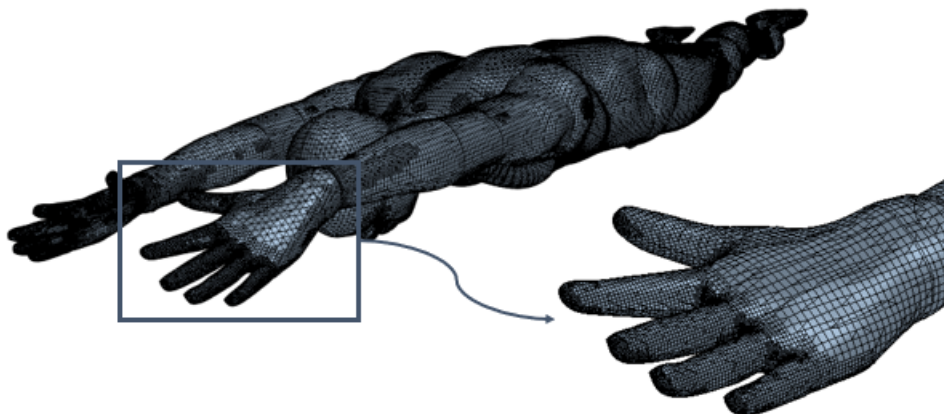


Figura 3.4: Resultado de la malla base sobre la superficie del nadador

El refinamiento en cuatro fases se aprecia con claridad en la figura 3.5, así como el refinamiento realizado sobre la superficie del agua.

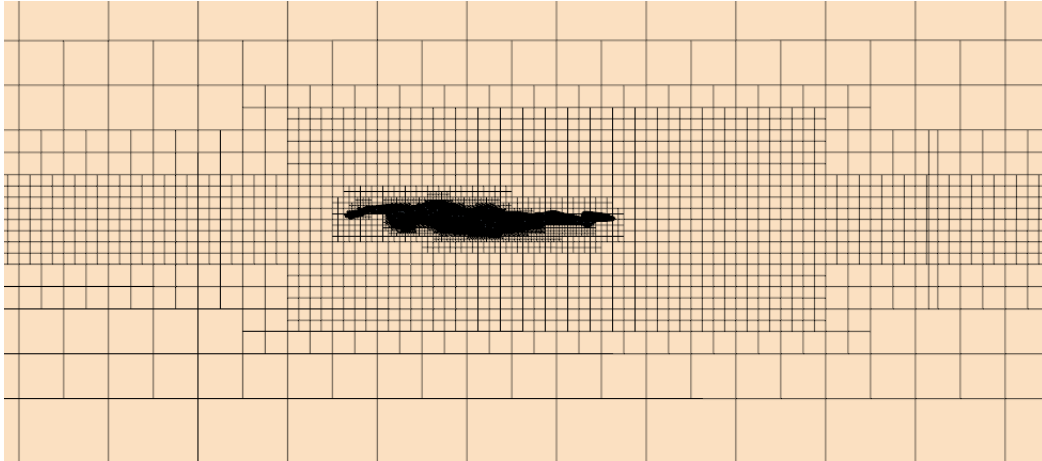


Figura 3.5: Resultado de la malla base en el dominio

Para garantizar que la malla realizada es correcta se realizará un estudio de independencia de malla, como se verá en el capítulo 4.2. Con ello se asegurará que el estudio realizado es independiente de la malla, eliminando así la posibilidad de obtener resultados erróneos debidos a la malla.

El estudio de independencia de malla consistirá en calcular un caso estacionario con mallas conformadas de igual forma pero con variación del tamaño base de la malla. Se comenzará con un tamaño base elevado y se irá disminuyendo hasta comprobar que una mayor disminución no genera beneficios en los resultados y dispara el coste computacional.

3.4. Elección de modelo de turbulencia

Como ya se ha visto en el capítulo 2.3 existen diversos modelos dentro de RANS para modelar la turbulencia. No todos los modelos funcionan de igual forma en todos los cálculos, por lo que resulta también necesario elegir con criterio entre estos modelos.

Los modelos $\kappa - \epsilon$, $\kappa - \omega$ y Spalart-Allmaras son los modelos más comúnmente empleados para realizar estudios con este tipo de flujo. Además, el modelo Spalart-Allmaras fue concebido expresamente para realizar estudios aerodinámicos dentro del ámbito aeronáutico. Como este estudio es un estudio puramente hidrodinámico (aerodinámico en agua) se cree correcto emplear el modelo Spalart-Allmaras. Sin embargo, para estar seguros de ello se realiza un estudio comparativo entre estos tres modelos para asegurar la elección del modelo adecuado.

Por una parte, los modelos $\kappa - \epsilon$ y $\kappa - \omega$ usan dos ecuaciones para modelar la turbulencia (resolviendo la energía cinética turbulenta κ y el ratio de disipación turbulenta ϵ y el específico ω respectivamente) mientras que el de Spalart-Allmaras usa solamente una, obteniendo la viscosidad de torbellino turbulento mediante una ecuación del transporte para la difusividad modificada. Esto confiere una mayor velocidad de cálculo al modelo Spalart-Allmaras. Por tanto, si los tres modelos parecen ofrecer resultados correctos y similares y las diferencias entre ellos son asumibles dentro de la precisión requerida en este proyecto, el modelo Spalart-Allmaras partirá con ventaja.

Además, si entre los tres modelos no existen diferencias anómalas se validará también que el y^+ obtenido es modelado correctamente mediante el tratamiento de pared *All y^+* .

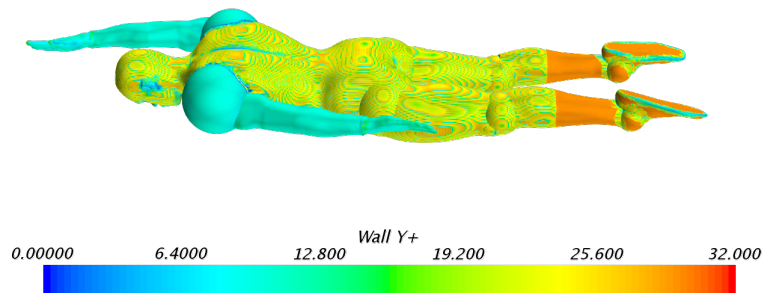


Figura 3.6: Escena de y^+ sobre la superficie del nadador

Se ha obtenido en la figura 3.6 una escena del y^+ sobre la superficie del nadador, demostrando así que se evita en gran medida caer en la zona *buffer*, cuyo modelado pudiera ser erróneo.

3.5. Dominio de cálculo y mallado overset

El dominio de cálculo de los estudios del movimiento de brazada es considerablemente más complejo que el dominio usado para la independencia de malla. El movimiento de los brazos se va a abordar mediante el uso de la técnica de mallado *overset*.

Esta técnica de mallado consiste en mallar por una parte el *Background* (es decir, el fondo) y por otra parte tantos *overset* como se desee. Así, *background* y *overset* tendrán mallas completamente independientes que luego se acoplarán, como veremos más adelante.

Esto supone que nuestro dominio de cálculo estará formado por 3 regiones: una región *background* y dos regiones *overset*. Para su creación, partimos de las partes ya creadas *Contorno* y *Nadador*. El primer paso será separar los brazos del nadador, para lo cual se realizará una operación booleana de intersección. La intersección da como resultado la zona común a dos partes. Por tanto, creamos mediante AUTODESK INVENTOR una caja con la que 'cortar' el brazo, es decir, que al ser importada quede todo el brazo dentro de la misma y 'corte' el hombro de forma limpia (ver figura 3.7). Creamos e importamos las cajas correspondientes a los dos brazos y realizamos la operación booleana *Intersect*. Renombramos los resultados de las operaciones como *Brazo derecho/izquierdo* respectivamente.

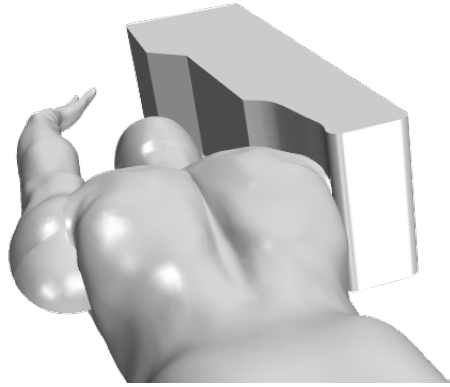


Figura 3.7: Caja creada para separar el brazo del cuerpo

El nadador sin los brazos se obtiene realizando una operación booleana de *Subtract* que tenga como *input* el nadador y los dos brazos y como *target* el nadador. El resultado de esta operación es el nadador sin brazos (ver figura 3.8).

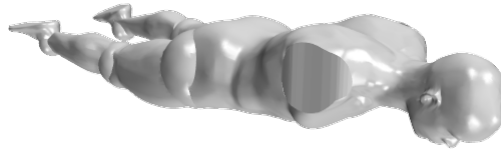
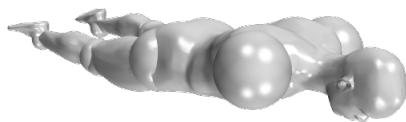
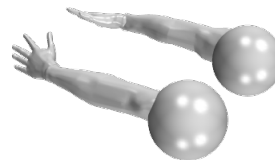


Figura 3.8: Geometría del cuerpo del nadador sin los brazos

Para facilitar el posterior movimiento, puesto que en la situación actual los brazos están cortados como con una guillotina, se crean dos esferas que harán la función de hombro. Estas esferas se situarán, aproximadamente, en el centro de rotación del hombro, y se juntarán a las tres partes: a los dos brazos y al nadador. Esto se consigue mediante la operación booleana *Unite*. Se obtiene por tanto el nadador sin brazos con los nuevos hombros (ver figura 3.9a) y los brazos con los hombros (ver figura 3.9b). Así, se intentará que una esfera rote sobre la otra y que el movimiento sea más fluido.



(a) Cuerpo y hombros



(b) Brazos y hombros

Figura 3.9: Imágenes del resultado de añadir el hombro al cuerpo (a) y al brazo (b)

Teniendo el nadador sin los brazos (parte fija del nadador) se puede obtener ya la región *Background*. Para ello, sustraemos al contorno el nadador sin brazos y con hombro. El resultado es una parte que llamaremos *background* y que posteriormente asignaremos

a una región.

El siguiente paso es obtener las regiones *overset*. Se crean sendas cajas que engloben los brazos holgadamente. Los *overset* serán el resultado de una operación booleana *Subtract* con la caja y el brazo como *input* y la caja como *target*.

Con las partes *Background* y *Overset derecho* y *Overset izquierdo* se crean las regiones con el mismo nombre, mediante el ya mencionado *Assign Parts to Region*. De nuevo, se especifica que se cree un *boundary* por cada superficie y que no se creen *interfaces*.

Se conforman ahora las tres mallas independientes, *continuum-based*, como se ha hecho para la independencia de malla. El set-up base de la malla (*meshers* y valores de referencia) será el mismo que el detallado en el capítulo 4.2. Respecto a la malla realizada en el capítulo 4.2, para la malla *Background* se han incorporado dos controles volumétricos extra. Estos controles volumétricos se realizan sobre dos discos que ocupan toda la región en la cual el brazo va a rotar (ver figura 3.10). El volumen de control alrededor del nadador y la estela tendrá un *Custom size* de 12,5 %, mientras que los discos en los cuales se va a tener movimiento el refinamiento será 4 veces mayor, con un *Custom size* de 3,125 %.

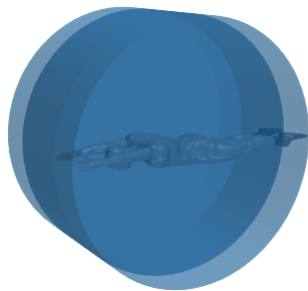


Figura 3.10: Volumen de control en la zona de movimiento de los brazos

Para el caso de las mallas para los *overset* los valores de referencia empleados serán:

<i>Reference Values</i>	
<i>Base size</i>	0,6 m
<i>Maximum cell size</i>	100 %
<i>Number of prism layers</i>	2
<i>Prism layer thickness</i>	33 %
<i>Relative size</i>	3,125 %

Cuadro 3.4: Valores de referencia de las mallas *overset*

Se tiene, por tanto, una malla de tamaño constante e igual al tamaño de la región por la cual se va a desplazar el *overset*, lo cual es esencial, como veremos a continuación. Además, sobre todas las superficies que forman el cuerpo se ha hecho un refinamiento igual al detallado en el capítulo 4.2.

Las mallas que se obtienen, superpuestas, se pueden ver en la figura 3.11.

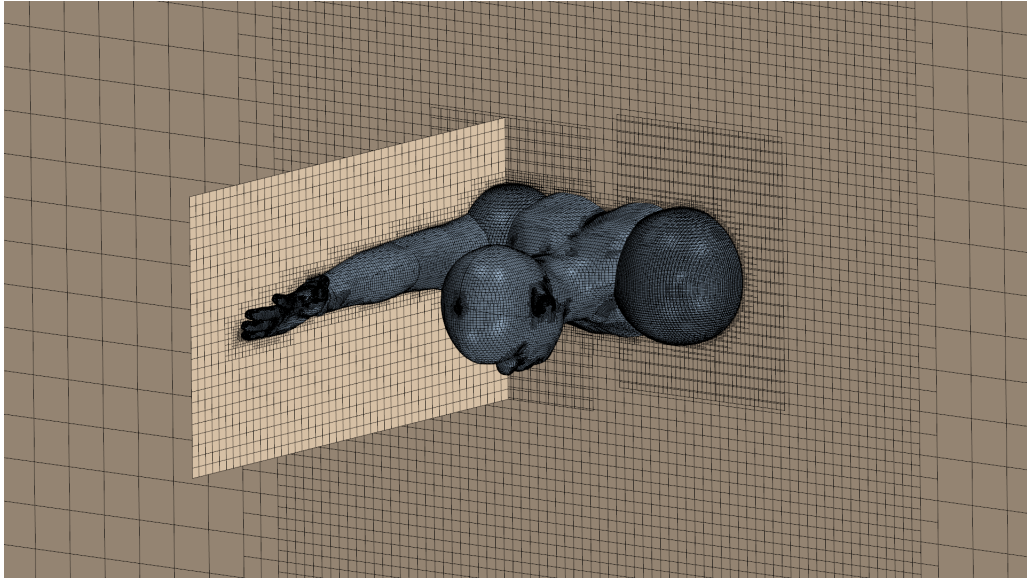


Figura 3.11: Geometría del cuerpo del nadador sin los brazos

Se ha visto ya cómo se han conformado las tres mallas distintas, pero es necesario saber cómo funciona. La técnica de mallado *overset* consiste en mallar el dominio en partes distintas, correspondiendo una parte a la región que no se va a mover y las mallas *overset* a las partes móviles. Esto permite mover partes a lo largo del dominio sin necesidad de realizar remallado, así como simular movimientos. El caso típico de uso de mallas *overset* sería la simulación del adelantamiento de un coche a otro imponiendo a las regiones *overset* un movimiento predefinido.

Por tanto, a la hora de resolver las ecuaciones de conservación en todo el dominio se usarán las celdas de la malla *overset* dentro de su región y las celdas de la malla *background* en el resto, interpolándose la solución entre ambas en las zonas en que las dos mallas están superpuestas.

Para que esta interpolación pueda tener lugar han de crearse *interfaces* entre cada par de regiones con mallas que vayan a superponerse. Cuando se inicializa y calcula, el *software* divide las celdas en 4 tipos:

- *Active cells*: son las celdas en las que se van a resolver las ecuaciones de conservación discretizadas.
- *Passive cells*: aquellas en las que las ecuaciones no se van a resolver.
- *Acceptor Cells and Donor Cells*: son la conexión entre las dos mallas. En el límite de la malla *overset*, las celdas *donor* donan información a las celdas *acceptor* y cada celda *acceptor* interpola la información que recibe de las celdas *donor* de su alrededor.

Por tanto, suponiendo que se tiene una malla *background* y una malla *overset* superpuesta en una zona del dominio, entonces cuando se crea la *interface*, las celdas de *background* que están superpuestas con celdas *overset* serán pasivas (no se resuelven las ecuaciones) y al contrario, las celdas *overset* en esa zona del dominio serán activas. En el límite de la malla *overset*, las ecuaciones tienen que pasar de calcularse de las celdas de la malla *background* a las de la malla *overset* y por eso se crean una serie de celdas

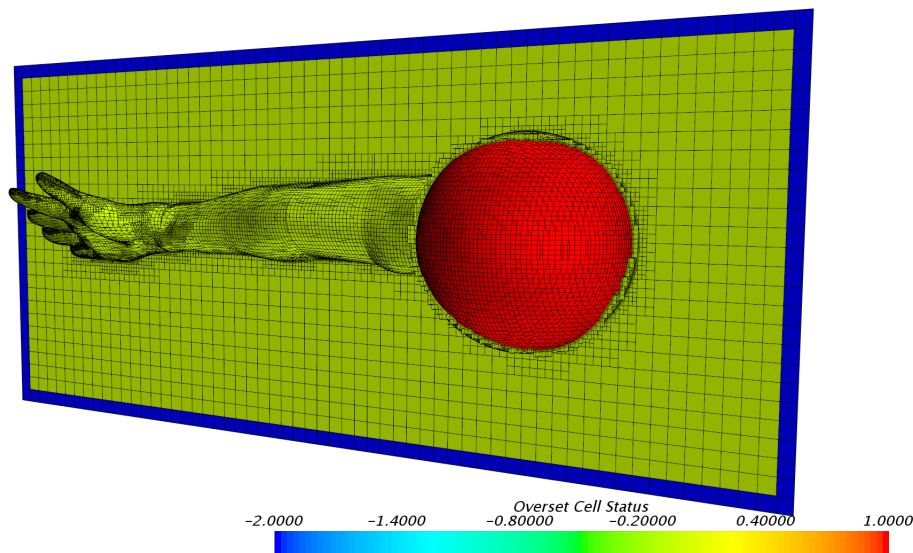


Figura 3.12: Tipos de celda distintos en la malla *overset*

acceptor que reciben información de las celdas de su alrededor, tanto de una malla como de otra, de forma que interpolan la solución para que el cambio sea lo más suave posible.

Para comprender mejor los diferentes tipos de celda existentes se puede obtener en STAR-CCM+ una escena llamada *Overset Cell Status*, como es el caso de la figura 3.12. Está obtenida como el *Overset Cell Status* de las celdas de la parte de la malla *overset* del brazo derecho y en ella se pueden ver tres tipos distintos de celda. En amarillo se tienen las celdas activas, es decir, en las cuales se resolverán las ecuaciones. Como se puede ver en la figura 3.12, el *software* ha establecido todas las celdas interiores de la malla *overset* como activas. En rojo se tienen las celdas pasivas. Serán pasivas de la malla *overset* todas las celdas de *background*. Podemos ver, por tanto, que el *software* ha tomado la mitad interior de la articulación del hombro como *background* y la parte exterior como *overset*, lo cual resulta satisfactorio. Finalmente en azul tenemos las celdas *acceptor* que son aquellas en las cuales se interpolará la solución. Estas celdas recibirán información de las celdas *overset* y *background* contiguas y tomarán un valor interpolado entre ellas.

En la figura 3.13 se ve con claridad cómo las celdas *background* exteriores a la malla *overset* donan información a la celda *acceptor* (en amarillo). De esta forma no es necesario que ambas mallas estén perfectamente superpuestas, pues se realiza una interpolación de las 3 celdas (en 3D serían 4 celdas) más cercanas a cada celda *acceptor*. Por su parte, la celda en amarillo también recibirá la información pertinente de sus celdas *donor overset*. Este método de interpolación se corresponde con el método lineal, que es el usado en el presente proyecto.



Figura 3.13: Interpolación de las soluciones entre una malla *background* y una malla *overset*

Para implementar la técnica *overset* es necesario, por tanto, crear las interfaces pertinentes entre cada región cuyas mallas vayan a superponerse. En este caso se crearán *interfaces* entre el *background* y cada uno de los *overset* y entre ambos *overset*. La interpolación requiere que existan al menos 4 celdas entre cuerpos. Como en este proyecto se persigue simular el movimiento real y no se desea flujo atravesando el brazo, debe existir contacto entre dos cuerpos: el cuerpo del nadador que pertenece a *background* y el brazo que pertenece a *overset*. Por tanto, para que ésto funcione no puede crearse una *overset mesh interface* sino que se debe crear una *overset mes interface zero gap*. Esta *interface*, las zonas en que existen menos de 4 celdas entre dos cuerpos las tomará como si fueran pared y no resolverá las ecuaciones. Esto produce ciertos defectos para el cálculo, puesto que en la zona de contacto 'corta' la geometría y crea por sí mismo una pared que se extiende un poco por encima de la pared original (ver figura 3.14). Sin embargo, el error es suficientemente asumible.

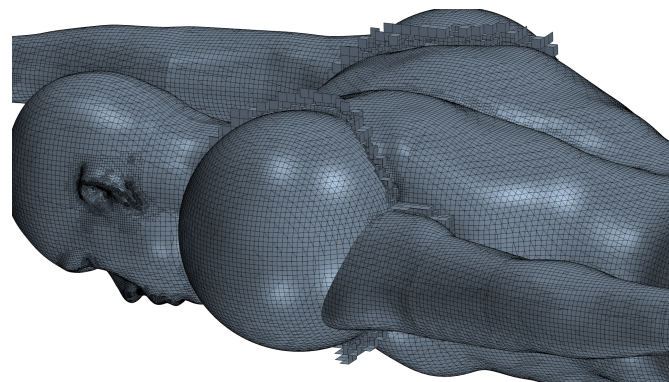


Figura 3.14: Imagen detalle de la creación de pared por aplicación de *ZeroGap interface*

3.6. Descripción del movimiento a realizar

Cuando se trabaja con mallas *overset* para aplicarles movimiento, la región entera se mueve uniformemente, es decir, es una región rígida. Por tanto, para simular el movimiento deseado modelamos los brazos del nadador como si se tratara de una barra rígida.

En este caso tomamos una barra rígida unida mediante una articulación al resto del cuerpo y dotada de dos grados de libertad, que serán rotaciones en dos de sus ejes. Se

aplicará, pues, una rotación predeterminada en cada uno de los grados de libertad.

Tal y como están elegidos los ejes de coordenadas, la rotación principal será alrededor del eje Y. Esta rotación se realizará con una velocidad angular constante. Para elegir el valor de la velocidad angular y hacerlo similar a la realidad, se ha hecho uso de las estadísticas reales de un nadador y se ha empleado su tiempo medio de brazada para obtener la velocidad angular. Esta velocidad angular será de $\omega_y = \frac{\pi}{2} \text{ rad/s}$ y se corresponde con 30 brazadas por minuto.

La siguiente rotación será en el eje Z. Esta rotación está pensada para que cuando el brazo de recobro forme 30° en el plano X-Z con el cuerpo comience a separarse del mismo, hasta un ángulo de 25° (momento en el que el brazo forma un ángulo de 0° con el cuerpo en el plano X-Z) y vuelva a la posición inicial en el mismo tiempo. Esto significa que la velocidad angular será una función definida a trozos (ver figura 3.15), con la velocidad angular valiendo $\omega_z = 0 \text{ rad/s}$, $\omega_z = \pm \frac{5\pi}{12} \text{ rad/s}$.



Figura 3.15: Velocidad angular sobre el eje Z del *overset* derecho

Estos dos movimientos han de ponerse como superpuestos, pues una misma región solo admite un único movimiento. Por tanto, se deberá crear un sistema de referencia en el centro de cada una de las esferas de los hombros. A continuación se crea un sistema de coordenadas local que sea idéntico a cada uno de los anteriores. Una vez creados, se crean las rotaciones sobre el eje Y de uno de los sistemas de referencia de cada brazo y se asigna que lleven asociados (*Managed Coordinate System* al otro sistema de referencia del mismo brazo (local del anterior). Se crea una *superposing motion* a dicho movimiento en el eje Z del sistema de referencia al que se ha asociado el movimiento anterior.

3.7. Set-up del cálculo CFD

Más allá de la correcta preparación de la geometría y de la generación de la malla, hay multitud de diferentes opciones que aplicar al cálculo CFD, como veremos a continuación.

En el capítulo 2.3 se detallaron todos los modelos físicos seleccionados para realizar

este estudio. Veremos ahora el set-up específico de aquellos modelos que lo requieren.

Como ya se ha descrito, se van a realizar dos estudios distintos, uno en inmersión y otro en superficie.

El estudio en inmersión se ha realizado como paso experimental y metodológico previo a la implementación del movimiento en el *software*, para desprenderse de una variable extra como supone la generación de dos fases distintas. Así, puesto que era la primera vez que se trabajaba a fondo con este tipo de técnica se reducía la gama de posibles errores cometidos. Con este caso de inmersión se consiguió encontrar los valores más adecuados de *time-step* que hacían posible un cálculo estable y a la vez lo más rápido posible. Además, también se han podido extraer conclusiones hidrodinámicas del mismo, más allá del beneficio metodológico que ha aportado.

3.7.1. *Eulerian multiphase*

Los dos estudios realizados se diferencian fundamentalmente en el modelo de flujo empleado. Para el estudio en inmersión, monofásico, la elección del material ha sido líquido de densidad constante (agua).

En cambio, para el estudio en superficie, bifásico, se selecciona el modelo *Eulerian multiphase* que permite crear tantas fases como se desee. Dentro del modelo se crearán dos fases: una líquida y otra de aire, ambas de densidad constante ($\rho_w = 997,561 \text{ kg/m}^3$, $\rho_a = 1,18415 \text{ kg/m}^3$), pues como ya se ha visto en el capítulo 2.3 las velocidades del flujo con que se trabaja están muy alejadas de los efectos de compresibilidad, por lo que es totalmente válido tomar la densidad de ambos fluidos como constante.

3.7.2. *VOF waves*

Asociado al modelo anterior se encuentra el modelo *VOF waves*, que permite crear olas. En este caso, no se desea que existan olas por defecto, sino que las que existan sean creadas por el movimiento de avance del nadador. Por eso se crea una nueva *Flat wave*, que permite asignarle una velocidad de corriente a ambas fases. Como la perspectiva tomada es la de nadador fijo y flujo en movimiento se seleccionará como velocidad de la corriente de líquido y de gas la velocidad a la que se desea el desplazamiento del nadador (1 m/s).

Así, se genera un dominio bifásico moviéndose a 1 m/s y con perturbaciones de la interfase líquido-gas producidas por la presencia y movimiento del nadador.

3.7.3. *Initial conditions*

En un cálculo transitorio tienen especial relevancia las condiciones iniciales, pues afectan a la solución final, mientras que en un estudio estacionario éstas no hacen diferir la solución de la solución correcta sino simplemente afectan a la convergencia intermedia.

Las condiciones iniciales empleadas dependen del estudio. Para el caso monofásico se ha especificado una velocidad inicial de 1 m/s , y una presión inicial de 0 Pa (respecto de la presión de referencia, atmosférica, de 101325 Pa).

Para el caso bifase las condiciones iniciales se refieren a la *Flat wave* creada. Así, la velocidad inicial se seleccionará como la velocidad de la *Flat wave* y la presión inicial como la presión hidrostática de *Flat wave*.

En este caso se especificará también la fracción volumétrica de cada fase. Éstas se seleccionan mediante una *field function*: se aplicará *Volume fraction of heavy fluid* para el agua y *Volume fraction of light fluid* para el aire.

3.7.4. *Boundary conditions*

Las condiciones de contorno en este proyecto se han seleccionado tal que coincidan con las condiciones iniciales impuestas. Por tanto, se han seleccionado las condiciones que tendrá un *inlet* (la cara frontal al nadador del dominio) y un *outlet* (cara posterior al nadador del dominio). Para el *inlet*, los valores físicos seleccionados serán los de velocidad y fracción volumétrica, que coincidirán con las impuestas en el apartado anterior. Por su parte, el *outlet*, también tendrá los mismos valores físicos que las condiciones iniciales del apartado anterior, en este caso, la presión y la fracción volumétrica.

Para el resto de *boundaries* se ha seleccionado que sean de tipo pared (las paredes del dominio y la superficie del nadador). Los límites externos de las regiones *overset* han de seleccionarse como *boundary condition* de tipo *overset mesh* para poder crear la *interface*.

3.7.5. *Implicit Unsteady. Time-step*

Para resolver las ecuaciones discretizadas en estado transitorio se especifica un paso temporal o *time-step*, de forma que el *software* calculará las ecuaciones en cada paso temporal. Una correcta elección del paso temporal es esencial para que el cálculo se realice correctamente por dos motivos. En primer lugar por el solver, pues un paso temporal demasiado elevado haría diverger la solución. En segundo lugar por el movimiento de la malla *overset*, pues para un esquema de integración temporal de primer orden de Euler (elegido así por ser más estable que de segundo orden) el movimiento máximo de la malla en un paso temporal es de una celda.

Además, para facilitar la convergencia usa una rampa para el *time-step*, pues ayuda a conseguir un cálculo más estable en los primeros *time-step*. Por tanto, se parte de un *time-step* de $2 \cdot 10^{-4}$ s en el primer time step y se llega a un *time-step* de $1 \cdot 10^{-3}$ s con el que se realizará la mayor parte del cálculo.

Capítulo 4

Resultados

Índice

4.1. Introducción	37
4.2. Estudio de independencia de malla	37
4.3. Estudio estacionario de modelos de turbulencia	40
4.4. Resultados	42
4.4.1. Estudio de inmersión	43
4.4.2. Estudio en superficie	48
4.4.3. Comparación estacionario-transitorio	50
4.4.4. Alcance de la técnica <i>overset</i> para estudios de movimiento corporal	52

4.1. Introducción

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos de los estudios preliminares necesarios para una correcta realización de un análisis CFD de un problema real.

Estos estudios preliminares serán los de independencia de malla y de modelos de turbulencia. Con ello se asegurará que el cálculo no va a dar unos resultados incorrectos debido a una mala elección de la malla o de los modelos de turbulencia disponibles en STAR-CCCM+, así como favorecer una elección que, dentro del margen de precisión que se maneja, permite realizar el cálculo con el menor coste computacional posible.

Finalmente se expondrán los resultados obtenidos en los estudios realizados con movimiento, el monofásico y bifásico, así como el alcance de la técnica *overset* para estudios similares al presente.

4.2. Estudio de independencia de malla

La malla en un cálculo CFD es una parte esencial del proceso y no es baladí saber desde un principio cuál es el tamaño de malla correcto. Es por eso que se hace un estudio de independencia de malla: se prueba la misma malla con tamaños base distintos y se evalúan algunas propiedades características que se deseen medir. Se comparan los valores obtenidos y el coste computacional requerido para la convergencia del caso (medido en horas de iteración).

Se ha probado con valores de base entre 2 metros y 0,5 metros, y se ha medido el drag generado por el nadador. Cabe destacar que, puesto que la independencia de malla se ha probado con un set-up bifásico y al existir olas el cálculo ha de ser implícitamente transitorio, los valores de resistencia se mostraban oscilatorios. Se han recogido en una tabla (tabla 4.1) los valores de número de celdas, resistencia media, máxima y mínima, así como el porcentaje que representa para la resistencia la causada por presión y la causada por fricción.

Base size (m)	Min cell size (m)	Drag (N)	Drag Pressure (%)	Drag Shear (%)
2,000	0,016	47,971	94 %	6 %
1,700	0,013	51,564	94 %	6 %
1,400	0,011	49,478	94 %	6 %
1,000	0,008	49,264	93 %	7 %
0,800	0,006	49,178	94 %	6 %
0,500	0,004	49,146	94 %	6 %

Cuadro 4.1: Evolución del cálculo de la resistencia al descender el tamaño base

Para ayudar a visualizar mejor la evolución de la resistencia obtenida con respecto al tamaño base empleado, se ha representado mediante una gráfica (figura 4.1).

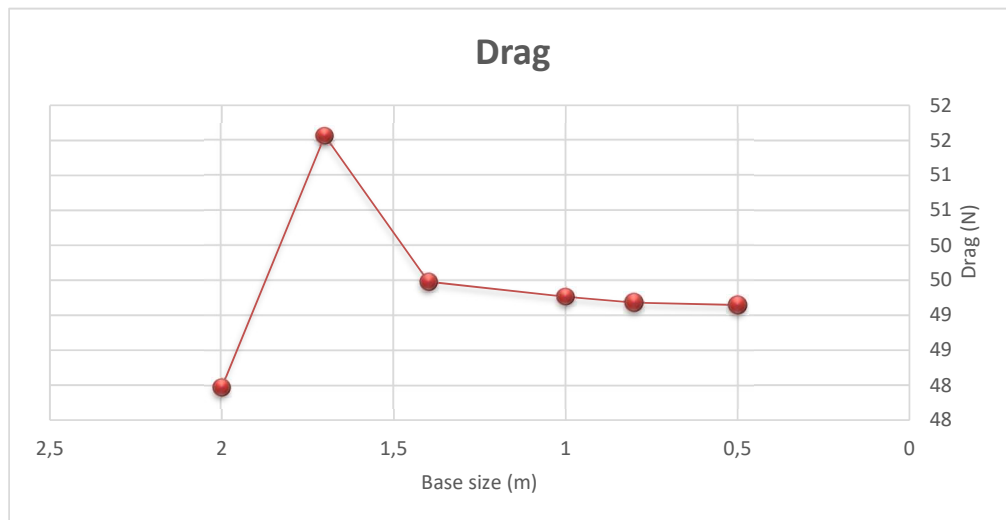


Figura 4.1: Resultado de la malla base sobre la superficie del nadador

La figura 4.1 muestra cómo se produce un cambio representativo del valor medio de la resistencia conforme disminuimos el tamaño base de la malla. Se ve una oscilación inicial y se estabiliza entorno a 49,1 N. La diferencia de entre 1 metro y 0,8 metros es del 0,06 %, mientras que de 0,8 metros a 0,5 metros es del 0,2 %. Esto significa que incrementar el número de celdas pasando de un tamaño base de 1 metro a 0,8 metros representa un beneficio considerable, mientras que de 0,8 metros a 0,5 metros este beneficio es mucho menor (más de un orden de magnitud menor). Por tanto, en base a este resultado escogemos el tamaño base de 0,8 metros como tamaño para realizar los cálculos del movimiento.

Sin embargo, para reforzar la elección del tamaño base relacionamos el tamaño con el tiempo de cálculo requerido (figura 4.2).



Figura 4.2: Evolución del tiempo de convergencia con el tamaño base

A la vista de esta evolución del tiempo de cálculo, vemos que el cambio de 0,8 metros a 0,5 metros no sólo genera poca variación del valor de resistencia media obtenido sino que también dispara el tiempo de cálculo. El cambio de 1 metro a 0,8 metros también aumenta el tiempo de cálculo, pero en menor medida. Esto se explica por el número de celdas del dominio conforme disminuye el tamaño base (ver figura 4.3). Por tanto, se escoge finalmente el tamaño de 0,8 metros como mejor compromiso entre coste computacional (teniendo en cuenta que el coste computacional admisible para el proyecto no es muy elevado) y precisión de cálculo.

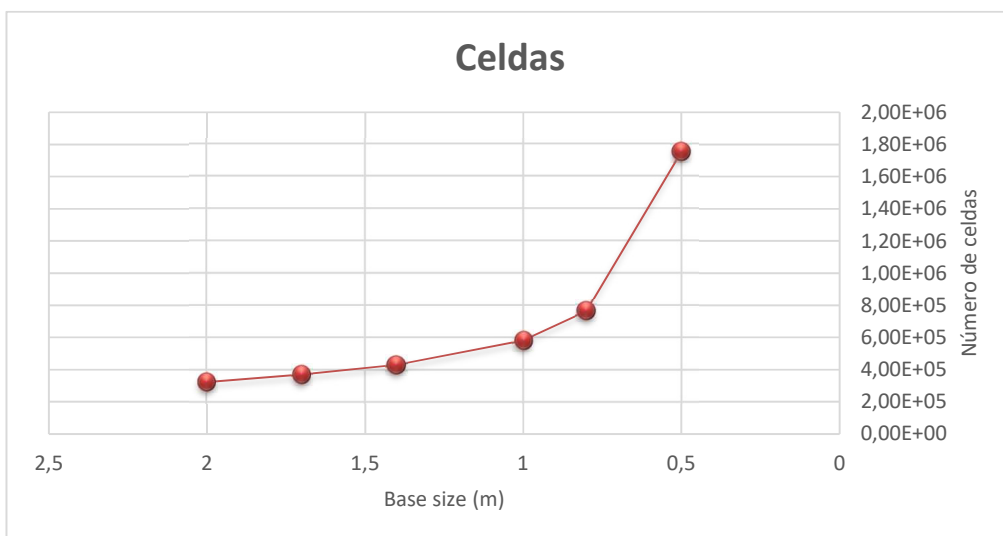


Figura 4.3: Número de celdas obtenidas respecto al tamaño base

Este estudio se ha hecho usando el modelo *Eulerian Multiphase* para obtener dos fases (agua y aire) y *Flat Wave* como se verá en el capítulo 3.7. Para la velocidad del nadador (generada imponiéndosela al flujo) se ha usado 2 m/s .

Una vez realizado el estudio de independencia de malla es necesario validarlo. Validarlo consiste en poder afirmar que los resultados obtenidos son correctos. Para ello se pueden realizar experimentos que lo avalen o acudir a revisión bibliográfica. En este caso, se va a hacer uso de dos estudios. El primero es el estudio realizado por Hernández [9], quien realizó un estudio con el mismo *dummy* pero a diferente velocidad ($1,4\text{ m/s}$). Obtuvo valores de resistencia para la posición del presente estudio de independencia de malla que oscilaban alrededor de 45 N . En este caso se ha obtenido un valor de resistencia entorno a 49 N , por lo que puede parecer válido el resultado obtenido, ya que la velocidad del flujo en este estudio ha sido ligeramente superior (2 m/s).

En otro estudio, realizado por von Loebbecke [8] éste recopiló para su propia validación los valores de resistencia obtenidos por varios estudios previos (ver figura 4.4) en una posición muy similar a la estudiada ahora.

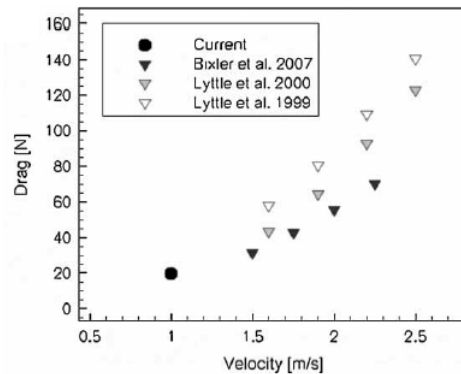


Figura 4.4: Comparativa de von Loebbecke [8] de distintos estudios previos

Como este estudio se ha realizado a una velocidad de 2 m/s , a dicha velocidad se obtiene que en el estudio de Bixler la resistencia era de entorno a 50 N , por lo que la resistencia obtenida de $49,1\text{ N}$ parece acertada. Por tanto, creemos que la metodología empleada puede usarse para obtener resultados correctos en un estudio hidrodinámico de un nadador.

Además, de la tabla 4.1 se puede observar que se ha obtenido una distribución de la resistencia del 94% a causa de la presión y el 6% a causa de la fricción. Este resultado es muy similar al que se encuentra en [3] ($94,9\%-0,05\%$), si bien en dicho estudio se separaba también la componente de olas.

Por tanto, a la luz de todos estos estudios anteriores se puede considerar que la metodología empleada es válida y puede usarse para llevar a cabo los estudios del movimiento de brazada.

4.3. Estudio estacionario de modelos de turbulencia

Además del estudio de independencia de malla, necesario para elegir el tamaño de malla adecuado a las necesidades del estudio, también es menester realizar un estudio

estacionario comparativo de los modelos de turbulencia que podrían resultar de interés.

Por ello, se ha estudiado el mismo caso empleado para la independencia de malla, con tamaño base 0,8 metros, con tres modelos de turbulencia distintos: Spalart-Allmaras, $k - \omega$ y $k - \epsilon$. Para juzgar las diferencias existentes entre los modelos se han calculado 10 segundos de tiempo físico y se han recogido los datos de resistencia, sustentación y presión de tres formas distintas: la presión en un punto del dominio (ver figura 4.5), detrás de la cabeza del nadador y presión máxima y mínima obtenida en el cuerpo del nadador. En la tabla 4.2 se recogen estos resultados.

	Spalart-Allmaras	$k-\omega$	$k-\epsilon$
Drag (N)	50,984	49,355	52,028
Pressure point (Pa)	604,845	597,045	590,678
Max pressure (Pa)	104690	104670	104710
Min pressure (Pa)	99092	99251	99408
Sustentacion (N)	408,019	417,290	419,620

Cuadro 4.2: Resultados del estudio comparativo de modelos de turbulencia

El valor de la resistencia obtenida con los tres modelos no distan más de un 3%, no suponiendo diferencias significativas. Respecto de los valores de presión, valores de magnitud mucho mayor, las diferencias porcentuales se reducen aún más, llegando a ser inferiores al 0,5% para la presión máxima o del 2% para la sustentación. Por tanto, respecto de los valores de los resultados obtenidos no resulta ser significativa la elección de un modelo u otro.

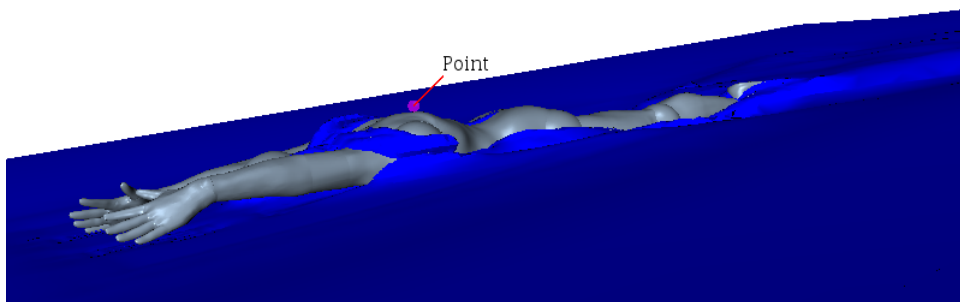


Figura 4.5: Punto sobre el que se compara la presión puntual con los tres modelos

Respecto de la presión puntual (ver figura 4.5) los resultados obtenidos según los tres modelos se recogen en la tabla 4.2. Realizar la comparación de los modelos también de forma puntual resulta muy apropiado debido a que variables como la resistencia son variables promediadas y podría darse el caso de que aun obteniendo valores similares de resistencia la solución fuera completamente distinta. Por ello, midiendo alguna magnitud como la presión en un punto aleatorio pero relevante del dominio nos aseguramos de que esto no ocurra. Los valores obtenidos están en una horquilla de valores pequeña y aceptable para este caso (diferencias del 2%).

También se pueden obtener los contornos de presión sobre el cuerpo para comprobar que la presión obtenida se distribuye de igual forma (ver figura 4.6).

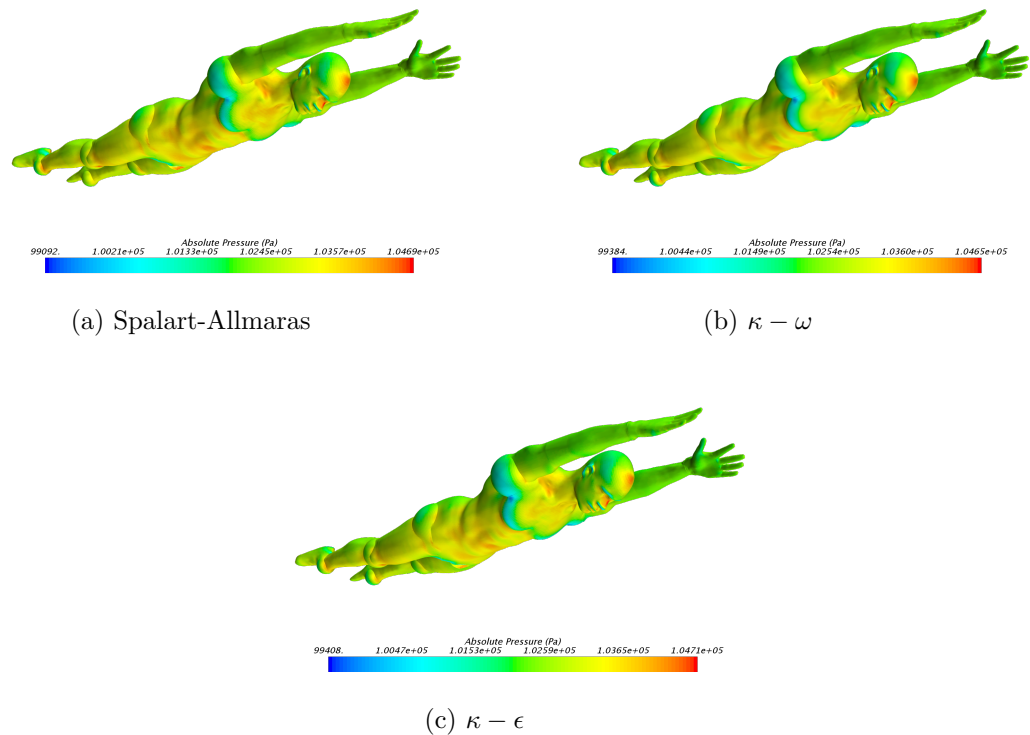


Figura 4.6: Escenas de presión para los tres modelos de turbulencia estudiados

Se puede ver en la figura 4.6 que en las tres escenas la distribución de presión es casi idéntica y además lógica, pues se ve que la presión máxima se obtiene en la frente en la zona en la que se produce el primer contacto del flujo en movimiento con el cuerpo de forma frontal. En los dedos no se produce una presión tan elevada como en la frente, debido a que la superficie frontal con la que interceptan al fluido es mucho menor, y ésta se va adaptando poco a poco hasta llegar a los hombros, de forma suave.

Por su parte, las presiones mínimas se obtienen detrás del hombro, en una zona donde el flujo está desprendido, es decir, una zona de depresión.

La diferencia más grande obtenida entre estos modelos se ha obtenido en el tiempo de cálculo empleado. Realizando el cálculo con los tres modelos con 4 núcleos, el cálculo con Spalart-Allmaras tardó 100 minutos, mientras que los de $k - \epsilon$ y $k - \omega$ tardaron 160 minutos, un 60 % más. Por esta razón, se ha optado por usar el modelo Spalart-Allmaras, pues el coste computacional del cálculo con las mallas *overset* ya es suficientemente elevado y no resulta admisible un incremento del 60 % en el tiempo de cálculo. Además, se probó también el modelo $k - \epsilon$ en el cálculo de malla *overset* pero resultó ser más estable el modelo Spalart-Allmaras, por lo que es el modelo Spalart-Allmaras el que se ha usado para realizar los estudios.

4.4. Resultados

Se presentarán a continuación los resultados obtenidos de los dos estudios realizados con movimiento, el de inmersión (monofásico) y el de superficie (bifásico).

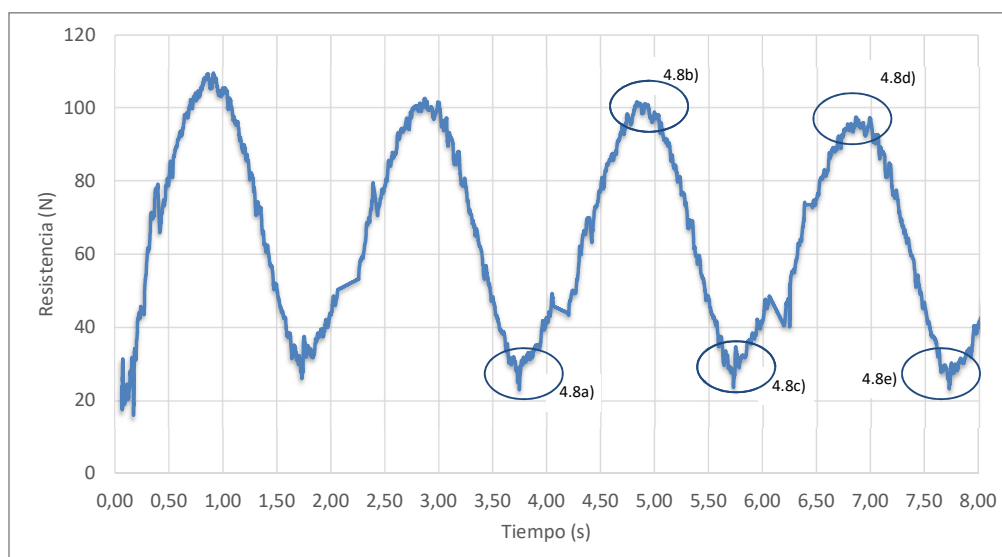


Figura 4.7: Resistencia en función del tiempo para el estudio monofásico

Se expondrán también los resultados apreciados relativos al uso de la técnica de mallado *overset* para recrear el movimiento de brazada del nadador.

4.4.1. Estudio de inmersión

En primer lugar se van a analizar los resultados obtenidos respecto de las fuerzas hidrodinámicas en el estudio de inmersión, monofásico, en agua. Este estudio representaría los esfuerzos generados para el nadador para avanzar buceando usando una brazada de un estilo de nado de crol simplificado. Como ya se ha visto en el capítulo 3.7, este estudio se ha realizado con la intención de aplicar correctamente la técnica de movimiento de malla para eliminar la variable bifásica como posible fuente de errores. Sin embargo, se han podido extraer resultados del mismo.

Cabe destacar que este estudio se ha realizado a 1 m/s a una velocidad menor que la empleada para todos los cálculos en superficie, puesto que una velocidad tan grande es inconcebible para un nadador sumergido y, además, generaría fuerzas de resistencia excesivamente elevadas. Debido al enorme coste computacional se han simulado dos ciclos completos, para lo cual se han necesitado 8 días de cálculo ininterrumpido. La fuerza de resistencia obtenida se puede observar en la figura 4.7.

En la figura 4.7 se observa una tendencia oscilatoria de la resistencia, lo cual es totalmente lógico debido a que la resistencia producida en los instantes en que los dos brazos están estirados es mucho menor a la resistencia producida en los instantes en que ambos brazos están a 90° del cuerpo. En efecto, el movimiento tiene un periodo de 4 segundos (más un tiempo inicial de convergencia sin movimiento de 0,064 segundos), por lo que en cada segundo de movimiento los brazos están situados en una de las posiciones características, como se puede ver en la figura 4.8.

Comparando la figura 4.7 con la figura 4.8, se observa con claridad la correspondencia existente entre los máximos y mínimos de fuerza de resistencia y la posición. Se comprueba cómo las posiciones con los brazos a 90° , perpendicular al flujo, generan fuerzas de

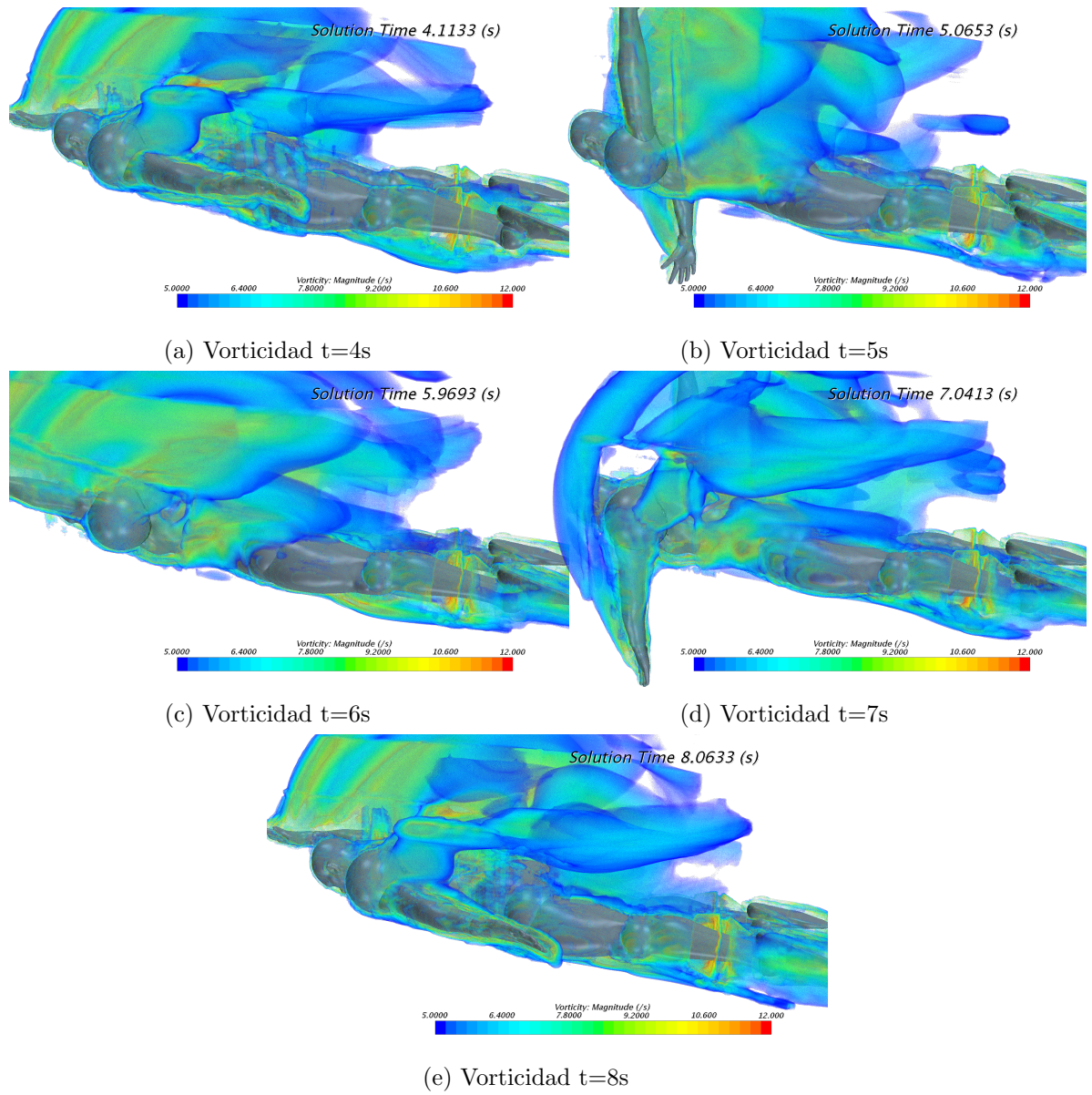


Figura 4.8: Evolución del movimiento de la brazada

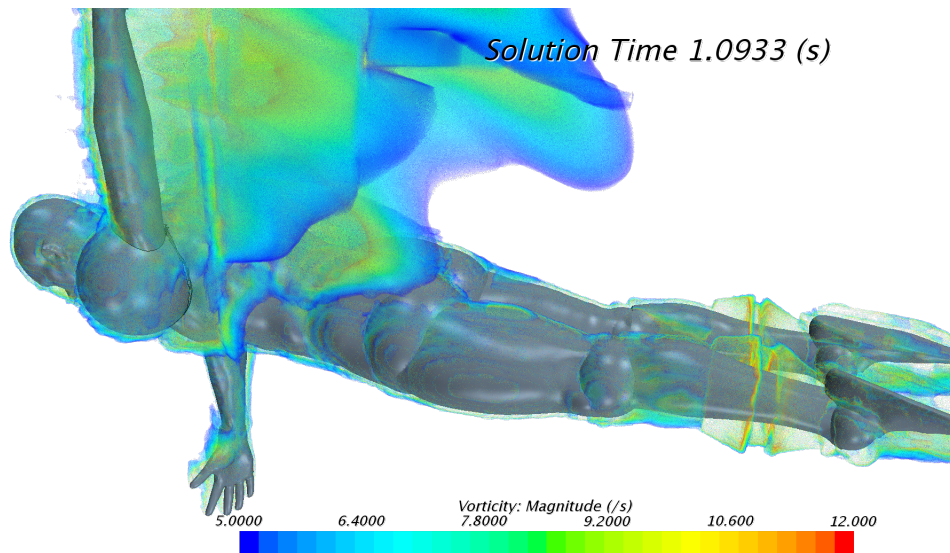


Figura 4.9: Escena de vorticidad en el instante $t = 1,0933 s$

resistencia en torno a 100 N, mientras que las posiciones con brazos estirados, paralelos al flujo, sólo generan resistencias de unos 30 N, es decir, un 70 % menos. Para comparar este resultado con el posterior resultado en superficie (capítulo 4.4.2) adimensionalizamos la fuerza de resistencia dividiéndola por el término dinámico $\frac{1}{2}\rho SV^2$ siendo S la superficie frontal, ρ la densidad del agua y V la velocidad de nado. Con ello se obtiene que el coeficiente de resistencia oscila entre $C_D = 1,3751$ y $C_D = 0,4125$.

Esta enorme diferencia entre las fuerzas generadas en una posición y otra deja clara la ineficacia de esta técnica para bucear. Y es que no sólo se produce resistencia debido a la posición que tienen los brazos, sino que además, uno de los brazos se mueve en la dirección opuesta al flujo, generando desprendimientos mucho más grandes que el brazo que se mueve en la dirección del flujo.

En la figura 4.9 se ha obtenido una escena de vorticidad correspondiente al instante $t = 1,0933 s$, en el que se tienen ambos brazos en vertical, moviéndose el brazo izquierdo en dirección opuesta al flujo y el brazo derecho en la dirección del flujo (hacia la derecha). La vorticidad se define como el rotacional del campo de velocidad y es una medida de la rotación local del fluido. En un flujo laminar no existe vorticidad, pues las partículas fluidas se trasladan sin deformarse ni girar. En cambio, existe vorticidad en las zonas en que el flujo se desprende y comienza a girar sobre sí mismo, en torbellinos. La escena de vorticidad nos permite ver, entonces, las zonas del dominio en las que el fluido tiene rotación, es decir, que puede usarse para observar desprendimientos.

A pesar de estar los dos brazos completamente verticales en la figura 4.9, en la posición menos favorable y más resistiva, el efecto del movimiento se hace patente: el brazo que va en dirección al flujo genera una zona de vorticidad muy grande mientras que el brazo que se mueve favorable al flujo sólo genera vorticidad en una zona pegada al brazo. Es decir, que el desprendimiento del flujo producido por el brazo que se mueve aguas arriba genera un desprendimiento mucho mayor. Por tanto, la resistencia del conjunto será considerablemente mayor que la que se obtendría con los brazos en dicha posición estacionaria.

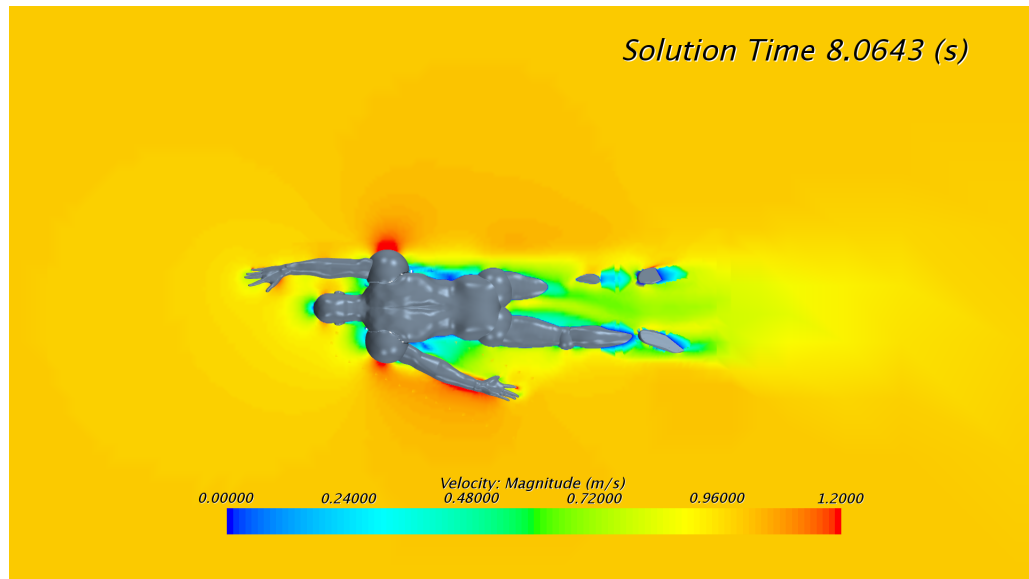


Figura 4.10: Escena de velocidad en el instante $t = 8,0643 \text{ s}$

Mediante una escena de contornos de velocidad se puede juzgar la contribución a la resistencia del cuerpo entero, pues no sólo los brazos son causantes de ella. En la figura 4.10 se puede observar que el flujo se frena casi totalmente en la zona encerrada entre el brazo y el cuerpo, así como en la zona posterior a los hombros. Detrás del nadador se puede observar la estela formada, que en este caso es pequeña debido a la velocidad a la que se ha realizado la simulación (1 m/s). Por tanto, el cuerpo fijo también contribuye a la generación de resistencia, si bien su magnitud es tal que permite observar con claridad las diferencias de resistencia generadas a lo largo de la brazada.

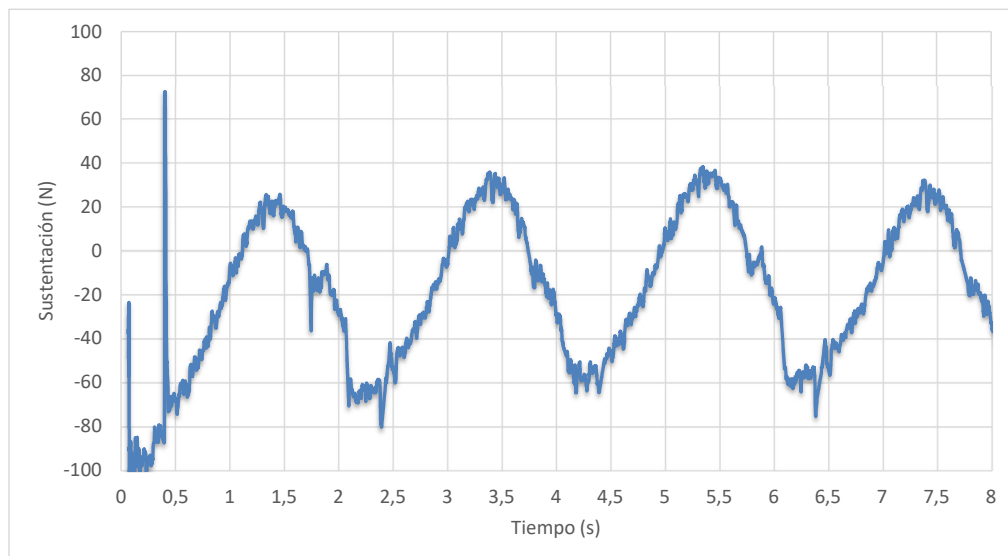


Figura 4.11: Sustentación en función del tiempo para el estudio monofásico

En el caso de la sustentación (figura 4.11) ocurre un hecho similar: también es un valor oscilatorio de periodo 1 segundo, pero, en este caso, desfasado de la resistencia medio periodo. Esto se debe a que resistencia y sustentación son dos fenómenos provenientes de la misma fuerza resultante. Es decir, la presencia del cuerpo interrumpiendo la trayectoria

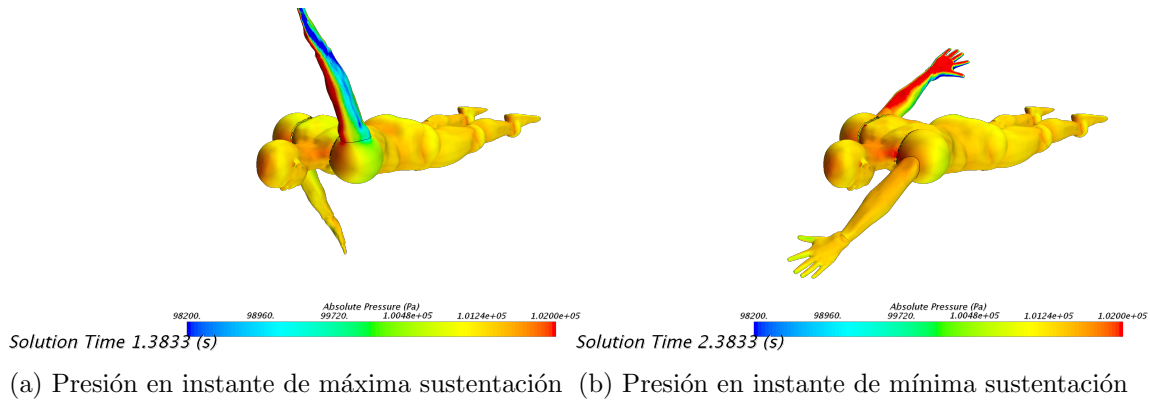


Figura 4.12: Escena de presión sobre el cuerpo del nadador en los instantes de máxima y mínima sustentación

del fluido genera diferencias de presiones en el fluido y la distribución de presiones no uniforme a lo largo del cuerpo genera una fuerza resultante, pues el fluido tiende a viajar de zonas de alta presión a zonas de baja presión. En el caso del brazo totalmente vertical, el fluido impacta en su superficie sin poderse readherir, generando una sobrepresión muy grande en la cara de impacto del fluido, pues éste ha de detenerse, y una gran depresión en la cara aguas abajo. La fuerza resultante es prácticamente toda en la dirección del flujo, X . Si se descompone la fuerza resultante en sus componentes longitudinal y perpendicular al flujo se obtienen las fuerzas de sustentación y resistencia. Por tanto, con los brazos verticales, siendo la fuerza resultante en dirección X , la fuerza obtenida debido a los brazos es de resistencia y no de sustentación, lo que explica el desfase de máxima sustentación respecto de máxima resistencia. La máxima sustentación se producirá en un instante en que la fuerza resultante sea grande (es decir, que no esté el brazo orientado con el flujo) pero no totalmente perpendicular, para que el ángulo α de descomposición (ec. 4.1) tenga relevancia.

$$L = F \cdot \sin\alpha \tag{4.1}$$

Donde L es la fuerza de sustentación, Lift, F es la fuerza resultante de la distribución de presiones y α el ángulo entre el brazo y la vertical.

Así, los picos de sustentación máxima se producen en los instantes $t = 1,38 s + 0,5 \cdot k s$ siendo k un número natural. Podemos comprobar cuál es la distribución de presión en el cuerpo del nadador en los instantes en que la sustentación es máxima y mínima mediante una escena de presión (ver figura 4.12).

En la figura 4.12 se observa con claridad que ocurre el fenómeno antes descrito: en el instante de máxima sustentación (figura 4.12a) la parte del brazo aguas arriba sufre una gran sobrepresión y la cara del brazo aguas abajo una depresión. Esto hace que el flujo realice una fuerza sobre el brazo perpendicular al mismo. Conforme más baje el brazo mayor será el ángulo formado con la vertical y mayor la proyección vertical (sustentación), similar a lo que ocurre en un perfil alar con el ángulo de ataque. Sin embargo, también disminuirá en gran medida la diferencia de presiones sobre ambas caras del brazo, reduciendo por tanto la fuerza total generada. Es decir, la posición de máxima sustentación se encuentra en un compromiso entre máxima fuerza resultante y máximo ángulo formado. En esta posición, el ángulo formado con la vertical es de 35° .

Con esta técnica de brazada y con el nadador totalmente sumergido no se produce una

sustentación efectiva, es más, la sustentación oscila entre 40 N y -60 N, es decir, que en las fases del movimiento que no favorecen la sustentación se genera incluso una fuerza que tiende a hundir al cuerpo, lo cual no resulta en absoluto beneficioso.

4.4.2. Estudio en superficie

El estudio en superficie, bifásico, realizado es análogo al de inmersión. En este caso, se espera ver el beneficio de realizar el recobro de la brazada en la fase aérea, pues al ser un fluido de mucha menor densidad, las fuerzas de resistencia, que son inevitables, serán mucho menores que con el recobro también sumergido.

Se han simulado, como en el caso anterior, dos ciclos de 4 segundos cada uno, con las mismas velocidades angulares. Podemos representar la evolución de la resistencia conforme avanza el movimiento de brazada, como se ve en la figura 4.13.

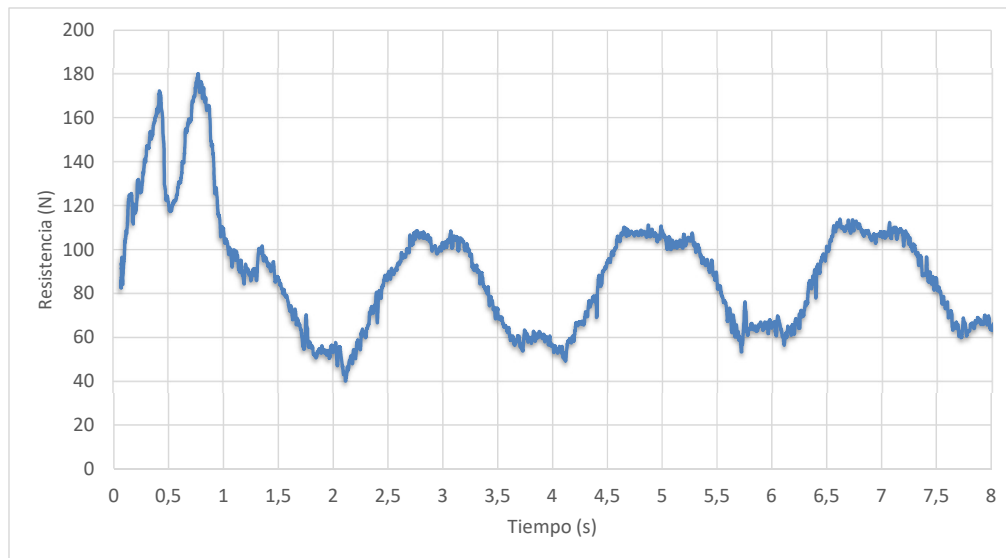


Figura 4.13: Resistencia en función del tiempo para el estudio bifásico

Se obtiene en la figura 4.13, tal y como se esperaba, una evolución cíclica de período 1 segundo de la fuerza de resistencia, de igual forma que ocurre con el estudio monofásico. Se producen los máximos en las posiciones en las que los brazos están en vertical, siendo estos valores máximos de aproximadamente 100 N de fuerza. Si bien estos valores se asimilaran a los del caso monofásico, este estudio bifásico se ha realizado con una velocidad considerablemente mayor, de 2 m/s, lo cual se corresponde con hacer los 100 metros en 50 segundos, siendo el récord olímpico actual de 46,91 segundos.

El beneficio que representa realizar el recobro en aire y no sumergido se puede observar con claridad por el hecho de que, mientras que en el caso monofásico el coeficiente de resistencia (obtenido adimensionalizando de igual forma que en el capítulo 4.4.1) oscilaba entre 1,3751 y 0,4125, ahora en este caso oscila únicamente entre 0,3437 y 0,2062 (lo que se correspondería con valores absolutos de entre 100 N y 60 N). Es decir, no sólo se ha reducido el coeficiente de resistencia máximo en un 75 %, sino que se ha reducido mucho la diferencia entre el máximo valor de resistencia y el mínimo. Esto significa que la fase de recobro no genera pérdidas tan grandes debido a que se efectúa en fase aérea, con una

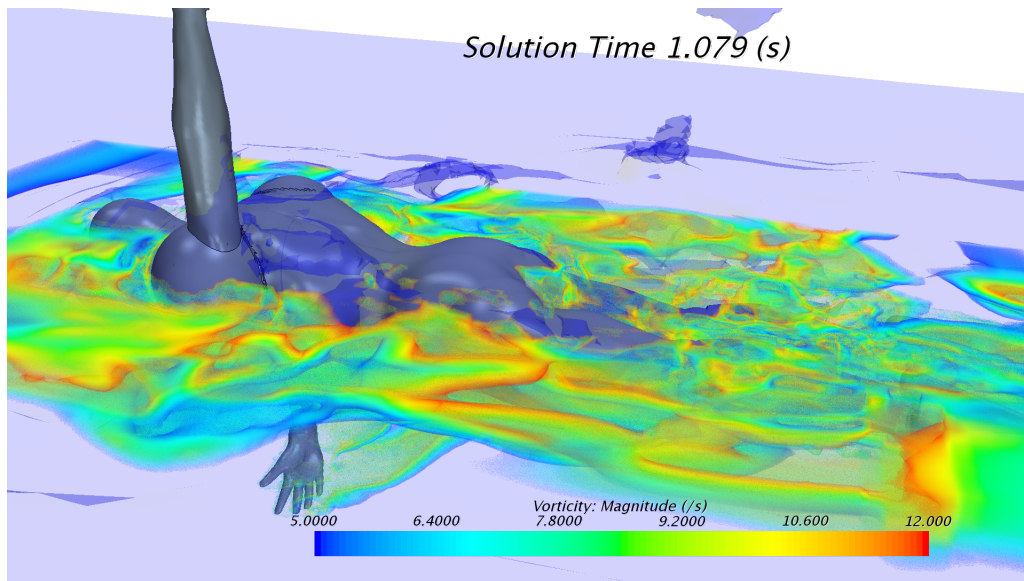


Figura 4.14: Escena de vorticidad en el instante $t = 1,093 s$

densidad aproximadamente 1000 veces menor.

Si obtenemos una escena de vorticidad del nadador en la figura 4.14 se puede observar que la parte sumergida de la brazada genera vorticidades similares a las del caso monofásico. Además, la superficie del agua, como cabe esperar, genera en sí mucha vorticidad alrededor del cuerpo del nadador, pues al flujo le cuesta adaptarse. Esto pone de manifiesto también la contribución del cuerpo a la resistencia, que no está producida únicamente por los brazos, sino también por la depresión causada detrás del nadador. Los contornos de vorticidad nos permiten visualizar también la zona de desprendimiento detrás del cuerpo del nadador.

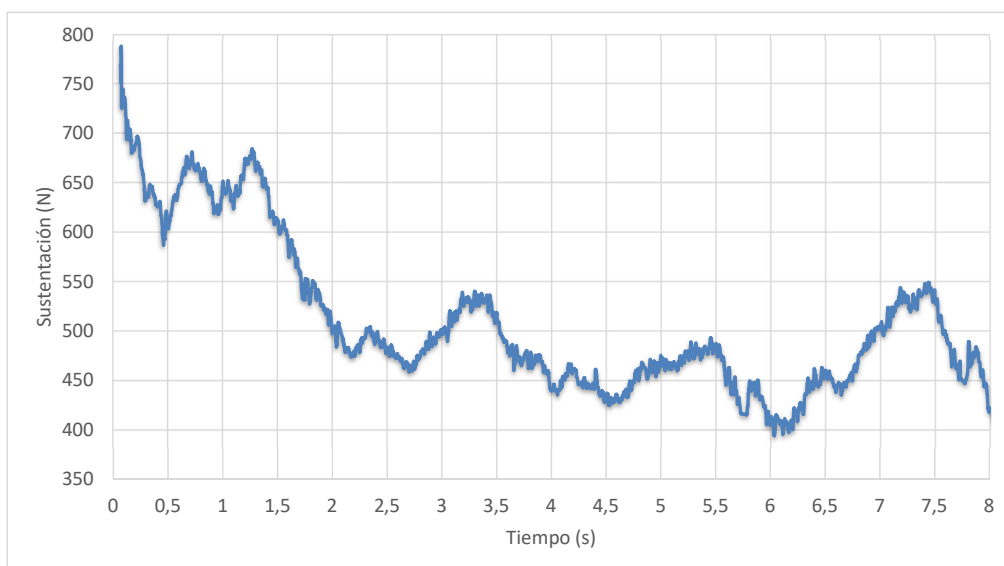


Figura 4.15: Sustentación en función del tiempo para el estudio bifásico

Respecto de la sustentación, cuya evolución se puede ver en la figura 4.15, se tiene

también oscilación, pero los valores cambian sustancialmente respecto del caso monofásico. Con el nadador sumergido se obtenían sustentaciones pequeñas e incluso negativas (entre 40 N y -60 N), pero con el caso bifásico y el nadador en la superficie del agua la sustentación oscila entorno a 450 N. Esto es debido a que la presión que genera el agua sobre el cuerpo es mayor que la que genera el aire, debido a la diferencia de densidades y viscosidades existentes entre ellas. Por tanto, entre la parte inferior y superior del cuerpo existe un diferencial de presiones que tiende a empujar el cuerpo hacia arriba, a diferencia de lo que ocurre con el cuerpo totalmente sumergido, en el que el diferencial de presiones es debido no a un fluido diferente sino a la forma del cuerpo y es mucho menor.

4.4.3. Comparación estacionario-transitorio

Para justificar la necesidad o no de realizar un estudio como éste en transitorio, con las dificultades y costes computacionales que éste conlleva, podemos comparar en una misma posición corporal la solución que se obtiene en estacionario y en transitorio con movimiento.

Se realizará esta comparación con la posición inicial del movimiento. Se tomará como valor de resistencia transitorio el valor para esta posición al final de la segunda vuelta del movimiento de brazada ($t = 8,064 s$).

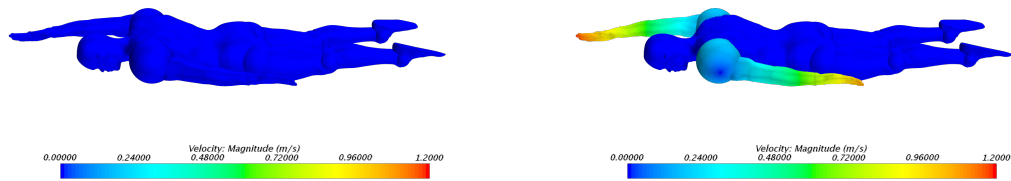
Por tanto, en esta misma posición inicial realizamos el cálculo sin ningún tipo de movimiento en el cuerpo y con las mismas condiciones iniciales, de contorno y de *solvers*. Tras converger el caso comparamos los valores de resistencia obtenidos para cada caso:

Resistencia	
Estacionario	46,12 N
Transitorio	63,31 N

Cuadro 4.3: Comparación de la resistencia obtenida con estudio estacionario vs transitorio.

En el estudio estacionario se obtuvo una resistencia en la posición inicial de 46,12 N. En el estudio con movimiento los valores se ha visto que eran oscilantes, entre 100 N y 63,31 N, por lo que se ve que el efecto del movimiento genera una resistencia adicional.

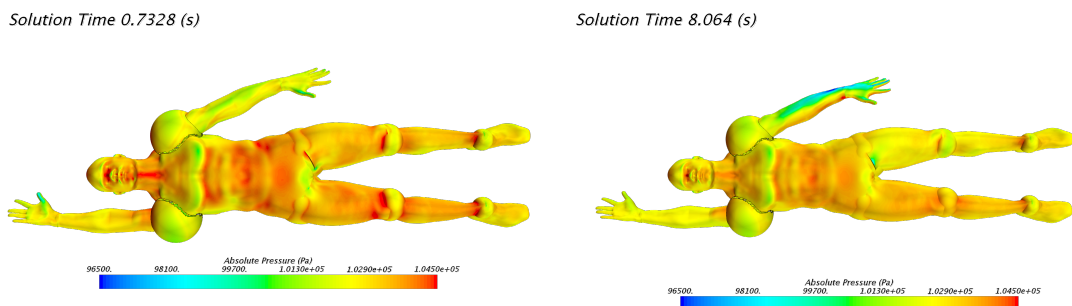
Esta diferencia, para la posición menos resistiva es del 27 %, excesivamente elevada para un análisis correcto, más aún en competición donde cada milésima de segundo ganada es oro.



(a) Velocidad sobre el cuerpo caso estacionario (b) Velocidad sobre el cuerpo caso transitorio

Figura 4.16: Comparación de velocidad sobre el cuerpo en estacionario vs transitorio

Además, si obtenemos una escena de velocidad sobre el cuerpo del nadador (ver figura 4.16) en ambos casos se ve con claridad el efecto que tiene el movimiento. En el caso estacionario (figura 4.16a) el cuerpo entero está sin velocidad mientras que en el transitorio (4.16b) el brazo entero tiene velocidad, más grande conforme se aleja del centro del hombro sobre el cual se genera la rotación. La consecuencia inmediata de esto es que debido a la condición de no-deslizamiento sobre las paredes el flujo en contacto con el cuerpo tiene velocidad en el caso transitorio en las zonas de los brazos. Como esta velocidad es perpendicular al brazo habrá instantes en los que la velocidad inducida por el movimiento en la zona pegada al brazo será perpendicular a la dirección de entrada de flujo, perturbándolo en gran medida y generando resistencia. Esta generación de resistencia no está contemplada en un estudio estacionario o cuasi-estacionario, razón por la cual se subestima la resistencia obtenida si se realiza de esta forma.



(a) Presión sobre el cuerpo caso estacionario (b) Presión sobre el cuerpo caso transitorio

Figura 4.17: Comparación de presión sobre el cuerpo en estacionario vs transitorio

Con una escena de presión sobre el cuerpo también se hacen visibles las diferencias generadas por la adición de movimiento, como se ve en la figura 4.17. Sobre el cuerpo fijo del nadador de las dos figuras 4.17a y 4.17b se obtiene una distribución de presión muy similar, si bien se observa una mayor presión sobre el cuerpo en estado estacionario, pero resultando en una diferencia no significativa. Donde sí se observa grandes diferencias es sobre los brazos en movimiento. En la figura 4.17b el brazo izquierdo se estaría moviendo perpendicular al papel introduciéndose en él, y se observa cómo la parte más visible tiene una gran depresión que no se observa en el caso anterior. Ésto responde a la clara lógica de que aguas abajo de un cuerpo que perturba el fluido existe una caída de presión. En cambio, en la parte opuesta se aprecia cómo se produce una sobrepresión. Esto provoca sobre el brazo un diferencial de presión que se puede ver que no existe en el caso estacio-

nario. Por tanto, esta diferencia de presión crea una fuerza resultante que, dependiendo del instante se convertirá más en resistencia o sustentación. Esta fuerza resultante no es captada por un análisis estacionario o cuasi-estacionario, reforzando una vez más la necesidad de realizar un estudio transitorio.

Finalmente, otra fuente de resistencia no-estacionaria que sólo se obtendría en un análisis transitorio es la comentada en el capítulo 2.2 y es la creada por la masa aparente. Con el movimiento no sólo se mueve el brazo sino una zona de fluido cercano a él y que es conocida como masa aparente y el movimiento de dicha masa aparente genera, de nuevo, resistencia activa que no se tendría en cuenta en un estudio estacionario.

Por tanto, la resistencia activa en la brazada en un instante determinado se ha visto que es mayor que la resistencia pasiva (estacionaria) generada por la misma posición corporal. En definitiva, resulta necesario para hacer un estudio completo CFD en el ámbito de la competición de las fuerzas generadas en natación realizar estudios transitorios con movimiento y no estacionarios o cuasi-estacionarios, pues estos últimos subestiman las fuerzas hidrodinámicas generadas.

4.4.4. Alcance de la técnica *overset* para estudios de movimiento corporal

Con este trabajo de fin de grado también se ha querido juzgar el alcance de la técnica de mallado *overset* para estudios de movimiento corporal. Para ello vamos a fijarnos en dos aspectos fundamentales: la capacidad de representar con fidelidad el movimiento deseado y la validez de los resultados obtenidos.

En cuanto a su aptitud para modelar un movimiento complejo como sería el de la brazada de la natación se ha demostrado que la técnica es aplicable, si bien no ha sido diseñada para ello. Se han sucedido numerosos problemas debido al contacto existente entre la parte de cuerpo móvil y fija, como también hubiera ocurrido entre dos partes sólidas móviles. Esto ha limitado en gran medida la complejidad del movimiento, pues se ha tenido que simplificar.

Se querría haber modelado también el movimiento en el codo, pero dados los numerosos problemas que ya causaba la articulación del hombro se decidió simplificarlo a una sola articulación.

Sin embargo, para realizar estudios preliminares, en los que no se requiere un alto grado de precisión en el movimiento, la técnica de mallado *overset* se presenta como una gran opción, por su facilidad de comprensión e implementación, en comparación con otras técnicas como *morphing*.

Respecto de la validez de los resultados obtenidos, se ha visto que el hecho de discretizar el dominio mediante mallas distintas que se interpolan entre sí en sus límites no ha supuesto una pérdida de precisión, pues los valores de resistencia obtenidos con y sin mallado *overset* son casi idénticos.

Sin embargo, en la representación de algunas escenas se puede observar la presencia de la malla *overset* pese a haber asegurado que el tamaño de celda de la malla *background* en toda la región por la que se mueve la malla *overset* es idéntico al de la malla *overset*. Este fenómeno se puede observar en determinados instantes de las escenas de vorticidad,

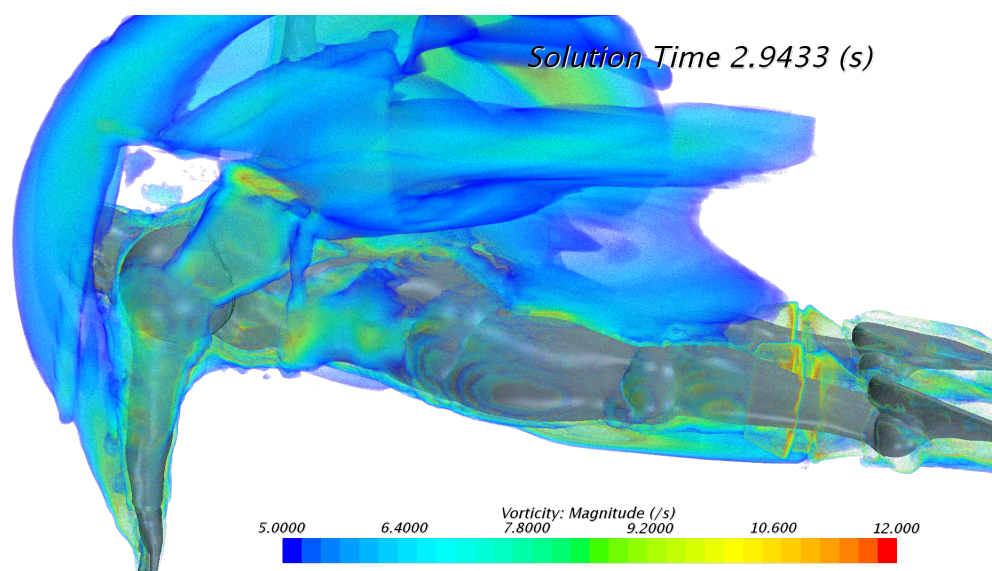


Figura 4.18: Escena de vorticidad donde se aprecia la presencia de la malla *overset*

como en la figura 4.18.

En la figura 4.18 se puede ver cómo la vorticidad generada se 'corta' por la presencia de la caja donde se ha realizado el mallado *overset*, dejando apreciables sus límites, lo cual no es deseable pues muestra los límites de una caja que en realidad no existe.

Habiéndose encontrado un defecto así tan sólo en un tipo de escena, se puede concluir que la técnica de mallado *overset* no presenta desventajas con respecto a una malla convencional, es decir, que se obtienen los mismos resultados permitiendo realizar simulaciones más complejas.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

Índice

5.1. Conclusiones	55
5.1.1. Conclusiones del trabajo en un entorno profesional	55
5.1.2. Conclusiones del estudio CFD	56
5.2. Trabajos futuros	57

5.1. Conclusiones

Se van a presentar a continuación las conclusiones extraídas de la realización del presente Trabajo de Final de Grado, diferenciadas en las conclusiones relativas al desempeño de un trabajo en un entorno profesional y las conclusiones relativas al estudio CFD.

5.1.1. Conclusiones del trabajo en un entorno profesional

- Este Trabajo de Final de Grado ha sido realizado en el transcurso de todo un año dentro de uno de los despachos del Centro de Motores Térmicos sito en la Universidad Politécnica de Valencia. Por tanto, suponía un primer contacto con el mundo laboral, pues el trabajo tutorizado se asemeja a unas prácticas en empresa, con la salvedad de que el trabajo realizado es para uno mismo y no para la empresa.
- Se han conseguido los objetivos planteados, pues se ha trabajado en equipo pese a realizar un trabajo individual. Así, no se ha profundizado únicamente en el área de estudio del proyecto sino que se ha aprendido de muchos otros ámbitos en los que se ha trabajado en el despacho.
- El trabajo ha sido de larga duración (1 año) y por tanto ha sido necesaria una buena planificación. Se ha cumplido con un horario de trabajo y se han hecho listas de objetivos a corto plazo.
- Se ha comprobado que se han aprendido los conocimientos necesarios de Ingeniería Aeronáutica que en el Grado se imparten. Es por ello que ha sido posible afrontar un proyecto real como este en el que surgen problemas generados tanto por una mala preparación del cálculo como por desconocimiento de algunas características del

programa. Sin embargo, como se poseían los conocimientos necesarios, una búsqueda exhaustiva en bibliografía permitía no sólo corregir errores sino aprender cómo funcionan los *softwares* CFD. Por tanto, además de otorgar experiencia y favorecer el asentamiento de los conocimientos adquiridos, el proyecto ha servido también para interiorizar el *know-how* o buenas prácticas de los programas de CFD, necesario para convertirse en experto.

- La toma de contacto con el entorno empresarial ha resultado muy satisfactoria.

5.1.2. Conclusiones del estudio CFD

- Como técnico especialista en CFD se ha realizado un análisis CFD en su totalidad, desde la obtención de la geometría hasta el post-procesado y redacción de la memoria. Con ello se ha aprendido con mayor profundidad el significado y relevancia de cada uno de los pasos necesarios para el *set-up* y se ha podido entender mejor cómo funciona un *software* de este tipo, pues es indispensable para poder solucionar todos los problemas que surgen.
- Se ha lidiado con los problemas propios de cualquier estudio CFD, viéndose que el *set-up* definitivo y apropiado para cada caso resulta de un proceso iterativo donde se ha de asegurar que nada se ha seleccionado de forma aleatoria sino con total convicción. Solo así se puede confiar en los resultados obtenidos.
- En cuanto al estudio realizado en sí se ha comprobado que la brazada simplificada de crol no resulta aplicable para el buceo, pues la fase de recobro en la que el brazo se mueve aguas arriba produce una gran resistencia. Por tanto, se ha visto el beneficio que supone que esta fase de recobro se haga a través del aire, un fluido mucho menos denso, generando mucha más resistencia. Esto se puede observar de la menor diferencia existente entre las posiciones que generan mayor y menor resistencia.
- La resistencia activa que se genera en el movimiento de brazada de natación resulta ser mayor que la resistencia pasiva, si se comparan instantes en los que se tiene la misma posición. Por tanto, un estudio cuasi-estacionario subestimaría la generación de resistencia, como se predecía en el capítulo 2.2.
- Se ha visto que la implementación del movimiento mediante *overset* no es del todo perfecta. En primer lugar, porque no permite recrear movimientos tan complejos de forma realista, puesto que para ello debería 'romperse' la geometría en tantas partes como articulaciones, generando sucesivos problemas de contacto entre cuerpos distintos. En segundo lugar, porque se ha visto que en determinadas escenas la resolución de colores permite mostrar los límites de las regiones *overset*, límites que no son reales y que por tanto no deberían aparecer. Finalmente, el movimiento definido mediante una función a trozos genera también problemas de convergencia. Cada momento en el que se produce un cambio instantáneo de velocidad angular la solución se ve muy afectada por el cambio, llegando a diverger si el *time-step* es demasiado elevado. Si no diverge y recupera la solución, en los instantes posteriores se observará una solución errónea pero tras dichos instantes se recupera la solución

correcta. Esto se puede observar por ejemplo en la gráfica de la resistencia en superficie 4.13, donde no se obtienen picos perfectos de máxima y mínima resistencia, sino que son picos achatados. También se observan anomalías cíclicas a lo largo de toda la gráfica debidas, de nuevo, a este cambio de movimiento.

- La técnica de mallado *overset* puede ser usada para realizar estudios preliminares en los que se desee implementar un movimiento entre dos partes que están en contacto, para obtener unos primeros órdenes de magnitud. Sin embargo, si se desea reproducir un movimiento con contacto de manera fiel se debe recurrir a otras técnicas como el caso del *morphing*, que es capaz de moldear la malla, modificando incluso en cierta manera la geometría.

5.2. Trabajos futuros

Este proyecto deja una vía libre para su posterior desarrollo. Ha resultado ser una primera aproximación a la reproducción de un movimiento complejo humano en un programa de Mecánica de Fluidos Computacional.

Por tanto, queda pendiente ahondar en el uso de malla *overset*, aplicando un tercer movimiento a cada brazo, sobre el grado de libertad restante (eje X) que adapte la posición de la mano para una correcta entrada y salida del agua.

Para representar más fielmente la brazada se podría tratar de repetir los pasos necesarios para separar y mover los brazos con el antebrazo, de manera que se tengan dos articulaciones: hombro y codo.

Sería también de gran interés estudiar el beneficio que genera el movimiento de rolido, para lo cual se debería incorporar el cuerpo que en este estudio era fijo en una nueva malla *overset* y aplicarle un movimiento de rotación alrededor de su eje longitudinal (X).

Finalmente, queda pendiente la implementación de la técnica de *morphing* que se presenta como el método más realista de generar movimiento corporal, pues ha sido recientemente aplicado para conseguir representar un ciclista pedaleando.

El movimiento mediante *morphing* en STAR-CCM+ redistribuye los vértices de la malla en respuesta al movimiento de una serie de puntos de control, que son considerados como una nube de puntos superpuesta en la malla de dominio. Los puntos de control y sus movimientos asociados forman una referencia que el *morpher* emplea para interpolar el resto de puntos. Esto permite realizar un movimiento no rígido, por lo que cada región *overset* podría doblarse sobre sí misma y admitir cierta flexibilidad.

Capítulo 6

Pliego de condiciones

Índice

6.1. Introducción	59
6.2. Condiciones del puesto de trabajo	59
6.2.1. Condiciones de salud y seguridad	59
6.3. Condiciones de los recursos informáticos	62
6.3.1. Condiciones del hardware	62
6.3.2. Condiciones del software	63

6.1. Introducción

En este capítulo se analizará la legislación vigente en materia de seguridad en el puesto de trabajo para comprobar que durante la realización de este proyecto se han cumplido todas las disposiciones vigentes.

6.2. Condiciones del puesto de trabajo

Las condiciones necesarias para asegurar unas buenas condiciones del puesto de trabajo están reguladas mediante el Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización. Y es que los trabajos que requieren pantallas de visualización conllevan riesgos para la salud del trabajador usuario de la pantalla que han de minimizarse.

También es menester respetar la Guía Técnica elaborada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) que acompaña al citado Real Decreto.

6.2.1. Condiciones de salud y seguridad

El empresario adoptará las medidas necesarias para que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización no suponga riesgos para su seguridad o salud o, si ello no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo. El empresario deberá evaluar los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, teniendo en cuenta en particular los posibles riesgos para la vista y los problemas físicos y de carga mental, así como el posible efecto añadido o combinado de los mismos.

La evaluación se realizará tomando en consideración las características propias del puesto de trabajo y las exigencias de la tarea y entre éstas, especialmente, las siguientes:

- El tiempo promedio de utilización diaria del equipo.
- El tiempo máximo de atención continua a la pantalla requerido por la tarea habitual.
- El grado de atención que exija dicha tarea.

Si la evaluación pone de manifiesto que la utilización por los trabajadores de equipos con pantallas de visualización supone o puede suponer un riesgo para su seguridad o salud, el empresario adoptará las medidas técnicas u organizativas necesarias para eliminar o reducir el riesgo al mínimo posible. En particular, deberá reducir la duración máxima del trabajo continuado en pantalla, organizando la actividad diaria de forma que esta tarea se alterne con otras o estableciendo las pausas necesarias cuando la alternancia de tareas no sea posible o no baste para disminuir el riesgo suficientemente.

Medidas de emergencia

Deberán haber sido adoptadas las medidas de emergencia en lo referente a vías y salidas de emergencia, así como su correcta señalización, siendo de debido conocimiento por los trabajadores. Se va a suponer que todas estas medidas ya fueron debidamente implantadas y evaluadas durante el proceso de construcción de la instalación, donde se tuvo en cuenta su finalidad experimental y las características que la misma exige.

Protección contra incendios

La correcta implementación y validación de las medidas de protección contra incendios requieren que todas las instalaciones estén diseñadas, implantadas y mantenidas por empresas debidamente autorizadas por el organismo competente.

Instalación eléctrica

La instalación eléctrica debe estar proyectada, puesta en funcionamiento y mantenida por una empresa debidamente autorizada por el Ministerio de Industria y Energía o por la Conserjería de Industria de la comunidad autónoma dónde se encuentre el puesto de trabajo. Esta instalación debe evitar originar contactos con las personas, incendios y explosiones, ateniéndose para ello a lo establecido sobre tensiones y seguridad en los Reglamentos de Baja y Alta Tensión en vigor.

Referido a los equipos que incluyen pantalla de visualización, se debe cumplir:

- Reducir a niveles insignificantes toda la radiación electromagnética.
- Garantizar el adecuado mantenimiento de los cables y conexiones.
- Mantener separados los cables eléctricos de los telefónicos.
- Emplear longitudes de cable suficientes como para permitir futuros cambios.
- Facilitar el acceso y mantenimiento de los cables sin interrupción de las actividades del trabajo, evitando ubicarlos sobre superficies donde puedan ser pisados o sometidos a condiciones adversas.

Condiciones termohigrométricas

El citado Real Decreto se recogen las siguientes especificaciones de temperatura y humedad para garantizar el bienestar y confort térmico de los trabajadores:

- La temperatura operativa de confort debe situarse entre 23°C y 26°C en verano y entre 20°C y 24°C en invierno.
- La humedad relativa del aire debe mantenerse siempre entre el 45 % y el 65 %.

Iluminación

La iluminación puede ser natural o artificial, siendo más recomendable la natural, pero debido a que su intensidad varía con la hora del día y con la época del año, generalmente debe complementarse con iluminación artificial, ya siendo general o localizada. Se debe tener en cuenta que ningún tipo de iluminación, ya sea natural o artificial, debe producir deslumbramientos ni un excesivo contraste entre zonas iluminadas y de sombra, tal como se establece en la normativa específica para estos puestos de trabajo.

Los niveles de iluminación serán suficientes para el correcto desarrollo de las tareas que se realicen en el puesto de trabajo. Además, la ubicación y orientación del puesto y la pantalla deben evitar reflejos y deslumbramientos.

Los niveles de iluminación deberán ser suficientes para las tareas que se realicen en el puesto de trabajo, siempre que no alcancen valores que reduzcan el contraste de la pantalla por debajo de lo tolerable. Para evitar deslumbramientos por reflejos, las superficies del mobiliario y de los elementos de trabajo deben tener un acabado mate.

Ergonomía: diseño del puesto de trabajo

El diseño del puesto de trabajo está directamente relacionado con los problemas posturales. Si se tiene en cuenta que el trabajo con pantallas de visualización se caracteriza por posturas estáticas prolongadas, se puede deducir que los efectos de estas posturas se agravan cuando el diseño del puesto de trabajo es incorrecto.

- **Asiento:** La altura del asiento debe ser ajustable dentro del rango necesario para el conjunto de usuarios, así como su profundidad e inclinación. El respaldo debe tener una suave prominencia para dar apoyo a la zona lumbar. Se recomienda la utilización de sillas dotadas de ruedas, aunque la resistencia de las ruedas a iniciar el movimiento debe evitar desplazamientos involuntarios en suelos lisos y con actividades de tecleo intensivo.
- **Mesa:** La superficie de la mesa de trabajo debe ser poco reflectante y de dimensiones suficientes como para permitir movimientos de trabajo y cambiar de postura. Además, debe permitir una colocación flexible de la pantalla, teclado, documentos y material necesario.
- **Colocación de la pantalla:** La distancia óptima entre usuario y pantalla debe ser entre 45 y 75 cm, en cuanto a confort visual se refiere. Debe colocarse tal que su área útil pueda ser vista bajo ángulos comprendidos entre la línea horizontal de

visión y la trazada a 60º bajo la horizontal. En el plano horizontal, la pantalla debe estar colocada dentro de un ángulo de 70º, dentro del campo de visión del usuario.

- **Pantalla:** La imagen de la pantalla debe ser estable, sin destellos. La luminosidad y contraste deben ser regulables por el usuario. Además, la pantalla debe ser orientable e inclinable.
- **Teclado:** El teclado debe estar inclinado y ser independiente de la pantalla, de modo que permita adoptar al trabajador la postura más cómoda posible, que no provoque cansancio en brazos y manos.
- **Equipos de protección individual:** Es recomendable el uso de protectores de pantalla, que consisten en un cristal polarizado, sostenido por un marco, que se superpone al cristal de la pantalla. Los protectores consiguen proteger la vista de los usuarios y mejoran las prestaciones de la pantalla en cuanto a contraste y claridad.

Ruido

En el Real Decreto 1316/1989 del 27 de octubre se establece que el empresario debe evaluar la exposición de los trabajadores al ruido, con el objeto de determinar si se superan los límites establecidos en esta norma y en su caso aplicar las medidas procedentes. Para evitar exceder el límite máximo, establecido en 55dB, deben utilizarse equipos con una emisión sonora mínima, además de optimizar la acústica del lugar de trabajo.

6.3. Condiciones de los recursos informáticos

El presente proyecto se ha realizado con ayuda necesaria de recursos informáticos, que pueden dividirse en software y hardware.

6.3.1. Condiciones del hardware

En cuanto a hardware, dadas las exigencias de los cálculos a realizar se ha tenido que alternar el uso de un ordenador personal portátil para el *managing* del *set-up* de los cálculos, y un ordenador de sobremesa de altas prestaciones para realizar los cálculos de forma ininterrumpida. Tanto unas máquinas como otras requieren un mantenimiento periódico para asegurar su perfecto funcionamiento.

Equipo portátil Toshiba Satellite L50-B

- Procesador: Intel® Core™ i7-4500U CPU @ 2,40 GHz
- Número de procesadores: 4
- Memoria RAM: 8GB
- Tarjeta gráfica: AMD® Radeon R7 M260
- Unidad de almacenamiento: HDD 685GB Toshiba MQ01ABD075

- Sistema Operativo: Windows ®10 Home
- Arquitectura: 64 bits

6.3.2. Condiciones del software

El software, por su parte, consiste en los programas de CAD y de mecánica de fluidos computacional empleados. Se trata de AUTODESK INVENTOR para el CAD y de STAR-CCM+ como programa de mecánica de fluidos computacional.

Capítulo 7

Presupuesto

Índice

7.1. Actividades realizadas	65
7.2. Recursos empleados	66
7.3. Presupuestos parciales	66
7.4. Presupuesto total del proyecto	67

Se pretende ahora dar una estimación monetaria del trabajo realizado para llevar a cabo este Trabajo de Final de Grado. Se considerarán las horas dedicadas al proyecto y los recursos empleados.

No se van a tener en cuenta los costes del equipo informático por estar completamente amortizado (4 años), ni tampoco la obtención de la geometría del nadador al haberse utilizado la obtenida en el Trabajo de Final de Grado precedente [9].

7.1. Actividades realizadas

Se han llevado a cabo las siguientes actividades para la consecución del proyecto:

- **Recopilación de información:** Búsqueda de bibliografía experta en el tema, tanto a nivel teórico como a nivel de estudios de CFD. Se basa en artículos científicos y libros.
- **Geometría y mallado:** Se disponía de la geometría base. Para adaptarla al movimiento se tuvieron que realizar una serie de modificaciones tanto CAD en AUTODESK INVENTOR como de *set-up* en STAR-CCM+. En el mallado se invirtió una gran parte del tiempo, pues una malla adecuada es fundamental tanto para obtener una solución correcta como para que el movimiento *overset* se lleve a cabo sin problemas.
- **Configuración de los casos de estudio y cálculo:** Implementación de los estudios a realizar en el software, conformando el *set-up* adecuado para cada uno. Ejecución del cálculo, con su correspondiente monitorización mediante residuales, escenas y *reports*. Dados los numerosos problemas sorteados debido al contacto entre dos cuerpos, el cálculo es la actividad que supone el mayor porcentaje del tiempo invertido.

- **Postprocesado:** Finalizado el cálculo es necesario analizarlo y obtener resultados y conclusiones válidas, pues esa es el objetivo de cualquier proyecto. Para facilitar la comprensión de los resultados es muy útil su presentación en forma de gráficas y contornos, pudiéndose también obtener vídeos a partir de imágenes extraídas a lo largo de todo el cálculo.
- **Memoria:** Redacción de la presente memoria.

7.2. Recursos empleados

Los recursos empleados se pueden agrupar en 2 categorías claramente diferenciadas: recursos humanos y recursos materiales. En cuanto a los recursos humanos se ha necesitado a 1 ingeniero y a 1 especialista en CFD. Por su parte, como recursos materiales se ha dispuesto de un ordenador portátil personal y de una *workstation*, así como de las pertinentes licencias de software.

7.3. Presupuestos parciales

Se presentan los presupuestos de las actividades en la tabla 7.1.

Recopilación de información	Medida (h)	Precio unitario (€/h)	Coste (€)
Ingeniero	25	20	800
Especialista en CFD	20	15	1050
Licencias	30	0,4	12
		Total	812
Geometría y mallado	Medida (h)	Precio unitario (€/h)	Coste (€)
Ingeniero	25	20	1000
Especialista en CFD	60	15	2450
Licencias	95	0,4	38
		Total	1438
Set-up y cálculo	Medida (h)	Precio unitario (€/h)	Coste (€)
Ingeniero	50	20	2000
Especialista en CFD	110	15	4550
Licencias	700	0,4	280
		Total	2930
Postprocesado	Medida (h)	Precio unitario (€/h)	Coste (€)
Ingeniero	30	20	1200
Especialista en CFD	10	15	350
Licencias	40	0,4	16
		Total	766
Memoria	Medida (h)	Precio unitario (€/h)	Coste (€)
Ingeniero	30	20	1200
Especialista en CFD	5	15	175
Licencias	5	0,4	2
		Total	677

Cuadro 7.1: Presupuestos parciales

Por su parte, se ha utilizado como hardware un ordenador portátil personal ya amortizado y una *Workstation* parcialmente amortizada, cuyo coste total está presentado en la tabla 7.2.

Hardware	Años	Coste inicial(€)	Amortización (€)	Coste total (€)
Portátil personal	4 años	800	800	0
Workstation	2 años	6000	1500	4500
			Total	4500

Cuadro 7.2: Coste total del hardware empleado

7.4. Presupuesto total del proyecto

Sumando la contribución de todos los presupuestos parciales, tanto los asociados a actividades como los costes derivados de la utilización de hardware se obtiene el presupuesto total sin aplicar el IVA recogido en la tabla 7.3.

Recurso	Coste (€)
Actividades	6623
Hardware	4500
Total	11123

Cuadro 7.3: Presupuesto total del proyecto sin IVA

Añadiendo el aplicable 21 % de IVA, se obtiene el presupuesto final total del proyecto, recogido en la tabla 7.4.

Descripción	Coste (€)
Presupuesto total sin IVA	11123
21 % IVA	4120,83
Total con IVA	13458,84

Cuadro 7.4: Presupuesto total del proyecto con IVA

Por tanto, el presupuesto total del proyecto asciende a:

Trece mil cuatrocientos cincuenta y ocho euros con ochenta y cuatro céntimos

Bibliografía

- [1] Alfred Von Loebbecke, Rajat Mittal, Frank Fish y Russell Mark. “A comparison of the kinematics of the dolphin kick in humans and cetaceans”. En: *Human Movement Science* 28.1 (2009), págs. 99-112.
- [2] Alfred von Loebbecke, Rajat Mittal, Frank Fish y Russell Mark. “Propulsive efficiency of the underwater dolphin kick in humans”. En: *Journal of Biomechanical Engineering* 131.5 (2009), pág. 054504.
- [3] AR Vorontsov y VA Rumyantsev. “Resistive forces in swimming”. En: *Biomechanics in sport* 1 (2000), págs. 184-204.
- [4] ANDREw D Lyttle, BA Blanksby, BC Elliot y David G Lloyd. “The effect of depth and velocity on drag during the streamlined guide”. En: *Journal of Swimming Research* 13 (1998), págs. 15-22.
- [5] Barry Bixler y Scott Riewald. “Analysis of a swimmer’s hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics”. En: *Journal of biomechanics* 35.5 (2002), págs. 713-717.
- [6] Barry Bixler, David Pease y Fiona Fairhurst. “The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer”. En: *Sports Biomechanics* 6.1 (2007), págs. 81-98.
- [7] A Lyttle y M Keys. “The application of computational fluid dynamics for technique prescription in underwater kicking”. En: *Portuguese Journal of Sport Sciences* 6.2 (2006), págs. 233-235.
- [8] Alfred Von Loebbecke, Rajat Mittal, Russell Mark y James Hahn. “A computational method for analysis of underwater dolphin kick hydrodynamics in human swimming”. En: *Sports Biomechanics* 8.1 (2009), págs. 60-77.
- [9] Javier Hernández Espana. “Estudio hidrodinámico y optimización del consumo energético en el nado de crol”. Tesis doct. 2017.
- [10] J. W. McVicar. “A Brief History of the Development of Swimming”. En: *Research Quarterly. American Physical Education Association* 7.1 (1936), págs. 56-67.
- [11] John Lohn. *Historical dictionary of competitive swimming*. 1. Scarecrow Press, 2010.
- [12] Cecil Colwin. *Breakthrough swimming*. Human kinetics, 2002.
- [13] Hazim Moria, Harun Chowdhury, Firoz Alam, Aleksandar Subic, Alexander John Smits, Rahim Jassim y Nasser Suliman Bajaba. “Contribution of swimsuits to swimmer’s performance”. En: *Procedia Engineering* 2.2 (2010), págs. 2505-2510.
- [14] Eisuke Kainuma, Mayumi Watanabe, Chikako Tomiyama-Miyaji, Masashi Inoue, Yuh Kuwano, HongWei Ren y Toru Abo. “Proposal of alternative mechanism responsible for the function of high-speed swimsuits”. En: *Biomedical research* 30.1 (2009), págs. 69-70.
- [15] JP Clarys. “Human morphology and hydrodynamics”. En: *Swimming III* 8 (1979), págs. 3-41.

-
- [16] Georgios Machtsiras. “Utilizing flow characteristics to increase performance in swimming”. En: (2013).
- [17] RH Kirchhoff. “Inviscid incompressible flow-potential flow”. En: *Handbook of Fluid Dynamics* (1998).
- [18] PE Di Prampero, DR Pendergast, DW Wilson y DW Rennie. “Energetics of swimming in man.” En: *Journal of applied Physiology* 37.1 (1974), págs. 1-5.
- [19] STAR-CCM+. *Tutorial guide STAR-CCM+*.