

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN EL NADO DE CROL

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Autor:

Javier Hernández España

Tutor:

Benjamín Pla Moreno
Antonio Gil Megías
Pau Raga Nieto

Valencia, septiembre de 2017

Resumen

Tras los últimos avances científicos y tecnológicos en la natación de competición, se pone de manifiesto el gran reto que se plantean cada vez más los nadadores internacionales para lograr batir un récord del mundo, especialmente después de las Olimpiadas de Pekín 2008, donde la era de los famosos bañadores de poliuretano llegó a su fin. A partir de entonces, las líneas de investigación comenzaron a centrarse en el análisis de las técnicas de nado, y el uso de programas de dinámica de fluidos computacional empezó a aplicarse a esta disciplina deportiva, a pesar de que algunos investigadores ya realizaron sus primeros estudios aproximativos con ellos.

Es por ello que el presente proyecto pretende ser una vía más de investigación con el objetivo de analizar qué factores intervienen durante el nado, para poder estudiar sus resultados y posibles formas de aplicación. El estudio será realizado con programas de dinámica de fluidos computacional, donde se simularán las condiciones a las que se encuentra un nadador, tanto en piscina como en el mar, con el fin de poder contrastar las diferencias. Además, también se estudiará el posible efecto que tiene el cansancio en la técnica del nado, cuya consecuencia vendrá simulada con el correspondiente hundimiento del tren inferior del cuerpo. Los resultados que se obtuvieron eran similares a los de estudios previos de otros investigadores, mostrando que la presencia del oleaje marino produce un ligero aumento en las fuerzas de resistencia en comparación al caso en piscina. Además, se comprobó cómo el hundimiento de las piernas debido al cansancio también repercutía negativamente en las fuerzas de resistencia, debido al aumento de la superficie frontal del nadador.

Sumado a lo anterior, y tras comprobar que no existen estudios previos donde se busque optimizar el consumo energético de un nadador para recorrer una distancia determinada en el menor tiempo posible, se diseñará un modelo de un nadador que se nutrirá de los resultados de los estudios hidrodinámicos realizados previamente, y donde se incluirá el efecto de las corrientes marinas de Valencia. Los resultados demostraron ciertas limitaciones del modelo en lo referente a las corrientes, pero se pudo comprobar cómo varía el tiempo del recorrido en función de las capacidades energéticas del nadador.

*La ilusión es mi camino,
la victoria mi destino.*

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis tutores de este proyecto, Benjamin Pla, Antonio Gil y Pau Raga por la enorme dedicación y especial interés que pusieron desde el primer momento en este proyecto y sin los cuales no hubiera sido posible llevarlo a cabo.

También agradecer a Pedro Quintero sus trucos, ideas y apoyos que ha ido aportando cuando hacían falta.

A mis compañeros de despacho, Andrés, Borja, Sinfo y en especial a Virtu, con la que el tiempo allí se hacía más ameno y su motivación ayudaba a seguir adelante.

Mención especial merecen mis compañeros de piso, Luis, Iván y Rodri, sobretodo por aguantarme en este último año que ha sido bastante difícil y cuyo apoyo era fundamental.

Y por último, a mi familia, especialmente a mis padres por preocuparse por mi e intentar ayudarme todo lo posible en lo que pudieran día a día, mostrando su ayuda desinteresada para que fuera capaz de alcanzar este objetivo en mi vida.

Índice general

	Página
Resumen	I
Agradecimientos	V
I Memoria	1
1. Introducción	3
1.1. Motivación	3
1.2. Objetivos	5
1.3. Antecedentes	5
1.3.1. Eficiencia en el deslizamiento	5
1.3.2. Factores controlables que afectan al deslizamiento	6
1.3.3. Estudios fluidodinámicos en el deporte	7
2. Fundamentos teóricos	11
2.1. Introducción	11
2.2. Fuerza de sustentación hidrodinámica	11
2.3. Fuerzas de arrastre que actúan en el nado	13
2.3.1. Resistencia debida a la presión	14
2.3.2. Resistencia debida a la fricción	16
2.3.3. Resistencia debida a las olas	18
3. Metodología	23
3.1. Introducción	23
3.2. Modelado CFD	24
3.2.1. Casos de estudio	24
3.2.2. Definición del nadador	25
3.2.3. Descripción de la geometría	25
3.2.4. Descripción del dominio	27
3.2.5. Descripción del proceso de mallado	28
3.2.6. Configuración de los casos	34
3.2.7. Validación	44

3.3.	Diseño del modelo del optimizador energético	45
3.3.1.	Descripción del problema	45
3.3.2.	Corrientes	46
3.3.3.	Modelado del nadador	48
3.3.4.	Parámetros del modelo	50
4.	Resultados	53
4.1.	Introducción	53
4.2.	Estudio hidrodinámico CFD	54
4.2.1.	Resultados del estudio en piscina sin oleaje	54
4.2.2.	Resultados del estudio en mar con oleaje	57
4.2.3.	Resultados del estudio del efecto del cansancio	59
4.3.	Optimización del consumo energético	62
4.3.1.	Resultados conjuntos	62
4.3.2.	Análisis de casos	63
4.3.3.	Comparación con otros nadadores	66
5.	Conclusiones y Trabajos Futuros	69
5.1.	Introducción	70
5.2.	Resumen del trabajo realizado	70
5.2.1.	Estudio hidrodinámico con CFD	70
5.2.2.	Optimizador energético	72
5.2.3.	Conclusiones	72
5.3.	Trabajos futuros	73
II	Pliego de condiciones	75
III	Presupuesto	85
	Bibliografía	97

Índice de figuras

1.1. Michael Phelps con el bañador de poliuretano LZR Racer de Speedo.	4
2.1. Fuerzas que aparecen en el nado.	12
2.2. Tracción subacuática en forma de S.	12
2.3. Resistencia debida a la presión.	15
2.4. Perfil de velocidades del fluido en la capa límite.	16
2.5. Nadador produciendo un gran oleaje.	19
2.6. Ejemplo de rolido.	21
3.1. Representación de las diferentes posiciones seleccionadas. . .	26
3.2. Representación del dominio del modelo 3D con sus dimensiones.	28
3.3. Representación de los volúmenes de control.	30
3.4. Mallado de los volúmenes de control.	31
3.5. Representación de los resultados obtenidos en el estudio de independencia de malla.	33
3.6. Malla de la superficie del nadador.	34
3.7. Condiciones de Contorno.	38
3.8. Gráficos donde se recogen los datos del oleaje de Valencia del verano de 2016.	40
3.9. Posición del centro de gravedad y de la fuerza Y aplicada. . .	43
3.10. Representación de las diferentes posiciones empleadas en el análisis sobre el cansancio.	43
3.11. Posición elegida para el estudio de validación.	45
3.12. Recorrido de la travesía.	47
3.13. Representación de la brazada modelada con la analogía de una pala de remo (Zamparo et al., 2005).	48
4.1. Representación de los resultados de la fuerza de resistencia del estudio en piscina sin oleaje para las diferentes posiciones.	55
4.2. Representación de los resultados de la fuerza de sustentación del estudio en piscina sin oleaje para las diferentes posiciones.	56
4.3. Representación de los resultados de la fuerza de resistencia del estudio en mar con oleaje para las diferentes posiciones. .	57

4.4.	Representación de los resultados de la fuerza de sustentación del estudio en mar con oleaje para las diferentes posiciones. .	59
4.5.	Representación de los resultados de la fuerza de resistencia del estudio en mar con oleaje para las diferentes posiciones de las piernas.	60
4.6.	Representación de los resultados de la fuerza de sustentación del estudio en mar con oleaje para las diferentes posiciones de las piernas.	61
4.7.	Gráfico donde se representa el tiempo en función del tipo de corriente.	62
4.8.	Representación de la velocidad que llevaría el nadador en función de la distancia recorrida sin corriente y para $A = 0.2m/s$ y $\theta = 60^\circ$	64
4.9.	Representación de la potencia desarrollada en función de la distancia recorrida sin corriente y para $A = 0.2m/s$ y $\theta = 60^\circ$. .	64
4.10.	Representación de la energía disponible en función de la distancia recorrida sin corriente y para $A = 0.2m/s$ y $\theta = 60^\circ$. .	65
4.11.	Resultados en la prueba de natación del triatlón sprint de Valencia de mayo de 2017.	68

Índice de cuadros

3.1. Dimensiones del nadador.	25
3.2. Tamaños de base seleccionados para el estudio de independencia de malla.	32
3.3. Resultados del estudio de independencia de malla.	33
3.4. Modelos seleccionados para la configuración CFD del problema.	35
3.5. Tabla de Condiciones iniciales.	37
3.6. Configuración del modelo de ola para el estudio sin oleaje.	39
3.7. Configuración del modelo de ola para el estudio con oleaje.	41
3.8. Pesos de cada parte del cuerpo.	41
3.9. Distancias entre CDG de cada parte del cuerpo al CDG global.	42
3.10. Valores de los momentos de inercia del nadador.	42
3.11. Parámetros del modelo del nadador.	50
4.1. Valores empleados para el cálculo de los coeficientes aerodinámicos.	54
4.2. Resultados de la fuerza de resistencia del estudio hidrodinámico con CFD en piscina sin oleaje.	54
4.3. Resultados de la fuerza de sustentación del estudio hidrodinámico con CFD en piscina sin oleaje.	56
4.4. Resultados de la fuerza de resistencia del estudio hidrodinámico con CFD en mar con oleaje.	57
4.5. Resultados de la fuerza de sustentación del estudio hidrodinámico con CFD en mar con oleaje.	58
4.6. Resultados de la fuerza de resistencia del estudio hidrodinámico con CFD en mar con oleaje y diferentes posiciones para las piernas.	59
4.7. Resultados de la fuerza de sustentación del estudio hidrodinámico con CFD en mar con oleaje y diferentes posiciones para las piernas.	61
4.8. Valor de los parámetros en cada tramo del recorrido para una situación sin corriente.	65
4.9. Valor de los parámetros en cada tramo del recorrido para una corriente de $A = 0.2m/s$ y $\theta = 60^\circ$	65
4.10. Capacidades energéticas extraídas de otros estudios.	67

Documento I

Memoria

Capítulo 1

Introducción

Contenidos:

1.1. Motivación	3
1.2. Objetivos	5
1.3. Antecedentes	5
1.3.1. Eficiencia en el deslizamiento	5
1.3.2. Factores controlables que afectan al deslizamiento	6
1.3.3. Estudios fluidodinámicos en el deporte	7

1.1. Motivación

La continua evolución en las técnicas empleadas en el nado han llevado a una gran reducción de los récords mundiales en los últimos años que hacen que sean prácticamente imbatibles, quedando al alcance de muy pocos nadadores. Gran parte de culpa en esta mejora de tiempos la tiene el avance en el desarrollo de nuevos bañadores de competición, pues han ido cambiando con el paso de los años. En los orígenes empleaban unos bañadores de algodón que cubrían desde la entrepierna al pecho, que luego dejaron paso al conocido “slip”. Pero la revolución llegó con los famosos bañadores de poliuretano, para los cuales la NASA colaboró en su desarrollo prestando los túneles de viento y su software de análisis de fluidos. Dichos bañadores eran capaces de comprimir el cuerpo haciéndolo más hidrodinámico. Al apretar más el torso, se conseguía una reducción de la masa muscular y de las vibraciones del cuerpo. Por otro lado, ayudaba a la oxigenación de los músculos.

“Cuando nado con él, me siento como un cohete”, decía Michael Phelps¹.

¹Michael Fred Phelps (Baltimore, 30 de junio de 1985) es un nadador estadounidense y el deportista olímpico más condecorado de todos los tiempos, con un total de 28, medallas.

El traje conseguía reducir los tiempos de los nadadores entre un 1.9 y un 2.2%². Tal fue la mejora que en los Juegos Olímpicos de Pekín 2008 (tan sólo unos meses después del lanzamiento de este bañador) se pulverizaron 23 de los 25 récords mundiales.



Figura 1.1: Michael Phelps con el bañador de poliuretano LZR Racer de Speedo.

Tras varias competiciones posteriores, donde se siguieron batiendo récords, comenzaron a llegarle quejas a la FINA (Federación Internacional de Natación), pues consideraban que aquello era “dóping tecnológico”. Finalmente, los famosos bañadores fueron prohibidos, estableciendo que los trajes de baño tenían que estar hechos obligatoriamente de material textil, alegando que “la natación es un deporte basado esencialmente en la actuación deportiva del atleta”.

Tras entrar en vigor esta normativa, las grandes marcas comerciales de fábrica de bañadores de competición tuvieron que adaptarse a los nuevos requisitos de la FINA, pero los resultados y mejoras en los tiempos con el uso de los trajes no era tan palpable como antes. Desde entonces, se ha estado indagando en nuevas técnicas que permitan a los nadadores alcanzar las marcas tan complejas que han ido fijando. Estas nuevas técnicas se centran, sobretodo, en la mejora de la técnica en el nado, donde entrenadores, con la ayuda de biomecánicos especializados, intentan apurar al máximo cualquier mínimo detalle para minimizar la resistencia en el agua y maximizar la propulsión.

Por tanto, se presentan entonces varias líneas de trabajo con un mismo objetivo: reducir los tiempos de carrera. Dichos métodos abarcan áreas que van desde el diseño de nuevos bañadores (dentro de las normas impuestas por la FINA) que permitan reducir las vibraciones del cuerpo para ayudar al nadador a mantener posiciones más hidrodinámicas que faciliten su avance por el agua, hasta diferentes estudios que se centran en analizar cómo actúan las fuerzas de arrastre en el nado, para corregir y adoptar nuevas técnicas. El presente proyecto seguirá esta última línea de trabajo mencionada, pues

²Casado, Edu (28 de noviembre de 2013). 20 minutos. *Camisetas para la historia: LZR Racer, el bañador de los récords y el dóping tecnológico*. Extraído de <http://www.blogs.20minutos.es>

se realizarán varios estudios, que consistirán en la observación, mediante un software de análisis del comportamiento de fluidos, de las fuerzas que aparecen cuando el nadador se desplaza en el agua para concluir cual es la posición que genere menor resistencia en el avance. Además, se buscará analizar nuevos métodos de entrenamiento y competición que estudiarán la forma más eficiente de realizar un recorrido para unas determinadas condiciones.

1.2. Objetivos

A continuación se presentan los principales objetivos que se pretenden alcanzar con la realización del presente proyecto, así como los objetivos parciales necesarios para la correcta consecución de los mismos.

- Estudio y análisis hidrodinámico de las diferentes fuerzas que actúan en el nado para su posterior implementación en la mejora de la técnica, con el fin de reducir el tiempo de carrera.

Para la consecución del mismo se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- Diseño de un nadador con el programa SOLIDWORK en 3D y colocación del mismo en diferentes posiciones adoptadas durante el nado.
 - Creación de una geometría en CFD de la piscina y el nadador con STAR-CCM+ que simule los casos a estudiar.
 - Diseño y optimización de la malla del modelo de estudio.
 - Realización de cálculos con el nadador en diferentes posiciones, de donde se obtendrán los valores de las fuerzas que aparezcan para su posterior estudio.
 - Análisis del oleaje y corrientes marinas de la costa de Valencia para su posterior implementación en el modelo CFD, con el fin de obtener más casos de estudio.
- Realización de un optimizador energético que sea capaz de obtener la forma más eficiente energéticamente para recorrer una distancia determinada en el menor tiempo posible, en función de las condiciones del nadador y del medio por el que se desplace.

1.3. Antecedentes

1.3.1. Eficiencia en el deslizamiento

A diferencia de los mamíferos marinos, los seres humanos no han ido evolucionando su aparato locomotor para la optimización en el avance subacuático.

Se han realizado varios estudios (von Loebbecke et al., 2009) que demuestran que la capacidad que tienen los seres humanos para minimizar la resistencia en el nado es bastante inferior a la de las especies acuáticas.

Otros investigadores realizaron estudios acerca del efecto de las características morfológicas en el nado (Cureton, 1975; Huijing et al., 1988; Tous-saint et al., 1990) y llegaron a la conclusión de que la forma del cuerpo es un factor bastante significativo en el deslizamiento subacuático. Pero, a pesar de ello, también intervienen otros factores que el propio nadador puede controlar, como son la postura y la orientación del cuerpo.

En un deslizamiento, por ejemplo, tras impulsarse de la pared, la resistencia hidrodinámica se compone por la suma de la contribución de la presión (94.9%), la fricción (0.05%) y las olas (5%) (Vorontsov and Rumyantsev, 2000). También se comprobó que para una profundidad de 0.6 m, la resistencia debida a las diferencias de presión entre la parte delantera y trasera del nadador, era la más predominante (Lyttle, 2000). Por el contrario, para profundidades menores de 0.6 m era necesario considerar también la resistencia que ofrecen las olas. Esta resistencia que causa la diferencia de presiones viene determinada por la postura y características del cuerpo, por tanto, está fuertemente ligada a la postura que adapte el nadador. La resistencia que provocan las olas se debe al desplazamiento del nadador por la superficie, cuyo movimiento va originando olas con las que se irá chocando en su avance por el agua. Es por ello que para profundidades alejadas de la superficie es prácticamente despreciable. Y por último, la resistencia de fricción es la causada por el choque de las partículas del agua con la piel del nadador, y es bastante más pequeña en comparación con las anteriores.

Como ya se comentó anteriormente, a lo largo de este trabajo se buscará realizar un análisis que determine cómo varía la resistencia al avance en función de la posición del nadador, para lo que se elegirán varias posiciones que adopta un nadador durante el ciclo de brazada que realiza y se someterán a un análisis mediante programas de dinámica de fluidos computacional, con el que se pretende alcanzar conclusiones acerca de la técnica en el nado. Además, también se indagará en estudiar posibles formas de realizar una prueba, es decir, qué velocidad adoptar en cada momento en función de la situación en la que se encuentre el nadador. Dichos estudios se presentan con detalle en los capítulos siguientes.

1.3.2. Factores controlables que afectan al deslizamiento

Como se fue demostrando a lo largo de los años y gracias a los estudios anteriormente mencionados, hay varios factores que dependen de la acción

del ser humano, es decir, pueden ser controlables para reducir la resistencia. Entre ellos destacan:

- **Posición de la cabeza**

Investigadores como Bulgakova y Makarenko (1996) descubrieron que si el nadador colocaba la cabeza entre los brazos extendidos mientras se deslizaba subacuáticamente, la resistencia que se obtenía era significativamente menor.

- **Posición de las piernas**

Mejorando la técnica y la posición horizontal del cuerpo y de las piernas se consigue reducir el área frontal y reducir la resistencia de presión. Este efecto se analizará en el presente trabajo con el fin de corroborar estas hipótesis.

- **Profundidad del deslizamiento**

Se han demostrado en estudios como el de Lyttle et. al. (1998) que si el nadador se encuentra deslizándose en zonas cercanas a la superficie la resistencia que experimentaba era mayor que para profundidades mayores debido a la resistencia de ola.

- **Bañadores de competición**

Como se ha comentado al inicio del capítulo, los trajes de baño que cubrían el cuerpo entero y fabricados de poliuretano eran bastante habituales en las competiciones nacionales e internacionales hasta la regulación por la FINA en 2010. Las importantes mejoras en los tiempos de carrera obtenidos con estos bañadores pusieron de manifiesto el efecto que tiene la tecnología en el rendimiento de la natación.

1.3.3. Estudios fluidodinámicos en el deporte

Durante años se ha intentado aplicar los conocimientos científicos al deporte con el fin de lograr mejores resultados, es decir, quedar entre las primeras posiciones. Con el avance de la tecnología, se han ido desarrollando nuevos métodos que modelan al sujeto, como en el caso de corredores y ciclistas, para los que se pueden encontrar numerosos artículos como el realizado por Keller (1973), Hendrix et al. (2009) o Morton et al. (1990) donde analizan varios modelos energéticos realizados para corredores, aunque estos modelos también han sido realizados para ciclistas, como el de de Koning et al. (1999). Últimamente están siendo más los investigadores que intentan realizar dichos modelos energéticos para nadadores, como el caso de Zamparo et al. (2005) donde realiza un modelo energético para el nado de crol, o

como el de De Groot and van Ingen Schenau (1988) y Barbosa et al. (2010), donde analizan de forma energética el nado.

También es cierto que últimamente está siendo tendencia el uso de programas de CFD para el análisis de las fuerzas y del flujo que actúan en las diferentes disciplinas. La primera industria deportiva en aplicar análisis de CFD fue la Fórmula 1 debido a la gran importancia que tiene la aerodinámica en este sector, donde unas milésimas de segundo bastan para decidir la posición en la parrilla de salida. Pero no ha sido el único deporte donde se ha usado CFD, pues también ha sido empleado en el análisis aerodinámico de las pelotas de fútbol, en cascos de ciclistas, en la optimización de los barcos de vela, en diseños de las palas de remo, así como para el análisis del comportamiento aerodinámico de los saltadores de esquí o también en estudios sobre la resistencia de las pelotas de golf.

Defraeye et al. (2010) hizo uso del CFD para evaluar tres posiciones diferentes de un ciclista (la subida, la caída y la de carrera). Se posicionó al ciclista con su bicicleta en un túnel de viento y se midieron las fuerzas de resistencia. Los resultados que se obtuvieron sólo se desviaron un 7% de los experimentales, mostrando el alto nivel de precisión que se puede lograr haciendo uso de esta nueva disciplina.

A día de hoy y con el gran avance de la tecnología ya es un hecho que el deporte esté ligado cada vez más a la tecnología para conseguir un mayor rendimiento.

CFD en la natación

Fue en el año 1996 cuando Bixler reconoció por primera vez la posibilidad de emplear el análisis CFD en la natación y junto con Schloder estudiaron los efectos de acelerar una placa circular plana a través del agua. Los resultados que obtuvieron sugerían que se podría obtener información útil con el análisis de objetos en 3D. Pero, si bien es cierto, desde entonces hasta la actualidad han sido pocos los estudios realizados sobre la biomecánica de un nadador con CFD debido a la gran dificultad que se plantea en la generación de geometrías y mallas 3D precisas, sumado a la alta potencia de cálculo y de procesamiento de datos que se necesita para resolver este tipo de problema.

En el año 2002 Bixler y Riewald decidieron analizar la mano de un nadador en 3D en unas condiciones de flujo constante y años más tarde Rouboa et al. (2006) estudiaron el efecto que tenía acelerar la mano en las fuerzas propulsoras. Pero no fue hasta 2007 cuando Bixler probó a estudiar

un cuerpo entero de un nadador en 3D, a quien siguieron otros investigadores (Marinho et al., 2009; Popa et al., 2011; Zaidi et al., 2010) en el análisis de la resistencia hidrodinámica en el deslizamiento de un nadador. Es por ello que el CFD se considera una metodología bastante complicada pero con un alto potencial.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Contenidos:

2.1. Introducción	11
2.2. Fuerza de sustentación hidrodinámica	11
2.3. Fuerzas de arrastre que actúan en el nado	13
2.3.1. Resistencia debida a la presión	14
2.3.2. Resistencia debida a la fricción	16
2.3.3. Resistencia debida a las olas	18

2.1. Introducción

Cuando un nadador se desplaza en el medio acuoso, siente una fuerza de resistencia que propicia grandes limitaciones, pues el objetivo de cualquier atleta es recorrer la distancia de su prueba en el menor tiempo posible. A diferencia de los corredores, para los cuales el aire no supone prácticamente un inconveniente, los nadadores tienen que lidiar en un medio con una densidad 700 veces mayor y 55 veces más viscosa que el aire.

Es por ello que a lo largo de este capítulo se describirán con detalle las diferentes fuerzas presentes en el nado, así como los factores que contribuyen a su aparición. Además, se mostrarán técnicas que permiten reducirlas y que son de gran necesidad que cualquier nadador conozca.

2.2. Fuerza de sustentación hidrodinámica

Cuando la mano del nadador entra en el agua y se enfrenta a la corriente, esta se desplaza tanto por la parte superior como por la parte inferior de



Figura 2.1: Fuerzas que aparecen en el nado.

la mano. Si la técnica del nadador es la adecuada, la curvatura de la mano hace que la corriente de agua que pase por la parte superior adquiera una velocidad mayor que la que pasa por debajo. Esta diferencia de velocidades generará un gradiente de presiones, originando una fuerza. Esta fuerza se descompone en sus componentes vertical y horizontal, y se les denomina fuerza de sustentación y de resistencia, respectivamente (Figura 2.1¹). Esta componente vertical de la fuerza que sienten los nadadores se puede comparar con la sustentación que experimentan las alas de los aviones, pero, en el caso del nadador, son la mano y el antebrazo los que generan una sustentación hacia delante que usan para propulsarse. Además, la tracción se realiza en forma de “S” (Figura 2.2²), permitiendo un recorrido más largo, y por ende, un mayor tiempo de aplicación de la fuerza que ayuda al nadador.

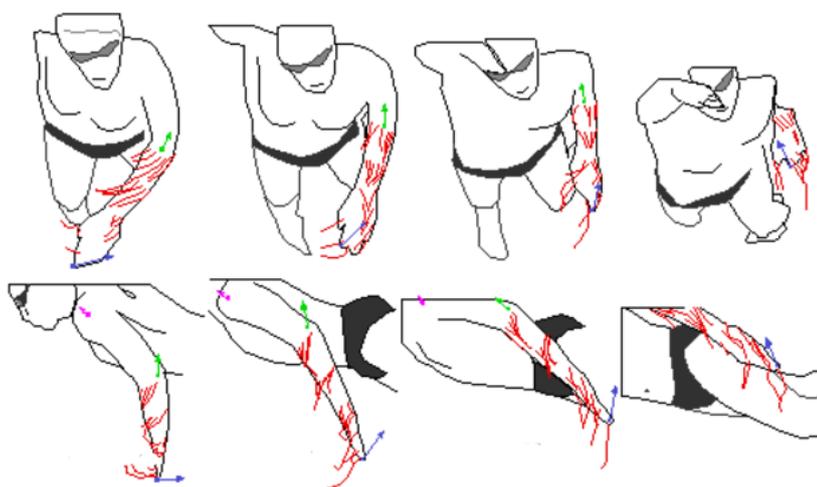


Figura 2.2: Tracción subacuática en forma de S.

Los factores que afectan a dicha fuerza son el ángulo de ataque de la

¹Imagen extraída de Gibo (2005)

²Imagen extraída de Toussaint (2000)

mano, la velocidad de la corriente y la velocidad relativa de la corriente.

Otro factor a destacar contribuyente en la sustentación es la que produce el movimiento de la patada, aunque el efecto no es tan grande como el de la brazada. Además, los tendones y cuádriceps ayudan a mantener el equilibrio y la posición horizontal necesaria en el agua para reducir su área frontal y la resistencia resultante, como se verá en la siguiente sección.

2.3. Fuerzas de arrastre que actúan en el nado

Como se ha comentado anteriormente, cuando el nadador se desliza en el agua, aparecen unas fuerzas que retardan este movimiento. Dichas fuerzas tienen una dirección opuesta a la del movimiento, y se conocen como fuerzas de arrastre. Al tratarse de un fluido con una alta densidad y viscosidad (1000 kg/m^3 y $0.89 \cdot 10^3 \text{ kg/ms}$ respectivamente), tienen una alta importancia en la optimización del deslizamiento para reducir los tiempos de carrera, que se conseguirá minimizando la resistencia para así maximizar la velocidad de avance dentro de las capacidades físicas y morfológicas de cada individuo.

En los años cincuenta William Froude estableció las primeras nociones acerca de los diferentes factores que contribuyen a la resistencia, afirmando que se podían separar y estudiar independientemente. Dichas nociones sirvieron para fundar las bases de un modelo con el que se pretende representar las fuerzas de arrastre presentes en el nado, considerando que dicha resistencia resulta de la suma de las contribuciones que realizan la presión (F_p), la fricción (F_f) y el oleaje (F_w), cuya contribución son del orden del 94.9 %, 0.05 % y 5 % respectivamente.

$$F_{total} = F_{pressure} + F_{frictional} + F_{wave} \quad (2.1)$$

Dentro de la definición de resistencia, cabe diferenciar entre dos tipos que tienen lugar en el nado. Cuando el nadador no está realizando movimientos que contribuyen a la propulsión, la fuerza que experimenta se conoce como resistencia “pasiva”. Por el contrario, el término resistencia “activa” se emplea si cuando con sus movimientos se está propulsando en el agua (Wilson and Thorp, 2003). Kolmogorov and Duplishcheva (1992) descubrieron, analizando el nado de crol de nadadores masculinos, que la resistencia activa podía llegar a ser de valores que van desde un 62 % a un 162 % mayores que la pasiva.

2.3.1. Resistencia debida a la presión

La resistencia debida a la presión, o también conocida como resistencia de forma, se origina por la separación de la capa límite, que provoca una diferencia de presiones entre la parte delantera y la trasera del nadador o de sus extremidades. Cuando el nadador se mueve a través de agua, esta es empujada hacia los lados del cuerpo y va siguiendo su curvatura. Sin embargo, el flujo no permanece adherido a la superficie del cuerpo en toda su longitud, ya que acaba separándose. La distancia entre la parte delantera del nadador y el punto donde el flujo se separa viene determinada por la morfología del nadador, la velocidad a la que se mueve, la superficie frontal y la densidad del agua. Una vez que la capa límite se ha separado de la piel, interactúa con el flujo exterior y, como resultado, el flujo se ve obligado a seguir un movimiento circular a lo largo del cuerpo. El flujo circular origina un área de baja presión en la parte trasera del nadador denominada estela, la cual causa una diferencia de presión entre la parte delantera y trasera del nadador. Cabe destacar que cuando la separación de la capa límite se produce en zonas cercanas a la parte delantera del cuerpo, la estela se hace más ancha y presenta un volumen mayor.

La resistencia de presión se puede calcular según la ecuación 2.2.

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (2.2)$$

donde C_p es el coeficiente de presión, ρ la densidad del fluido, A el área proyectada en el flujo y v la velocidad del cuerpo en movimiento.

Como se puede observar a partir de la ecuación 2.2, la resistencia por presión está altamente ligada a la velocidad. Cuando la velocidad de nado aumenta (v), se reduce el espesor de la capa límite y se desprende en una zona más próxima a la parte delantera del cuerpo. Además, la resistencia también aumenta si la superficie frontal se incrementa. Esto ocurre, por ejemplo, cuando el nadador está cansado y las piernas se le van hundiendo (Figura 2.3).

Uno de los estudios que se realizarán en este trabajo consistirá en analizar cómo varía la fuerza de resistencia en función de cómo de hundidas lleva las piernas el nadador, para verificar si la resistencia total aumenta al incrementar la superficie frontal.

Disminuyendo la resistencia por presión

Se ha demostrado experimentalmente que una capa límite turbulenta consigue retrasar el desprendimiento del flujo. El tamaño de la estela que se

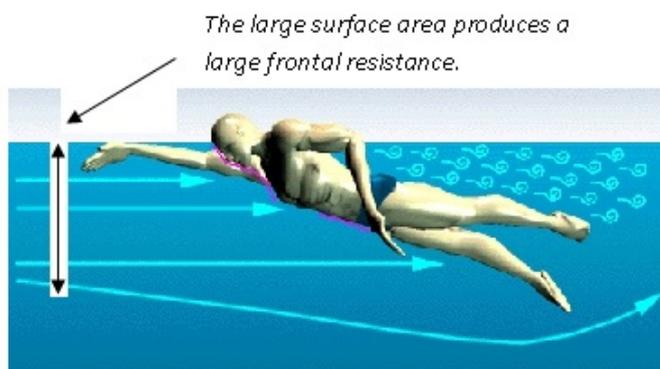


Figura 2.3: Resistencia debida a la presión.

origina está fuertemente relacionado con la optimización de la resistencia y del nado. Por tanto, es notablemente beneficioso para un nadador mantener una capa límite turbulenta y sin desprenderse a lo largo de su cuerpo.

Para intentar reducir la resistencia y mejorar el rendimiento deportivo, los científicos han realizado estudios donde inducían turbulencia en la capa límite para reducir el tamaño de la estela (Pendergast et al., 2006). Los descubrimientos hallados con los estudios que realizaron, en los cuales la resistencia disminuyó entre un 13 y 16%, sirvieron a TYR para crear un revolucionario bañador de competición (2004) que ayudaba a los nadadores a mejorar su rendimiento.

Además de este estudio, otros científicos se centraron en el efecto que producía la superficie frontal y los parámetros antropométricos del cuerpo para reducir la resistencia por presión, como Vilas-Boas et al. (2010), que analizaron el cambio en el área frontal entre la primera y la segunda posición de la brazada en el deslizamiento subacuático y descubrieron que el área proyectada sobre el flujo y la resistencia pasiva eran más bajas para la primera posición de deslizamiento, es decir, aquella en la que los brazos están extendidos hacia delante y la cabeza situada entre ellos. Con estos hallazgos se confirmó que la resistencia pasiva está ligada a la superficie frontal, y fue Lyttle et al. (2000) quien investigó el efecto de los parámetros antropométricos en la resistencia pasiva, y halló que la altura del nadador está asociada negativamente a ella. Por otro lado, no se encontraron dife-

rencias significativas en la resistencia pasiva entre las niñas y los niños de la misma edad y altura similar sobre los que se hizo el estudio. A pesar de ello, a edades tempranas no se aprecian grandes diferencias en las características morfológicas de género, y posiblemente los resultados hubieran sido distintos si los sujetos hubiesen sido adultos.

2.3.2. Resistencia debida a la fricción

La resistencia que origina la fricción, también conocida como “*skin drag*”, se produce debido al continuo roce que experimentan las partículas del fluido con la piel del nadador. La velocidad que presentan estas partículas en la interfase es la misma que la del nadador, pero a medida que aumenta la distancia desde la superficie del cuerpo, la velocidad del fluido va aumentando hasta alcanzar la velocidad de flujo libre (Figura 2.4³). El área que se encuentra comprendida entre estas zonas se le denomina capa límite (Schlichting and Gersten, 2000).

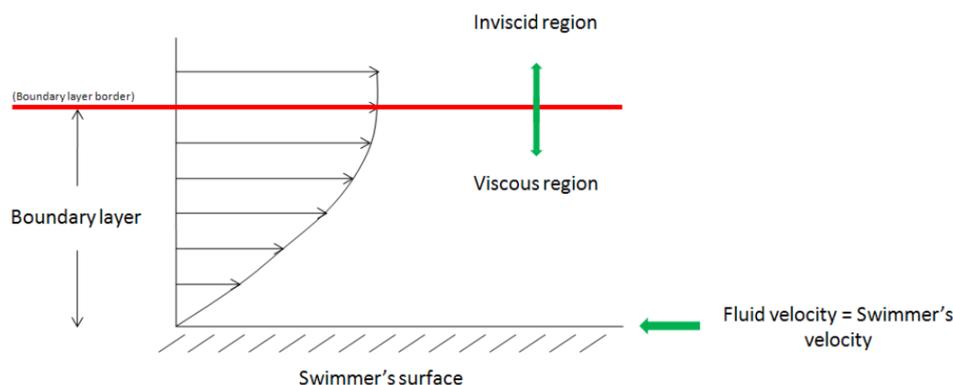


Figura 2.4: Perfil de velocidades del fluido en la capa límite.

La fuerza por fricción se puede calcular según la ecuación 2.3.

$$F_{fr} = \frac{1}{2} \cdot C_{fr} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (2.3)$$

donde C_{fr} es el coeficiente de fricción, ρ la densidad del fluido, S la superficie mojada y v la velocidad del cuerpo en movimiento.

Observando la ecuación (2.3), se deduce que la magnitud de la resistencia debida a la fricción depende principalmente de la superficie del nadador sumergida en el agua y de las condiciones del fluido inmerso en la capa

³Imagen extraída de Machtsiras (2013)

límite. Dicho flujo puede ser laminar, turbulento o transitorio, hecho que dependerá de las características morfológicas del nadador, como pueden ser el tamaño, forma y velocidad a la que vaya, así como de la densidad y viscosidad del agua. Para caracterizar el flujo, se recurre al cálculo del número de Reynolds (Re), que relaciona las fuerzas inerciales y viscosas presentes en un fluido (Ecuación 2.4).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (2.4)$$

donde ρ es la densidad del agua, v la velocidad del fluido, L la longitud del cuerpo y μ el coeficiente de viscosidad dinámica.

En flujos laminares, el fluido fluye en capas paralelas sin ninguna perturbación entre ellas. Esto se consigue adaptando una posición altamente hidrodinámica y a una velocidad baja. Pero en una competición donde los nadadores alcanzan sus velocidades máximas, esta situación no se da, y el flujo se desprende volviéndose turbulento. Al desprenderse, se originan torbellinos que varían la presión y la velocidad.

Según Clarys (1979), el Reynolds alcanzado en nadadores de competición es del orden de entre $2 \cdot 10^5$ y $2.5 \cdot 10^6$. El tamaño y la forma de los nadadores es tal que, a estos números de Reynold, el flujo es predominantemente turbulento.

Disminuyendo la resistencia a fricción

Para reducir la resistencia debida a la fricción, los nadadores intentan disminuir la cantidad de agua arrastrada con el cuerpo al deslizarse por el agua. Esto se puede conseguir mejorando la suavidad de la superficie corporal, para lo que recurren a la eliminación del vello corporal o también haciendo uso trajes de baño más ajustados.

A principios del siglo XXI, los científicos estaban convencidos de que bañadores totalmente lisos y que cubrieran la mayor parte de la superficie del cuerpo serían capaces de reducir la resistencia a la fricción. Oeffner and Lauder (2012) fueron los primeros en realizar un estudio para comprobar la eficacia de estos trajes pero, según estos estudios, no mejoraban la velocidad. Esto también sugería que debían de haber otros factores que ayudaran a los nadadores a mejorar el rendimiento que no fuera la reducción de la resistencia a fricción.

Antes incluso de que se comenzaran a introducir estos trajes que cubrían el cuerpo entero, los nadadores solían depilarse el cuerpo para intentar re-

ducir la fricción. En estudios anteriores, Sharp and Costill (1989) y Sharp et al. (1988) descubrieron que los nadadores depilados realizaban un gasto energético menor, conseguían alcanzar velocidades mayores y recorrían una mayor distancia por brazada. Además, observaron que tras impulsarse de la pared la deceleración que alcanzaban era menor que aquellos que no iban depilados. A pesar de los resultados, el método que utilizaron no les permitía evaluar si la depilación conseguía reducir la turbulencia en la capa límite y, por consiguiente, no estaba claro si lo que se había reducido era la resistencia por fricción o había sido otro factor también determinante.

Otros investigadores quisieron hacer sus propios estudios también, como es el caso de Moria et al. (2010), que hizo uso de un túnel de viento para evaluar experimentalmente la aerodinámica y la fricción superficial de dos trajes de baño disponibles en ese momento (Speedo LZR Racer y Speedo Fast Skin-II), y los resultados mostraron que no había variación aparente en el coeficiente de resistencia. Esto indicaba que los trajes de poliuretano (Speedo LZR Racer) no hacían disminuir aún más la resistencia por fricción (en comparación con los trajes que no eran de poliuretano). Y, por otro lado, el beneficio experimentado al usar estos trajes de baño no estaba potencialmente vinculado con la resistencia de fricción. Aún así, para llegar a conclusiones más seguras y fiables, hubiera sido conveniente evaluar la efectividad de dichos trajes en el medio en el que se utilizan, y no en un túnel de viento.

2.3.3. Resistencia debida a las olas

La resistencia debida al oleaje está causada, como el nombre indica, por la aparición de olas en la superficie del agua. Al ser el agua un fluido incompresible, cuando el nadador se encuentra cerca de la superficie del fluido provoca que aumente su nivel y que se empiecen a formar olas. Consecuentemente, el nivel del agua tenderá a bajar para volver al equilibrio como resultado de las fuerzas gravitacionales, que actúan como fuerzas restauradoras en este caso. De esta forma, se originan una serie de olas y a través de este mecanismo el nadador transfiere energía al agua y, consecuentemente, se disminuye la velocidad de desplazamiento ya que parte de la energía cinética del mismo se pierde al desplazar el agua formando olas.

Estas olas que produce el nadador se originan de dos formas distintas:

- En primer lugar, aparece la ola que el nadador crea con la cabeza al desplazarse por la superficie del agua hacia delante. El agua es empujada con la cabeza en la dirección del nado, que choca a su vez con el agua que se encuentra en reposo por delante de dicha masa de agua empujada, originando una ondulación de la superficie laminar.



Figura 2.5: Nadador produciendo un gran oleaje.

Asimismo, la velocidad que lleva el nadador es mayor que la de la ola generada con su desplazamiento, por lo que chocará nuevamente con la ola.

- Otro oleaje que aparece en el nado es el causado cuando algún elemento del cuerpo rompe la superficie del agua, liberando la tensión laminar y produciendo olas en todas las direcciones y que acabarán chocándose con el resto del cuerpo.

En la Figura 2.5 se puede ver una gran ola creada en la parte delantera del nadador con la que luego chocará, aumentando la resistencia.

Según Rumyantsev (1982), la resistencia de ola puede calcularse atendiendo a la ecuación 2.5.

$$F_w = \rho \cdot \left(\frac{A^2}{\lambda^2} \right) \cdot (V \cdot \sin a)^2 \cdot \cos a \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

donde ρ es la densidad del agua, A la amplitud de la ola, λ la longitud de ola, V es la velocidad de la ola y a es el ángulo entre la dirección del momento de inercia y el frente de la ola principal.

Cabe destacar que esta fórmula es aproximada, pues es de gran dificultad estimar la gran cantidad de parámetros variables que hay que tener en cuenta para obtener valores con exactitud, ya que la velocidad del nadador nunca llega a ser constante, pues está en continua aceleración o desaceleración, con picos de fuerza en pocos segundos. Por otro lado, el nadador se encuentra en un movimiento constante y los movimientos de los brazos van creando numerosas olas cuyas características dependen del ángulo y la fuerza con la que se rompa el agua. Otro factor importante a tener en cuenta es que el oleaje cambia en función del tipo de piscina en la que se encuentre, donde influyen diferentes elementos como el tipo de corcheras, sumideros,

profundidad, temperatura... y además cabe destacar que el oleaje también variaría en función de la proximidad a las paredes.

Al aumentar la velocidad, la amplitud y la longitud de las olas también se ven incrementadas y, por consiguiente, la resistencia. Para nadadores de competición, la máxima velocidad tiene lugar cuando la longitud de la ola es igual a la longitud del nadador, momento en el que también se crea lo que se conoce como “*air pocket*”. Cualquier incremento de velocidad será inhibido ya que el nadador se encuentra atrapado en el espacio entre las crestas de las olas, según afirmaba Toussaint et al. (2002). La relación entre la velocidad relativa y la longitud del cuerpo, que como se ha comentado está relacionada con la resistencia de ola, queda definida por el número de Froude (ecuación 2.6).

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (2.6)$$

donde v es la velocidad de nado, L es la longitud del nadador y g es la gravedad ($9.81m/s$).

La máxima velocidad se alcanza para valores del número de Froude de 0.42. Valores más bajos de F_r se corresponden con velocidades de nado más bajas o una altura mayor del nadador para una velocidad dada.

Reduciendo la resistencia de ola

Como se ha comentado anteriormente, la resistencia de ola también está relacionada con la profundidad a la que se deslice el nadador (Vennell et al., 2006), puesto que estudios realizados con un maniquí a diferentes profundidades demostraron que la resistencia era 2.4 veces mayor en la superficie que cuando estaba completamente sumergido. Además, demostraron que para profundidades de 0.6 m o más, la resistencia de ola era insignificante (Lyttle et al., 1998).

Por otro lado, se han descubierto varias formas para reducir la magnitud de esta resistencia generada por el oleaje y que consisten principalmente en la mejora de la técnica de nado:

- Aumentar la longitud del cuerpo estirando el brazo completamente hacia delante al acabar la fase de recobro de la brazada.
- Evitar romper la superficie del agua bruscamente introduciendo el brazo progresivamente por el mismo “agujero”, es decir, primero la mano seguida del antebrazo, codo..., para reducir la superficie de ruptura del agua.



Figura 2.6: Ejemplo de rolido.

- Introducir una pequeña rotación del cuerpo, conocida como “rolido” (Figura 2.6⁴). Este movimiento consiste en que los nadadores vayan girando su cuerpo parcialmente hacia el lado en el que hacen la tracción mientras nadan, en lugar de mantener una posición plana cuando bracean. Con el ángulo correcto de inclinación, se crearán olas con unas amplitudes más pequeñas.
- Nadar el máximo tiempo posible y permitido⁵ debajo del agua, levantando la cabeza lateralmente para respirar cuando sea necesario.

Como se puede comprobar con el análisis de las técnicas mencionadas en este capítulo para disminuir las fuerzas de arrastre que aparecen en el nado, los atletas no necesitan ser excesivamente voluminosos o tener una gran masa muscular para ser más rápidos en el agua, pues con una técnica adecuada sumada a buenas características morfológicas se pueden alcanzar grandes objetivos.

⁴Imagen extraída de *Iniciación a la técnica en los estilos en natación. Primera parte: Estilo crol* (<http://www.efdeportes.com>)

⁵En competiciones oficiales el máximo nado subacuático permitido después de cada impulso de la pared son 15 metros.

Capítulo 3

Metodología

Contenidos:

3.1. Introducción	23
3.2. Modelado CFD	24
3.2.1. Casos de estudio	24
3.2.2. Definición del nadador	25
3.2.3. Descripción de la geometría	25
3.2.4. Descripción del dominio	27
3.2.5. Descripción del proceso de mallado	28
3.2.6. Configuración de los casos	34
3.2.7. Validación	44
3.3. Diseño del modelo del optimizador energético	45
3.3.1. Descripción del problema	45
3.3.2. Corrientes	46
3.3.3. Modelado del nadador	48
3.3.4. Parámetros del modelo	50

3.1. Introducción

A lo largo del presente capítulo se pretende mostrar con detalle el procedimiento seguido durante el desarrollo de los diferentes estudios que se han realizado. Dichos estudios, descritos en profundidad en líneas próximas, se realizarán con el programa STAR-CCM+ y se centran principalmente en el análisis de las fuerzas presentes en el nado, concretamente las de resistencia pasiva en este caso y las de sustentación. Cabe destacar que las fuerzas de sustentación que se generan en el modelo descrito no se corresponden con exactitud con las presentes en la realidad, puesto que los movimientos de brazada y patada que el nadador genera para propulsarse por el medio acuático

también generan cierta fuerza ascendente que el nadador emplea para mantenerse en la superficie del agua. Aún así, dicho tema se desarrollará con más profundidad en este capítulo. Por otro lado, se describirá también el diseño del optimizador energético empleado para la simulación de una prueba en mar abierto con el fin de estudiar posibles métodos de entrenamiento.

3.2. Modelado CFD

En este apartado se describen los pasos y parámetros necesarios para configurar el modelo de CFD empleado, en el cual se incluye el diseño de la geometría, el dominio y las diferentes condiciones de contorno establecidas, el estudio de independencia de malla necesario para optimizar el tiempo de cálculo y la configuración de los diferentes casos de estudio.

3.2.1. Casos de estudio

El estudio hidrodinámico que se ha realizado en el presente proyecto consta de tres estudios distintos, que persiguen el fin último de analizar las diferentes fuerzas que tienen lugar en el avance acuático con programas de dinámica de fluidos computacional. A continuación se describirán en qué consisten dichos estudios.

En el primero de ellos se busca reproducir las condiciones a las que se enfrentaría un nadador en piscina, donde se introducirá un modelo de nadador en diferentes posiciones que puede adoptar durante un ciclo de brazada. Para ello, se configurará un *Set Up* que consiga recrear las condiciones deseadas, aunque cabe destacar que en este caso el nadador se fijará en el centro de la geometría y será al fluido al que se le otorgue la velocidad pertinente del nadador para facilitar la tarea de cálculo.

El siguiente estudio que se realizará será similar al anterior, aunque esta vez se recrearán las condiciones con las que se puede encontrar un atleta cuando realiza una travesía en el mar, con el fin de comparar cómo varían las fuerzas de resistencia anteriormente obtenidas con las que se obtendrían en las nuevas condiciones. Para ello, se configurará un modelo de oleaje, cuyos datos se han extraído de fuentes oficiales del ministerio donde se registran datos del oleaje de la costa de valenciana para así lograr un grado de autenticidad mayor. Las olas que se introducirán tendrán una altura de 20 *cm* con un período de 4.2 *s*. Además, para este caso sí que se dejará que el nadador se mueva en dirección vertical y que realice un movimiento de cabeceo, para permitir su correcta adaptación al movimiento de las olas.

Con el último estudio se quiere comprobar cómo puede llegar a afectar el cansancio al nadador cuando realiza una prueba de larga distancia. Para

implementar esto en el modelo se han elegido diferentes posiciones en las que varía la inclinación de las piernas con respecto al cuerpo, es decir, cada vez más hundidas. Para ello se ha optado por introducir el mismo *Set Up* recreado para el segundo estudio, donde había un cierto oleaje, ya que estas pruebas de larga distancia se suelen realizar en el mar.

3.2.2. Definición del nadador

Para la recreación del modelo del nadador, se decidió elegir un diseño que reuniera las características comunes de un nadador estándar de competición, cuyas dimensiones vienen recogidas en la Tabla 3.1. Dicho modelo se encontró en la página web de GRABCAD, desde donde se extrajo un ensamblaje con las diferentes partes que conformaban al dummy y se fue modificando con el programa SOLIDWORKS para la colocación del mismo en todas las posiciones deseadas para realizar el estudio, las cuales quedan reflejadas en la Figura 3.1.

Dimensiones	
<i>Altura</i>	1.90 m
<i>Superficie frontal</i>	0.1458 m ²
<i>Peso</i>	80 kg

Tabla 3.1: Dimensiones del nadador.

3.2.3. Descripción de la geometría

En primer lugar se establece el sistema de ejes de coordenadas que gobernará durante todo el proceso. Este queda definido con el eje X en la dirección longitudinal del nadador, es decir, en la que discurrirá el fluido con sentido positivo aguas abajo. El eje Y será perpendicular al nadador en sentido ascendente y el eje Z estará en el mismo plano que el eje X pero con la dirección transversal y sentido positivo hacia la parte izquierda del nadador. Dicha explicación queda más claro observando la Figura 3.2 donde está representado el dominio junto a los ejes de coordenadas descritos.

Como se ha comentado al inicio del capítulo, la geometría del nadador será importada en un archivo *parasolid binary* en formato *.x_b*, pues es el que mejor funciona para este tipo de problema.

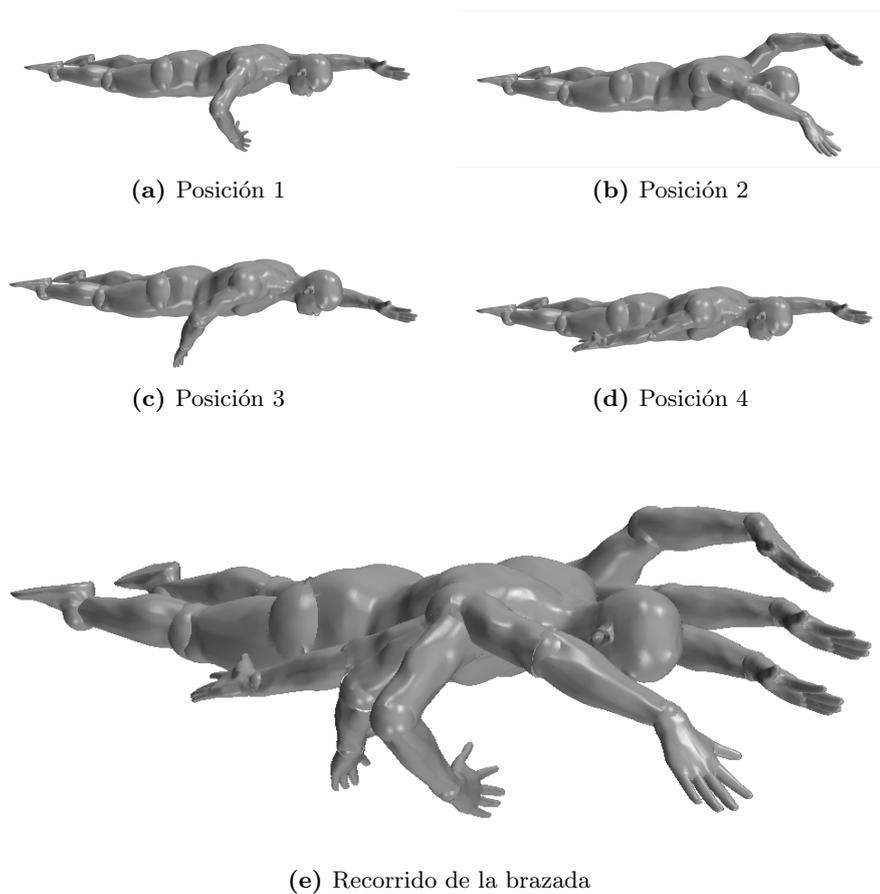


Figura 3.1: Representación de las diferentes posiciones seleccionadas.

Para ello, habrá que crear una nueva geometría 3D dentro del módulo de CAD donde luego se importará el archivo anterior.

Geometry > 3D-CAD Models > New

Una vez importado el diseño del nadador 3D dentro del módulo de CAD se proceden a realizarse los siguientes pasos:

1. **Creación de la piscina.** Se crea un *sketch* cuadrado que posteriormente se extruye, definiendo lo que será la piscina.
2. **Colocación del nadador.** Mediante las herramientas de *Rotate* y *Translate* presentes en la pestaña de *Transform* se sitúa al nadador en el centro de la piscina anteriormente creada.

3. **Generación del dominio fluido.** A la piscina generada en el primer paso se le resta el cuerpo del nadador en la posición fijada mediante la operación *Substract* presente en la pestaña *Boolean*. En la sección 3.2.4 se encuentra una descripción más detallada de este dominio.
4. **Creación de volúmenes de control.** Se crearán dos sketch que posteriormente serán extruidos y conformarán dos volúmenes de control para operaciones de refinamiento de malla. El primer volumen de control cubrirá el cuerpo del nadador y el segundo se extenderá a lo largo de la superficie del agua con pequeño espesor para estudiar con detalle el oleaje y la estela que genere el nadador. En la sección 3.2.5 se profundizará con más detalle.
5. **Identificación de cada superficie.** Se nombra a cada superficie del dominio para poder trabajar con cada una de ellas por separado posteriormente y para poder establecer las condiciones de contorno correspondientes.

3.2.4. Descripción del dominio

Para determinar el tamaño de la piscina, se realizaron diferentes estudios donde se analizó cómo afectaba reducir el tamaño del dominio en la estela que se originaba con la interacción del nadador en el agua. Tras probar diferentes configuraciones, se optó por la que aparece en la Figura 3.2, donde se estableció que la piscina tiene una profundidad de 3 metros, ya que es la profundidad recomendada por la Federación Internacional de Natación (FINA) para todas las piscinas olímpicas o de alta competición que se estableció a partir de los Juegos Olímpicos de Pekín de 2008, pues las ondas que generan los nadadores pueden disiparse antes de llegar al fondo y así se evita que reboten hacia arriba produciendo más turbulencias. La altura del techo se estableció en 3 metros también, aunque al haber aire en esta parte las ondas que se generen no producirán apenas resistencia debido a su baja densidad. Por otro lado, con una longitud del dominio de 12 metros y un ancho de 6 metros es suficiente para poder observar y estudiar con claridad la estela generada.

Cabe destacar que la diferenciación de los dos fluidos se realizará al configurar el *Set Up* del modelo.

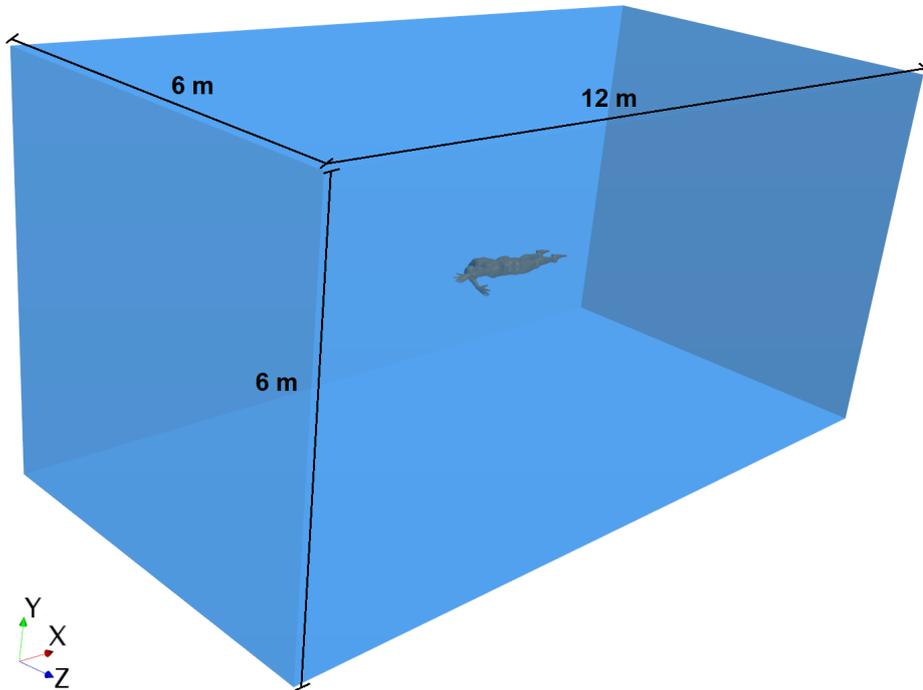


Figura 3.2: Representación del dominio del modelo 3D con sus dimensiones.

3.2.5. Descripción del proceso de mallado

Características principales de la malla

Para la creación de la malla del dominio, se ha optado por una malla automática de tipo *trimm*, es decir, en la que se define la orientación principal del flujo y que está constituida por hexaedros con nodos de interpolación. Dicha malla presenta las siguientes características:

Meshers

- Surface Remesher
- Trimmed Cell Mesher
- Automatic Surface Repair
- Prism Layer Mesher

Por otro lado, se establece que el tamaño sea variable en función de la distancia al cuerpo del nadador, teniendo como referencia el tamaño base (*Base Size*), el cual será el que se irá variando para encontrar el tamaño de malla adecuado, como se describe más adelante. Por tanto, los siguientes

parámetros que se describen se establecen en porcentaje respecto al tamaño de la base.

Default Controls

- Target Surface Size: 500 %
- Minimum Surface Size: 500 %
- Maximum Cell Size: 5000 %

Además, se configuran también las siguientes opciones, las cuales hacen referencia a la tasa de crecimiento, al número de capas y al ratio de estrechamiento de una capa a la siguiente:

- Surface Growth Rate: 1.3
- Number of Prism Layers: 4
- Prism Layer Stretching: 1.5

Volúmenes y superficies de control

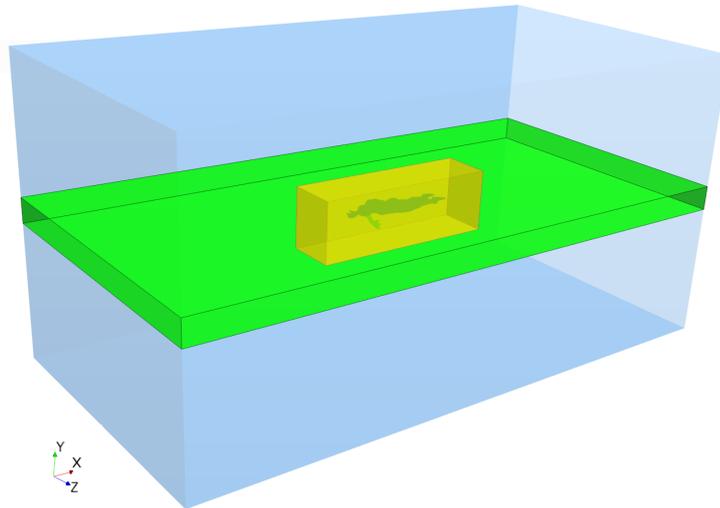
Para poder obtener una solución más aproximada y que permita captar todos los detalles posibles de la geometría del nadador, se realizará un refinamiento de la malla mediante dos volúmenes de control que cubran el cuerpo del nadador y la superficie del agua, para poder captar con exactitud los posibles cambios en la misma. En la figura 3.3 se puede apreciar en color verde el volumen de control creado para la estela y en color amarillo el del nadador. Además, se incluirá también una superficie de control que dotará de mayor precisión a la malla y que cubrirá al nadador.

El primer paso a realizar para poder obtenerlos es la creación en el módulo de CAD de STAR-CCM+ de dichos volúmenes a partir de un sketch que es extruido, para posteriormente crear una *Part* para cada volumen.

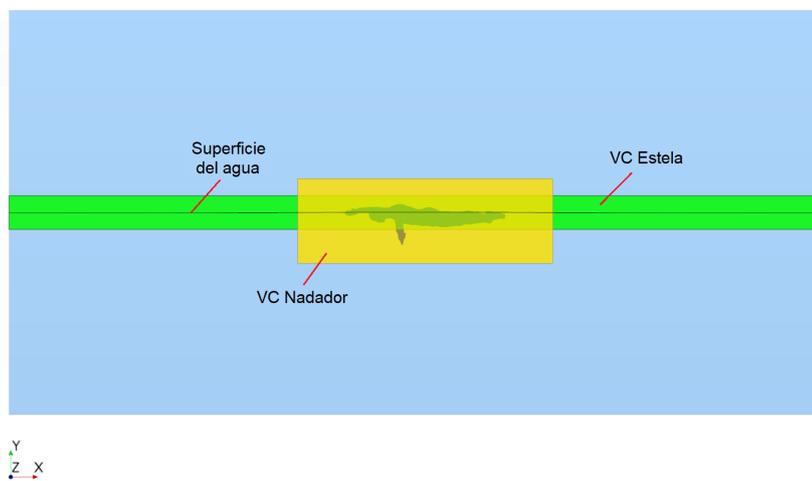
En la pestaña de configuración de la malla, se procederá de la siguiente manera para crear los volúmenes y superficie de control deseados.

Geometry > Operations > Custom Controls > New > Volumetric Control/Surface Control

Una vez creado, se le asigna la *Part* correspondiente que se ha diseñado previamente. Como el objetivo de estos volúmenes es realizar una malla más fina en dichas regiones, sólo se activará la opción *Customize Isotropic Size* que se encuentra en la pestaña de *Trimmer*. Con sólo esta opción activada lo único que se permite modificar es el tamaño relativo de las celdas respecto al tamaño base, el cual se fijará en un 20 %, siendo un tamaño mucho más pequeño que los definidos anteriormente para el resto del dominio. Este



(a) Perspectiva del dominio



(b) Vista lateral del dominio

Figura 3.3: Representación de los volúmenes de control.

refinamiento es claramente observable en la Figura 3.4, donde, en las zonas del dominio alejadas del nadador, el tamaño de la malla es bastante grande, pero va reduciéndose en función de la cercanía al nadador y, como se ha comentado, las zonas de los volúmenes de control tienen un refinamiento mayor claramente apreciable, tanto el de la estela como el del nadador.

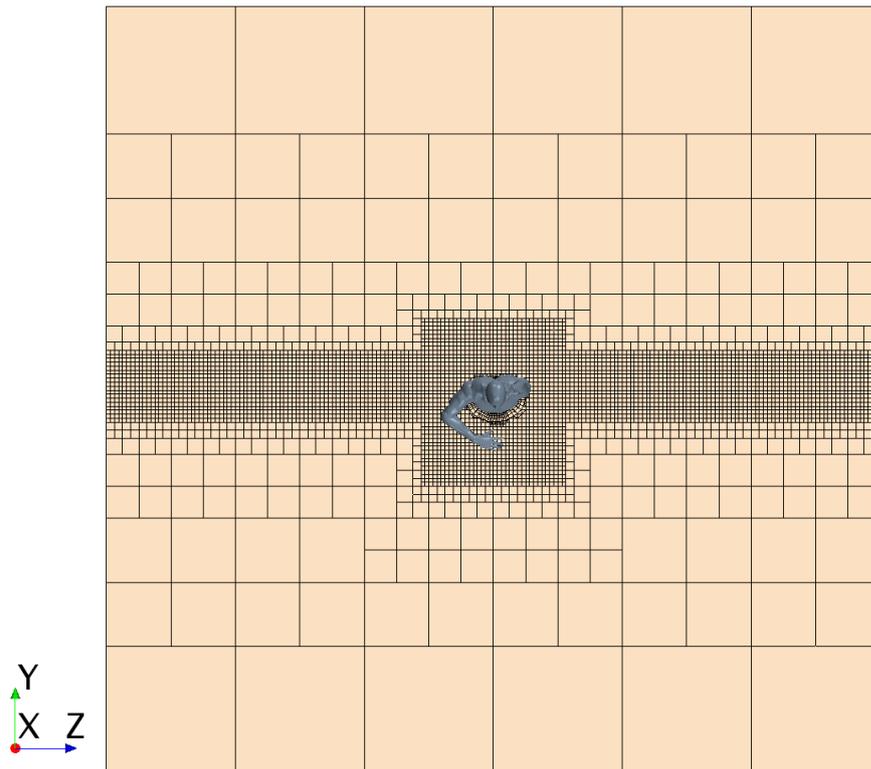


Figura 3.4: Mallado de los volúmenes de control.

Estudio de independencia de malla

Seguidamente, para poder determinar cuál es el tamaño de celda óptimo que permita obtener una solución independiente de la malla y consecuentemente reducir el tiempo de cálculo, se procedió a realizar un estudio de independencia de malla. En primer lugar se intentó realizar sobre un modelo básico 2D, pero tras varios intentos se llegó a la conclusión de que el modelo propuesto es inviable debido a que el programa considera al nadador (en 2D) como un objeto infinitamente largo, evitando que el agua discorra alrededor del mismo y originando reflujos entre las distintas fases. Es por ello que todos los cálculos han sido realizados con el modelo 3D, y haciendo uso del nadador en la posición 1 (Figura 3.1a).

Dicho estudio consta de los siguientes pasos:

- En primer lugar, se configuran todos los parámetros de malla descritos en la sección 3.2.5.
- Seguidamente, se seleccionan los distintos tamaños de base para las celdas (*Base size*) que se quieren estudiar, pues será el parámetro que se irá modificando, ya que el resto de opciones anteriormente configuradas dependen de este. Los tamaños seleccionados para el estudio fueron:

Base Size (<i>m</i>)	Nº celdas ($\times 10^6$)
0.100	11.18
0.115	7.01
0.150	3.60
0.200	1.54
0.240	0.97
0.300	0.48

Tabla 3.2: Tamaños de base seleccionados para el estudio de independencia de malla.

- Después, para poder estudiar cómo cambian algunos parámetros significativos en función de los tamaños de malla, se crea un *Plot* donde se recogerá toda la información pertinente a la variación de la resistencia, puesto que su valor es el que más interesa en el presente trabajo.
- Una vez configurados los casos, se van ejecutando el tiempo suficiente para que la solución se estabilice y poder obtener valores acertados, siendo este de unos 10 segundos de tiempo físico. Destacar que en función del tamaño de malla, los tiempos de simulación variarán, siendo más elevados cuanto menor sea el tamaño base, pues habrá un mayor número de celdas.
- Por último, en la Tabla 3.3 se recogen todos los valores de resistencia obtenidos para cada caso, además de parámetros interesantes de la curva de resistencia obtenida, pues al tratarse de un caso transitorio, los resultados adquieren un carácter sinusoidal, por lo que se analizarán los valores máximos y mínimos, así como la frecuencia y amplitud de la oscilación para cada caso. Destacar que también se incluyen la cantidad de celdas generadas para cada caso, así como los valores del coeficiente de resistencia (C_d) calculados a partir de la fórmula (3.1), con una densidad del agua de 997.56 kg/m^3 , una superficie frontal del

nadador de 0.1458 m^2 y una velocidad de avance de 1.4 m/s .

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot CD \quad (3.1)$$

Base Size	Nº celdas ($\times 10^6$)	Drag medio (N)	Máximo (N)	Mínimo (N)
0.100	11.18	104.56	110.86	99.89
0.115	7.01	103.68	108.77	98.31
0.150	3.60	103.43	109.81	97.53
0.200	1.54	103.59	109.82	98.08
0.240	0.97	104.94	111.07	98.37
0.300	0.48	107.80	114.99	101.13

Base Size	Amplitud (N)	Frecuencia (s)	CD
0.100	10.97	2.04	0.6586
0.115	10.46	1.80	0.6530
0.150	10.52	1.83	0.6515
0.200	11.74	1.92	0.6525
0.240	12.70	1.88	0.6610
0.300	13.86	1.79	0.6790

Tabla 3.3: Resultados del estudio de independencia de malla.

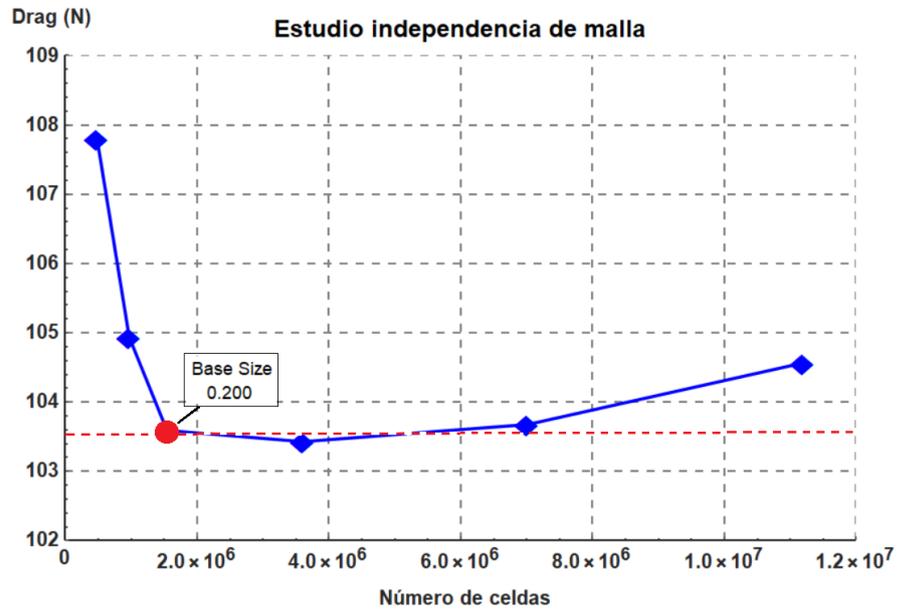


Figura 3.5: Representación de los resultados obtenidos en el estudio de independencia de malla.

Con estos resultados obtenidos, se decide representar el valor del Drag medio en función del número de celdas (Figura 3.5), y se llega a la conclusión de que el tamaño base adecuado es el de **0.2 m**, puesto que los resultados que se observan con un tamaño superior comienzan a incrementarse exponencialmente, dejando de ser válidos. Además, se puede afirmar que los valores de resistencia son bastante semejantes a los obtenidos para un tamaño de malla más fino, hecho observable también si se comparan los valores del coeficiente de resistencia, los cuales se estabilizan entorno a 0.65 para las mallas más finas, y la gran ventaja principalmente observada de elegir este tamaño de malla es que el tiempo de cálculo se consigue reducir en un 80% con respecto a la más fina. En la Figura 3.6 se representa la malla resultante en la superficie del nadador.

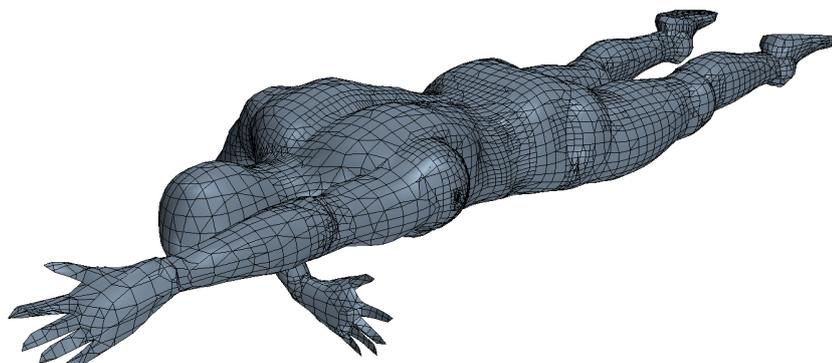


Figura 3.6: Malla de la superficie del nadador.

3.2.6. Configuración de los casos

Para un correcto funcionamiento del estudio propuesto es necesario la elección certera de los modelos y algoritmos necesarios para llevar a cabo el cálculo, con el fin de que los resultados que se obtengan sean lo más veraces posibles y se asemejen lo máximo a la realidad. Para comprobar dicha veracidad se realizó un estudio de validación, donde se compararon los resultados obtenidos con estudios previos similares. Esta comprobación se expondrá con detalle en el apartado 3.2.7.

A continuación se describirá la configuración establecida para cada estudio, las condiciones de contorno seleccionadas y los modelos de resolución empleados. Este proceso es conocido también como *Set Up*.

Selección de los modelos

En este apartado se describirá el proceso empleado para la selección de los distintos modelos físicos necesarios para la correcta simulación de todas las fuerzas que actúan en el problema. Además, a pesar de que se trate de un caso bifásico donde coexisten aire y agua, ambos fluidos se simularán en un mismo *Set Up* haciendo uso del modelo *Volume of Fluid* (VOF) de STAR-CCM+.

Para comenzar, se sigue la siguiente línea de comandos:

Continua > New > Physics Continuum

Una vez creado el nuevo *Physics Continuum*, se seleccionan los modelos indicados en la tabla 3.4 siguiendo el orden.

Group Box	Model
<i>Space</i>	Three-Dimensional
<i>Enabled Models</i>	Gradients
<i>Time</i>	Implicit Unsteady
<i>Material</i>	Eulerian Multiphase
<i>Multiphase Model</i>	Volume of Fluid (VOF)
<i>Viscous Regime</i>	Turbulent
<i>Reynolds-Averaged Turbulence</i>	K-Epsilon Turbulence
<i>Optional Models</i>	Gravity
	VOF Waves

Tabla 3.4: Modelos seleccionados para la configuración CFD del problema.

Como se ha comentado, se trata de un medio bifásico en el que están presentes aire y agua, por lo que es necesario activar el modelo Euleriano, puesto que estudia la evolución temporal de las magnitudes de todas las partículas fluidas que intervienen en el problema. Sumado a esto, es necesario activar el modelo de turbulencia debido a los torbellinos y oleaje que se formará cuando el fluido choque contra el nadador, tal y como se describió en el Capítulo 2, y para lo cual se elige el modelo de turbulencia K-Epsilon. Además, es necesario incluir el efecto que produce la gravedad para obtener una simulación lo más veraz posible, así como el *VOF Waves*, que permite introducir olas.

Selección de los materiales

Una vez introducidos todos los modelos necesarios, se necesita definir los dos fluidos que conformarán el problema.

Continua > Physics 1 > Models > Eulerian Multiphase > Eulerian Phases > New

Donde se creará una fase para el agua y otra para el aire, especificando en las opciones *Liquid* o *Gas* según corresponda, y estableciendo como opción *Constant Density*.

Configuración del solver de movimiento

Para dotar al nadador de los grados de libertad pertinentes para permitir su correcta flotación y movimiento en el agua, es necesario introducir el solver de movimiento 6-DOF. Para ello, se procede de la siguiente forma:

Tools > Motions > New > DFBI Rotation and Translation

Una vez creado es necesario introducir esta opción dentro los modelos anteriormente seleccionados:

Regions > Piscina > Physics Values > Motion Specification

y se selecciona el creado antes *DFBI Rotation and Translation*.

Al seleccionarlo aparecerá un nuevo nodo en el árbol llamado *DFBI*, dentro del cual se muestra el solver 6-DOF Bodies. Al hacer click en él se crea un nuevo cuerpo al que se le nombrará *Nadador*. Para asignarle el objeto al que se le quiere introducir el movimiento, en la opción *Body Surface* se selecciona la *Region* correspondiente a la superficie del nadador. En esta pestaña también se configura la masa del nadador en 80 *kg* y se establece que el movimiento comience con un retraso de 0.5 *s* para que la solución pueda estabilizarse. Por otro lado también es necesario introducir la posición del centro de gravedad del nadador, la cuál estará situada en el vector de coordenadas (0.1, -0.05, 0.015) *m*. En la Figura 3.9 que se encuentra más hacia delante puede verse con claridad la situación del mismo.

Configuración del modelo de olas

El modelo que implementa las olas en el problema ha sido seleccionado en el Set Up anterior y se llama VOF Wave, presente en el programa STAR-CCM+. Este modelo permite generar un número de funciones de campo que se basan en los parámetros que se decidan configurar. Estas funciones

serán usadas posteriormente en las condiciones iniciales y de contorno para facilitar los cálculos con el programa.

Para ello se creará en primer lugar una ola que estará definida por una función de quinto orden:

Continua > Physics 1 > Models > VOF Waves > Waves > New > FifthOrder

Esta ola creada se configurará de forma distinta para cada uno de los casos, como se verá más adelante en la explicación realizada para la configuración de cada caso, pero tendrá una dirección de avance en el sentido del eje X, es decir, las olas le llegarán al nadador de frente.

Condiciones iniciales

En la definición de las condiciones iniciales del problema, se hará referencia a la función de ola creada previamente y consistirán en el perfil de la ola de la superficie libre, el perfil de velocidades dentro de cada fase y la presión hidrostática. Para ello, dentro de la pestaña de *Physics 1 > Initial Conditions*, se configurará lo siguiente:

Nodo	Propiedad	Setting
Volume Fraction > Composite > Water	<i>Scalar Function</i>	Volume Fraction of Heavy Fluid of Head Wave
Volume Fraction > Composite > Air	<i>Scalar Function</i>	Volume Fraction of Light Fluid of Head Wave
Velocity	<i>Vector Function</i>	Velocity of Head Wave
Pressure	<i>Scalar Function</i>	Hydrostatic Pressure of Head Wave

Tabla 3.5: Tabla de Condiciones iniciales.

Como se puede observar, todas las condiciones iniciales están marcadas por una función que se crea automáticamente al definir las características que se deseen para el modelo de olas (*VOF Waves*).

Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno elegidas para este problema son las siguientes (Figura 3.7):

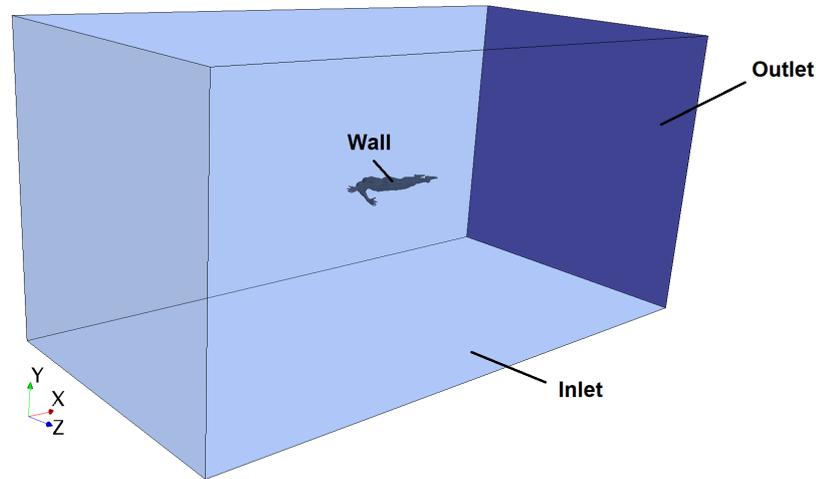


Figura 3.7: Condiciones de Contorno.

- *Wall*: Se establece la condición de no deslizamiento del flujo en la superficie del nadador.
- *Velocity Inlet*: Esta condición se impondrá en todas las caras del dominio a excepción de la posterior. En la Figura 3.7 se identifica con las partes de azul claro. Además, se ha elegido esta opción porque se conoce el valor de la velocidad con la que el fluido entra en el dominio, la cual será especificada en función de cada caso de estudio y será la que lleve al nadador, puesto que éste estará fijo en el centro y es el fluido el que se mueve. Para configurarla, se procede de la misma forma que con las condiciones iniciales anteriormente detalladas en la Tabla 3.5, seleccionando la *field function* correspondiente a la ola creada dentro de la pestaña de *Physics Values*.
- *Pressure Outlet*: Como queda indicado en la Figura 3.7, la cara posterior, identificada con un tono azul oscuro, se definirá con esta condición de contorno, pues es la zona por la que saldrá el fluido del dominio. Para configurarla simplemente se repetirán los mismos pasos que con la condición de contorno anterior, seleccionando las *field functions* correspondientes a la *Head Wave*, pero esta vez dentro de la pestaña *Outlet*.

Configuración del estudio en piscina sin oleaje

A continuación se describirá la configuración particular para el primer estudio realizado, el cual pretende simular un nado en piscina. Es por ello,

que no habrá presencia de oleaje y el nadador estará fijo en la parte central del dominio como se ha ido viendo en las distintas figuras. Al fijar al nadador, la velocidad se le otorgará al fluido y al aire. Dentro de la selección de los modelos físicos, en la configuración del modelo de olas, se especificará lo siguiente (Tabla 3.6):

Node	Setting
<i>Current Velocity</i>	1.4 m/s
<i>Wind Velocity</i>	1.4 m/s
<i>Wave Height</i>	0.01 m
<i>Wave Length</i>	10 m
<i>Light Fluid Density</i>	1.18 kg/m ³
<i>Heavy Fluid Density</i>	997.56 kg/m ³

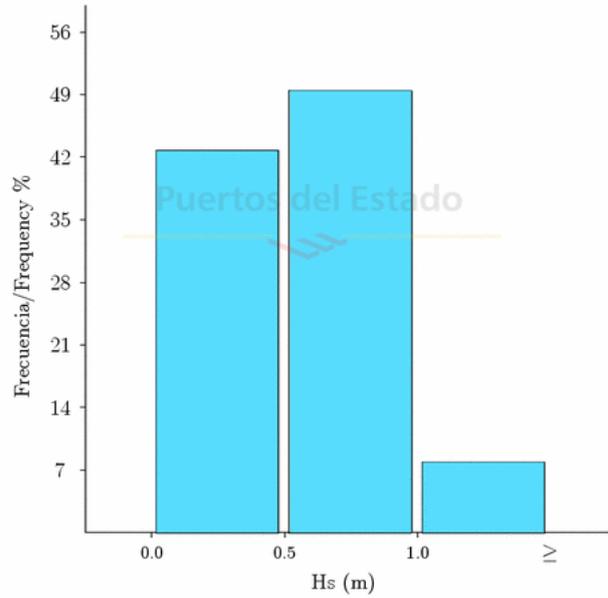
Tabla 3.6: Configuración del modelo de ola para el estudio sin oleaje.

Como se puede observar, a pesar de ser un estudio donde no hay presencia de olas, era necesario crear una pequeña elevación para que el programa funcionara correctamente, por ello se ha elegido una altura de la cresta prácticamente nula con una longitud de onda bastante grande, haciendo casi inexistente la presencia de olas. Por otro lado, es aquí donde se configuran las densidades de ambos fluidos a las cuales se han ido haciendo referencia en las distintas configuraciones de las condiciones iniciales y de contorno anteriormente descritas. Por otro lado, en la configuración del DFBI se restringen todos los posibles grados de libertad.

Configuración del estudio en mar con oleaje

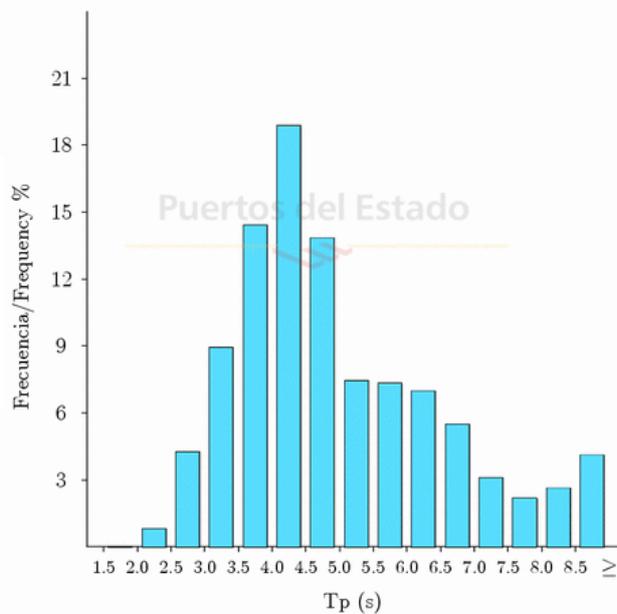
En el siguiente estudio realizado, se simulará un nado en aguas abiertas, para lo que se introducirán los datos obtenidos del oleaje de la costa de la ciudad de Valencia en el programa, con el fin de comparar cuál es el efecto que éstas tienen en la resistencia que opone el nadador al avance por el agua. Dichos datos se obtuvieron de la página web del Ministerio de Fomento del Gobierno de España, la cual recoge la información de diferentes boyas colocadas en el mar. En la Figura 3.8 se muestran los gráficos correspondientes a la altura significativa del oleaje (H_s) y al período de pico (T_p) recogidos en una boya de la costa valenciana entre los meses de verano del año 2016. Junto con la observación de estos gráficos se decidió establecer una altura para las olas de 0.2 m con un período de 4.2 s. Por tanto, las configuraciones establecidas para el modelo de ola quedan recogidas en la Tabla 3.7.

LUGAR/LOCATION : SIMAR 2082114
 AÑO/YEAR : 2016 PERIODO/PERIOD : Jun.-Ag.
 MUESTREO/SAMPLING : 1 Hor. EFICACIA/EFFIC. : 100.00 %



(a) Altura significativa del oleaje (H_s)

LUGAR/LOCATION : SIMAR 2082114
 AÑO/YEAR : 2016 PERIODO/PERIOD : Jun.-Ag.
 MUESTREO/SAMPLING : 1 Hor. EFICACIA/EFFIC. : 100.00 %



(b) Período de pico (T_p)

Figura 3.8: Gráficos donde se recogen los datos del oleaje de Valencia del verano de 2016.

Node	Setting
<i>Current Velocity</i>	1.4 m/s
<i>Wind Velocity</i>	1.4 m/s
<i>Wave Height</i>	0.2 m
<i>Wave Period</i>	4.2 s
<i>Light Fluid Density</i>	1.18 kg/m ³
<i>Heavy Fluid Density</i>	997.56 kg/m ³

Tabla 3.7: Configuración del modelo de ola para el estudio con oleaje.

A diferencia del estudio anterior, ahora sí que se le dotará al nadador de movimiento, que será el desplazamiento vertical (eje Z) y el cabeceo (rotación en el eje Y). Esto se realiza para que el nadador pueda acompañar al movimiento de las olas tras su paso como ocurriría en la realidad, pues si se deja fijo al nadador éste quedará hundido bajo el agua cuando atraviese la ola. Al introducir estos movimientos, es necesario dar al programa información sobre los momentos de inercia. Para calcularlos, se hará uso de la fórmula

$$I = \sum m_i \cdot r_i^2 \quad (3.2)$$

donde m_i hace referencia al peso de cada elemento del cuerpo y r_i a la distancia del centro de gravedad de ese elemento al centro de gravedad del cuerpo. Para conocer la contribución al peso de cada parte del cuerpo, se consultó en Lefton and Malone (2009), de donde se extrajeron los valores, en porcentajes, de la contribución de cada parte al peso total (Tabla 3.8), para la que se considera una masa total del nadador de 80 kg. Además, en la Tabla 3.9 se indican las distancias que hay entre el centro de gravedad de cada parte del cuerpo con el global, necesarias para el cálculo de las inercias.

Parte del cuerpo	% Peso	Peso (kg)
<i>Cabeza</i>	8 %	6.40
<i>Tronco</i>	50 %	40
<i>Mano</i>	0.7 %	0.56
<i>Antebrazo</i>	1.6 %	1.28
<i>Parte superior del brazo</i>	2.7 %	2.16
<i>Pie</i>	1.5 %	1.2
<i>Parte inferior de la pierna</i>	4.4 %	3.52
<i>Muslo</i>	10.1 %	8.08

Tabla 3.8: Pesos de cada parte del cuerpo.

Parte del cuerpo	Eje X (m)	Eje Y (m)	Eje Z (m)
<i>Cabeza</i>	0	0.65	0.65
<i>Tronco</i>	0	0.15	0.15
<i>Mano izquierda</i>	0.18	1.01	1.00
<i>Mano derecha</i>	0.34	0.32	0.45
<i>Antebrazo izquierdo</i>	0.22	0.78	0.75
<i>Antebrazo derecho</i>	0.36	0.45	0.42
<i>Parte superior brazo izquierdo</i>	0.22	0.54	0.51
<i>Parte superior brazo derecho</i>	0.30	0.48	0.37
<i>Pie izquierdo</i>	0.18	1.02	1.00
<i>Pie derecho</i>	0.16	1.01	1.00
<i>Parte inferior pierna izquierda</i>	0.16	0.76	0.75
<i>Parte inferior pierna derecha</i>	0.16	0.76	0.75
<i>Muslo izquierdo</i>	0.14	0.33	0.30
<i>Muslo derecho</i>	0.14	0.33	0.30

Tabla 3.9: Distancias entre CDG de cada parte del cuerpo al CDG global.

Por tanto, una vez conocidos los diferentes pesos y las distancias entre los centros de gravedad, basta aplicar la ecuación (3.2) para obtener los valores de los momentos de inercia, los cuales quedan reflejados en la Tabla 3.10.

I_x ($kg \cdot m^2$)	I_y ($kg \cdot m^2$)	I_z ($kg \cdot m^2$)
1.1765	14.7052	13.9607

Tabla 3.10: Valores de los momentos de inercia del nadador.

Por otro lado, el hecho de que el nadador esté en estático y sea el fluido el que se mueva, presenta un inconveniente puesto que durante el nado, como se comentó en el Capítulo 2, el movimiento de la brazada y de la patada, además de emplearse para propulsarse, también es utilizado por el nadador para mantener la línea del cuerpo sobre la superficie, evitando que se hundan la cabeza y las piernas, es decir, la propulsión también aporta una fuerza de sustentación. Por tanto, en este estudio dicha fuerza de sustentación no se está teniendo en cuenta. Es por ello que para subsanar este hecho se aplicará una fuerza vertical en la dirección del eje Y hacia arriba que simulará la sustentación pertinente. El valor de dicha fuerza aplicada se calculará posteriormente tras realizar el primer estudio en piscina, de donde se obtendrán, además de los valores de resistencia correspondientes, los de sustentación que genera cada posición. Con esos datos se hallará el valor medio, el cual será el módulo de la fuerza a aplicar a cada posición correspondiente. Como con el movimiento de brazada se produce una fuerza de sustentación mayor

que con la patada, se decidió colocar el punto de aplicación de la fuerza a 20 *cm* a la izquierda del centro de gravedad local (entre la cabeza y el tronco) como queda reflejado en la Figura 3.9 con el punto verde. El punto rojo indica la posición del centro de gravedad del nadador.

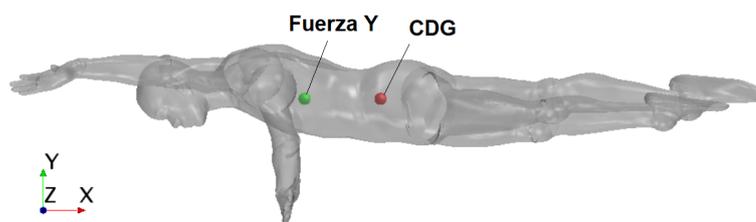


Figura 3.9: Posición del centro de gravedad y de la fuerza Y aplicada.

Configuración del estudio acerca del cansancio

El último estudio realizado pretende analizar cómo afecta el cansancio y su pertinente modificación en la posición de las piernas en la resistencia que el nadador ofrece en el avance, ya que es bastante habitual en nadadores de nivel medio que se vaya produciendo un hundimiento de las piernas conforme transcurre la prueba. Como este hecho suele darse en distancias bastante largas propias de travesías en aguas abiertas, como el mar o ríos, se utilizará

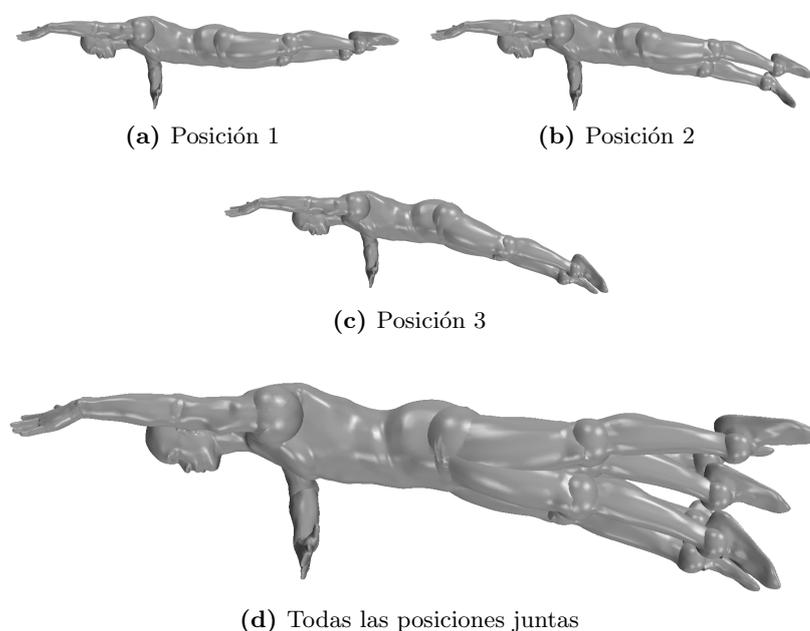


Figura 3.10: Representación de las diferentes posiciones empleadas en el análisis sobre el cansancio.

el mismo *Set Up* del estudio en el mar, donde se introduce un cierto oleaje, pero en este caso se ha fijado la posición de los brazos y se ha ido cambiando la de las piernas, como puede verse en la Figura 3.10.

3.2.7. Validación

En estos estudios se ha hecho uso de las técnicas de mecánica de fluidos computacional (CFD) para analizar las fuerzas de resistencia y de sustentación que se generaban durante el nado en diferentes posiciones, mediante el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$. Estudios realizados previamente, como el de Machtsiras (2013), compara la diferencia entre utilizar el modelo de turbulencia LES y $k-\varepsilon$ al estudiar la fuerza de resistencia que aparece en un desplazamiento subacuático. Sus resultados muestran unos valores mayores para el modelo $k-\varepsilon$ pero también una curva más suave. Los resultados de ambos modelos fueron comparados con experimentales y concluyeron que ambos modelos eran igual de válidos a pesar de las diferencias presentes entre ambos, debido a la cantidad de errores y factores presentes en un caso como el estudiado. Una de las principales características del modelo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), grupo al que pertenece el empleado para este trabajo ($k-\varepsilon$), es que su coste de cálculo es menor en comparación al resto, a pesar de que el grado de precisión sea también menor. Por ello y porque otros investigadores como Bixler et al. (2007), Marinho et al. (2009) y Zaidi et al. (2010) ya hicieron uso del modelo $k-\varepsilon$ para estudios hidrodinámicos en CFD, se cree correcto utilizarlo.

Para poder realizar una validación más exacta con otros estudios, se decidió tomar como referencia el que realizó Machtsiras (2013), el cual consistía en un estudio CFD donde se colocaba un modelo de un nadador a 0.75 metros de profundidad en posición decúbito ventral con los brazos estirados hacia delante y por encima de la cabeza. Es por ello que se ha intentado recrear dicha posición con el modelo existente para este trabajo (Figura 3.11) y estudiar la fuerza de resistencia que aparece cuando se desplaza a una velocidad de 2 m/s .

Los resultados que se obtuvieron eran un 20% mayores (89 N) que los obtenidos por Machtsiras (74 N), hecho debido probablemente a la diferencia en la colocación de las manos de los dos modelos, ya que en el elegido para este estudio de validación no era posible juntar las manos completamente, por lo que puede que genere una resistencia ligeramente mayor. Es por ello que se intentó comparar con otros estudios como el de Marinho et al. (2012), el cual realizaba un estudio similar donde analizaba el efecto de llevar un traje de baño. En este caso obtuvo unos resultados un valor para la fuerza de resistencia de 105 N, resultando un 18% mayores que los del presente trabajo. Por tanto, se puede afirmar con certeza que el modelo empleado para

la realización de los estudios deseados en el presente trabajo son adecuados y correctos, ya que la discrepancia existente entre estudios similares realizados por investigadores experimentados advierte de la dificultad imperante al simular problemas de dicha índole donde factores como la geometría 3D empleada, el modelo de turbulencia elegido o las diferentes condiciones de contorno contribuyen a ello.

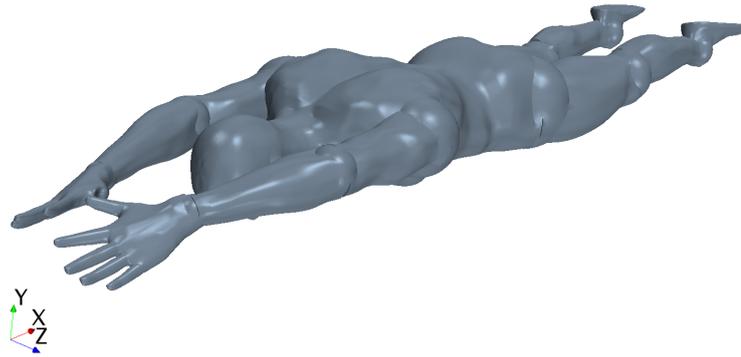


Figura 3.11: Posición elegida para el estudio de validación.

3.3. Diseño del modelo del optimizador energético

3.3.1. Descripción del problema

En esta segunda parte del proyecto se buscará alcanzar el segundo de los objetivos principales planteados, donde se pretende que, para un nadador con unas condiciones determinadas, recorra una distancia definida en el menor tiempo posible, es decir, minimizar (3.3). Para ello, se ha diseñado un modelo de optimizador energético donde se intentará recrear una travesía en el mar, ya que este tipo de recorridos son bastante habituales en verano y de disciplinas como el triatlón. Además, en este tipo de recorridos las distancias de las pruebas suelen ser mayores que las que se realizan en piscina¹.

$$T = \int_0^L \frac{ds}{v} \quad (3.3)$$

¹La prueba olímpica de mayor longitud son los 1500 metros libres.

Por otro lado, el problema estará sujeto a algunas restricciones, ya que el nadador tiene ciertas capacidades. En primer lugar, debido a sus características fisiológicas y también como consecuencia de su técnica de nado, ofrecerá una determinada resistencia al avance por el agua y tendrá una capacidad de transformar su propia energía interna en movimiento (3.4). Además, dispondrá de una potencia máxima que es capaz de desarrollar y de una energía máxima que es capaz de conseguir (3.5).

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} \cdot (F_{prop} - F_{res}) \\ \frac{dE}{dt} = -P \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} 0 < P < P_{max} \\ 0 < E < E_{max} \end{cases} \quad (3.5)$$

Sumado a lo anterior, el nadador se verá afectado por perturbaciones, es decir, factores que afectan al tiempo requerido por el nadador para cubrir la distancia y cuyo control está fuera de alcance del mismo. En este caso, la corriente marina. Puesto que la magnitud y la dirección de dicha corriente depende del espacio, en la formulación matemática del problema se empleará la distancia a recorrer, en lugar del tiempo, que es lo habitual, como variable independiente, puesto que en un primer momento lo que se conoce es la distancia a recorrer y no el tiempo en el que la realiza. En el siguiente apartado se explicará con detalle el modelado de dichas perturbaciones.

En el estudio realizado se marcará un recorrido rectangular en la costa valenciana de aproximadamente 750 m. En la Figura 3.12 se puede observar claramente dicho recorrido y el sentido seguido. Destacar que este trayecto elegido se corresponde con la prueba Triatlón Series Sprint, realizada el 13 de mayo de 2017 en Valencia, del que se disponen los datos registrados de los 511 participantes, y que serán graficados en el Capítulo siguiente.

3.3.2. Corrientes

Uno de los aspectos más importantes en este estudio son las corrientes, ya que serán el factor más decisivo en la toma de decisiones del nadador para conseguir la mayor optimización en su consumo energético. Para dotar de la mayor veracidad al problema, como se hizo anteriormente con el oleaje, la información acerca de la intensidad de las mismas ha sido obtenida de la

página web del Ministerio de Fomento del Gobierno de España de los puertos del Estado. Para este problema se definirá un rango de valores para la intensidad de la misma y también el grado con el que incidirá, como viene representado en la Figura 3.12, siendo 0° paralelo a la costa y en sentido sur y 90° perpendicular a la costa y sentido hacia tierra.



Figura 3.12: Recorrido de la travesía.

El recorrido establecido se divide en 3 tramos, cada uno de 250 metros con una dirección y sentidos distintos. En función del grado con el que la corriente incida, esta afectará de forma distinta a cada tramo, por lo que se establece un rango para las corrientes que irá desde los 0° hasta los 180° , de 15 en 15°. Por otro lado, los valores usados para la amplitud de las corrientes son: 0, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4. El programa analizará todas las combinaciones posibles para todo el rango de valores definido. Para dotar de mayor exactitud al problema, el valor de la corriente tendrá que ser multiplicado por su función trigonométrica correspondiente (seno o coseno) en cada tramo, ya que la dirección es distinta. En la ecuación (3.6) se muestra la fórmula empleada para cada tramo, siendo negativa para los tramos en los que la corriente vaya en contra del nadador y positiva cuando le favorece en el avance.

$$\begin{aligned}
 \text{Tramo 1 : } & v_{stream} = -A \cdot \sin \theta \\
 \text{Tramo 2 : } & v_{stream} = -A \cdot \cos \theta \\
 \text{Tramo 3 : } & v_{stream} = A \cdot \sin \theta
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

3.3.3. Modelado del nadador

Para conseguir modelizar al nadador en el programa de optimización, su movimiento de brazada se ha supuesto similar al movimiento de remada que realizan algunos animales marinos, durante el cual una aleta es acelerada hacia atrás mientras que la otra se mueve hacia delante recobrando la posición. A pesar de las posibles aceleraciones que este movimiento pueda generar, se consideran prácticamente nulas y despreciables, asumiendo que el animal se mueve a una velocidad constante.

El modelo empleado en este problema sigue la idea propuesta por Martin et al. (1981) aunque de una forma más simplificada. Se va a considerar que el brazo rota, como si de un remo se tratase, alrededor del hombro a una velocidad constante. Además se asume que los dos brazos estarán desfasados 180° , con lo que un brazo entrará al agua justo cuando el otro haya acabado la brazada (Zamparo et al., 2005). El modelo queda representado en la Figura 3.13.

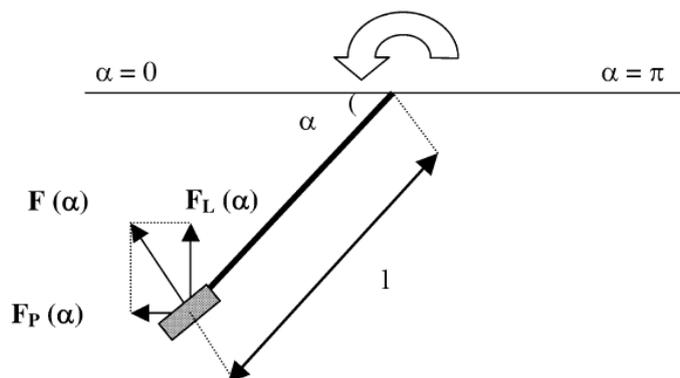


Figura 3.13: Representación de la brazada modelada con la analogía de una pala de remo (Zamparo et al., 2005).

Una vez establecido el modelo con el que se diseñará el problema matemático del presente estudio, resulta necesario conocer todas las fuerzas que intervienen en el nado, las cuales ya fueron descritas en el Capítulo 2. En este caso, la única fuerza que ofrece resistencia al avance del nadador es la fuerza hidrodinámica que se genera con dicho movimiento, la cual se analiza con los estudios hidrodinámicos CFD anteriormente planteados. Esta fuerza viene definida en la ecuación (3.7).

$$F_{res} = F_{hidro} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot C_d \cdot \rho \cdot (v - v_{stream})^2 \quad (3.7)$$

donde A es la superficie frontal del nadador, C_d es el coeficiente de resistencia aerodinámico, ρ es la densidad del agua, v la velocidad que lleva el

nadador y v_{stream} la velocidad de la corriente según las condiciones.

Para determinar el valor del coeficiente de resistencia aerodinámico se ha hecho uso de los resultados obtenidos en los estudio CFD anteriores, donde se determinaba la fuerza de resistencia que aparecía durante el nado. Para ello, se ha estimado el tiempo que el nadador permanece en cada una de ellas y se ha ponderado en función del mismo. Por otro lado, se ha incluido un factor de corrección para introducir el efecto del cansancio que experimenta el nadador a medida que avanza en la prueba. Para cuantificar este factor, se ha hecho uso de los resultados obtenidos en el tercer estudio CFD, donde se analizaba este efecto del cansancio en el nadador, cuya consecuencia era el hundimiento de las piernas con el paso del tiempo y, por ende, un aumento del coeficiente de resistencia. En la ecuación (3.8) se muestra la fórmula empleada para obtener el valor de dicho coeficiente en función de la energía de la que dispone el nadador en cada instante de tiempo.

$$C_d = C_{d,0} \cdot \left((1 + dC_d) - dC_d \cdot \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \right) \quad (3.8)$$

donde $C_{d,0}$ es el coeficiente de resistencia obtenido en los estudios CFD previos, $dC_{d,0}$ es el parámetro del factor cansancio, E será la energía de la que disponga el nadador en cada instante y E_{max} y E_{min} se corresponden con la capacidad física del nadador, es decir, su energía máxima y mínima disponible para realizar la prueba.

Además, para conseguir vencer las fuerzas de resistencia y avanzar en el agua, el nadador desarrolla una potencia, que se le denominará potencia propulsora, que será la variable de decisión del problema (P_{prop}). Esta potencia queda definida según (3.9).

$$P_{prop} = P \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{mec} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (3.9)$$

donde P es la potencia interna que consume el nadador, η_{int} el rendimiento interno, η_{mec} la eficiencia mecánica y el término $\pi/2$ proviene de la modelización empleada para el problema, correspondiente al medio ciclo de brazada para el que se analiza.

Para determinar el valor de la eficiencia mecánica (3.10), se parte de la idea de que para velocidades más lentas de nado, el nadador llevará una frecuencia de brazada más lenta, por lo que la técnica en el empuje del agua será mejor, consiguiendo una mayor eficiencia. Por el contrario, si la velocidad es mayor, su frecuencia también aumentará y su técnica empeorará, necesitando un mayor gasto energético, por lo que su eficiencia será menor.

$$\eta_{mec} = 1 - (0.5 \cdot v)^\delta \quad (3.10)$$

donde v es la velocidad de avance del nadador y δ el coeficiente de esfuerzo mecánico.

Por otro lado, dicha potencia se puede expresar en términos de fuerza (3.11) al dividirla por la velocidad (v), la cual será un estado en este modelo, al igual que la energía interna que el nadador tiene disponible para su movimiento (E).

$$F_{prop} = \frac{P_{prop}}{v} \quad (3.11)$$

Finalmente, la fuerza neta (3.12) del problema será la resultante de restar la fuerza de resistencia a la propulsora.

$$F = F_{prop} - F_{aero} \quad (3.12)$$

Así pues, en cada instante de cálculo, se podrá obtener la próxima velocidad del nadador a partir de la velocidad actual del mismo, la potencia aplicada por el nadador y el valor de la corriente, haciendo uso de las ecuaciones (3.4), (3.6) y (3.9).

3.3.4. Parámetros del modelo

A continuación se mostrarán todos los parámetros de referencia del nadador que se han establecido (Tabla 3.11).

Parámetro	Valor
Radio del brazo, r_w	0.52 m
Área frontal, A	0.1458 m ²
Coef. resistencia, $C_{d,0}$	0.4882
Factor cansancio, dC_d	0.17
Densidad del agua, ρ	1027 kg/m ³
Masa del nadador, m	80 kg
Gravedad, g	9.81 m/s ²
Energía disponible, E_{max}	491250 J
Energía mínima, E_{min}	24563 J
Coef. eficiencia mecánica, δ	70
Rendimiento interno, η_i	0.2055
Potencia máxima demandada, u_{max}	140 W
Potencia mínima demandada, u_{min}	0 W
Velocidad máxima, v_{max}	1.8 m/s
Velocidad mínima, v_{min}	0.05 m/s

Tabla 3.11: Parámetros del modelo del nadador.

La obtención de estos parámetros ha resultado, en gran medida, de la constatación con diferentes fuentes bibliográficas que se expondrán a continuación, así como de los resultados obtenidos en los estudios hidrodinámicos realizados mediante el programa STAR-CCM+.

Con el modelo de la pala de remo (Figura 3.13) empleado para este problema, era necesario establecer una longitud l coherente, puesto que no se diferencia entre brazo y antebrazo, además de que si se estableciera la longitud total del brazo sería erróneo, ya que durante el nado el brazo no está extendido completamente, sino que el antebrazo se dobla hacia el interior del cuerpo generando el movimiento de rolido como se vio en el Capítulo 2. Por ello, el término l , que en el modelo matemático es conocido como radio del brazo r_w , se calculó asumiendo:

1. Una longitud media de las extremidades superiores de 0.575 m (Martin et al., 1981).
2. Un ángulo medio de flexión del codo durante el barrido de 130° (Payton et al., 1999).
3. Que el antebrazo y la parte superior del brazo tienen la misma longitud

Con estas consideraciones se establece que $l = r_w = 0.52\text{ m}$.

Por otro lado, el valor del coeficiente de resistencia C_d se obtiene según (3.8) como se ha comentado antes, donde se incluye el factor del cansancio con su correspondiente hundimiento de piernas que provoca un aumento de dicho coeficiente. Este hecho se introduce mediante el coeficiente dC_d .

Para determinar el valor de la capacidad energética del nadador, se ha hecho uso de la Tabla 3 incluida en el artículo “*An energy balance of front crawl*” (Zamparo et al., 2005), de donde se obtiene el valor del consumo energético por unidad de distancia C , suponiendo que va a velocidad de 1.1 m/s , siendo el consumo de 655 J/m . Dicho valor se multiplica por la distancia total del recorrido (750 m) y se obtiene la capacidad energética máxima E_{max} del modelo. Además también se define la energía con la que se quiere que se disponga al acabar el recorrido (E_{min}), que en este caso no se establece en 0 para que el nadador sea capaz de salir del agua y realizar un pequeño recorrido a pie hasta la línea de meta. Este valor se ha establecido en un 5% de la capacidad máxima. Cabe destacar que los valores que se están obteniendo para determinar estas capacidades energéticas se corresponden con nadadores de alto nivel.

Para el parámetro de energía máxima demandada (u_{max}) también se hizo uso de la Tabla 3 del artículo citado anteriormente, siendo su valor el

correspondiente a la velocidad máxima impuesta. El valor de dicha velocidad se ha elegido tras la comparación con otros estudios, y se corresponde con una velocidad (v_{max}) de un nadador de alto nivel. Es de destacar que la velocidad mínima no se ha establecido en 0 porque no tendría sentido que durante la prueba el nadador llegara a detenerse, por lo que se deja en un valor cercano a 0.

Para la obtención del valor del rendimiento interno η_i también se empleó la tabla citada del estudio de Zamparo et al. (2005), y se dividió la potencia mecánica que gastaría el nadador (122.3 W) entre la potencia interna (595 W) correspondientes a una velocidad media de nado de 1.0 m/s, resultando en 0.2055 el valor del rendimiento.

Para el cálculo del coeficiente de eficiencia mecánica δ se ha tenido en cuenta la aceleración del ciclo de brazadas y las posibles deficiencias técnicas del nadador, obteniendo un valor de 70.

Capítulo 4

Resultados

Contenidos:

4.1. Introducción	53
4.2. Estudio hidrodinámico CFD	54
4.2.1. Resultados del estudio en piscina sin oleaje	54
4.2.2. Resultados del estudio en mar con oleaje	57
4.2.3. Resultados del estudio del efecto del cansancio	59
4.3. Optimización del consumo energético	62
4.3.1. Resultados conjuntos	62
4.3.2. Análisis de casos	63
4.3.3. Comparación con otros nadadores	66

4.1. Introducción

A lo largo del presente capítulo se mostrarán todos los resultados obtenidos con el programa STAR-CCM+ para los estudios realizados y explicados en el Capítulo 3, los cuales se presentarán en diferentes tablas y gráficos en las que irán reportados los valores de las fuerzas de resistencia y de sustentación que el nadador experimenta.

Además, también se han calculado los valores de los coeficientes de resistencia (C_d) y de sustentación (C_l). Para el cálculo de los mismos se han tomado los valores de referencia de la Tabla 4.1.

Valores de referencia	
Densidad, ρ	997.56 kg/m^3
Superficie frontal, A	0.1458 m^2
Velocidad, v	1.4 m/s

Tabla 4.1: Valores empleados para el cálculo de los coeficientes aerodinámicos.

4.2. Estudio hidrodinámico CFD

4.2.1. Resultados del estudio en piscina sin oleaje

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el primer estudio realizado, donde se analizaba un nadador con 4 posiciones diferentes de brazos, correspondientes a medio ciclo de brazada, en una piscina. Estos datos se recogen en las Tablas 4.2 y 4.3.

Posición	Drag medio (N)	Drag máximo (N)	Drag mínimo (N)
1	104.67	111.41	97.43
2	50.05	54.91	44.34
3	78.50	83.78	73.49
4	45.98	51.27	39.86

Posición	Amplitud (N)	Frecuencia (s)	C_d
1	13.98	1.89	0.7343
2	10.57	1.90	0.3511
3	10.29	1.91	0.5507
4	11.41	1.89	0.3226

Tabla 4.2: Resultados de la fuerza de resistencia del estudio hidrodinámico con CFD en piscina sin oleaje.

Tras observar los resultados obtenidos para este estudio, es fácilmente distinguible que la posición 1 es la que produce una fuerza de resistencia (*Drag*) más elevada, seguida por la posición 3. Esto es debido a que en estas posiciones el nadador tiene un brazo completamente sumergido y en una posición transversal a la dirección del flujo, generando una mayor superficie con la que se enfrenta el fluido y, por ende, una mayor resistencia. En cambio, en las otras dos posiciones (2 y 4), que se corresponden con las fases de entrada y salida de la mano al agua, el nadador presenta el brazo prácticamente alineado con el cuerpo, por lo que su superficie frontal se reduce enormemente en comparación con las otras dos posiciones anteriores,

resultando, como se aprecia de forma clara en la Figura 4.1, que presentan valores similares.

Por otro lado, destacar que los valores se estabilizan en un período corto de entre 2 y 3 segundos aproximadamente, y los valores obtenidos no presentan irregularidades, siguiendo en las 4 posiciones la tendencia oscilante propia de casos transitorios como éste. Además, todas presentan una amplitud y una frecuencia similares, dando a entender que los resultados obtenidos son fiables.

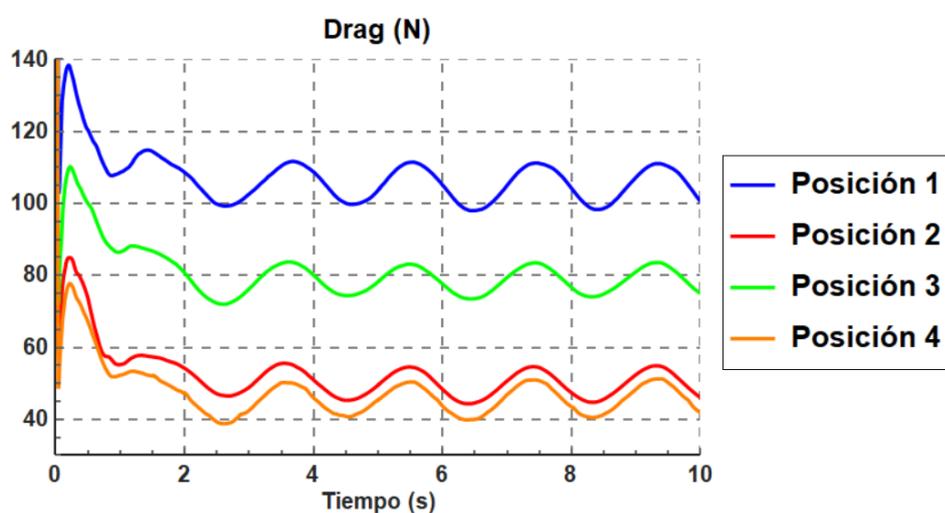


Figura 4.1: Representación de los resultados de la fuerza de resistencia del estudio en piscina sin oleaje para las diferentes posiciones.

En lo referente a los resultados obtenidos para la fuerza de sustentación (*Lift*) observados en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.2, también presentan la misma tendencia que los calculados para la de resistencia, con una frecuencia similar de 2 segundos aproximadamente, aunque una amplitud con unos valores alrededor del doble. Resulta curioso que las posiciones 1 y 2 presenten unos valores de sustentación similares, cuando son dos posiciones que presentan diferentes superficie frontal. El motivo de este hecho, puesto que sus valores son más bajos en comparación a las otras dos posiciones, sea debido en la primera posición a la gran superficie frontal que genera el brazo sumergido, y para el caso de la posición 2, que haya un brazo fuera del agua, por lo que no contribuye a generar ninguna fuerza. Por otro lado, la mayor sustentación es generada cuando el nadador se encuentra en la posición 3, hecho que parece lógico pensarlo si se analiza el recorrido de la brazada que realiza un nadador, pues es en ese momento de la propulsión donde el nadador genera la mayor parte de la fuerza de flotación para mantenerse en la

superficie y no hundirse.

Posición	Lift medio (N)	Lift máximo (N)	Lift mínimo (N)
1	558.03	571.31	546.25
2	553.20	563.47	544.29
3	611.05	622.59	601.59
4	595.26	607.70	584.48

Posición	Amplitud (N)	Frecuencia (s)	C_l
1	25.07	1.90	3.9151
2	19.18	1.90	3.8811
3	21.00	1.89	4.2870
4	23.22	1.92	4.1762

Tabla 4.3: Resultados de la fuerza de sustentación del estudio hidrodinámico con CFD en piscina sin oleaje.

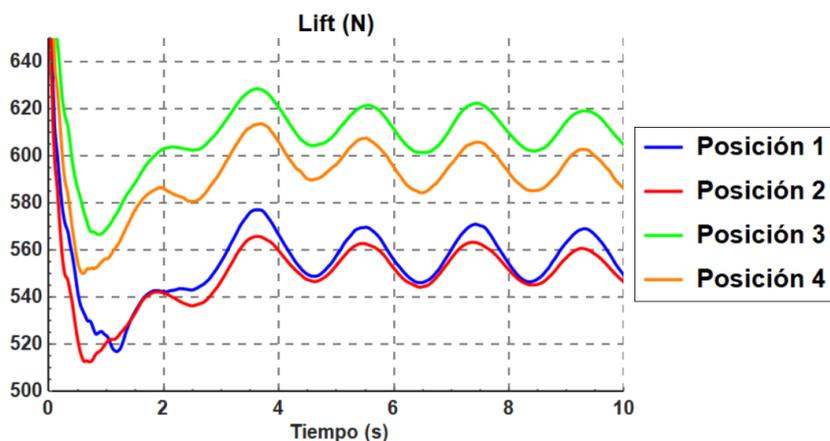


Figura 4.2: Representación de los resultados de la fuerza de sustentación del estudio en piscina sin oleaje para las diferentes posiciones.

Para poder confirmar la veracidad y validez de estos resultados para la fuerza de sustentación, se ha indagado con el fin de encontrar estudios similares realizados con CFD y nadadores donde obtuvieran las fuerzas de sustentación, pero no se ha llegado a encontrar, puesto que todos los estudios existentes hasta el momento se centran en analizar las fuerzas de arrastre. A pesar de ello, no existen datos anómalos que puedan indicar presencia de errores en los mismos.

4.2.2. Resultados del estudio en mar con oleaje

En este apartado se muestran los valores obtenidos para las fuerzas de resistencia y sustentación en el estudio realizado en el que se simulaba el oleaje del mar de la costa valenciana en las 4 posiciones ya comentadas (Tablas 4.4 y 4.5) . Además, se grafican también dichos resultados para una mayor visualización de los mismos (Figuras 4.3 y 4.4).

Posición	Drag medio (N)	Drag máximo (N)	Drag mínimo (N)
1	106.42	150.47	57.63
2	56.86	87.71	22.51
3	90.54	137.19	58.40
4	47.63	87.01	14.83

Posición	Amplitud (N)	Frecuencia (s)	C_d
1	92.84	4.13	0.7466
2	65.20	4.15	0.3989
3	78.79	4.19	0.6352
4	72.18	4.21	0.3342

Tabla 4.4: Resultados de la fuerza de resistencia del estudio hidrodinámico con CFD en mar con oleaje.

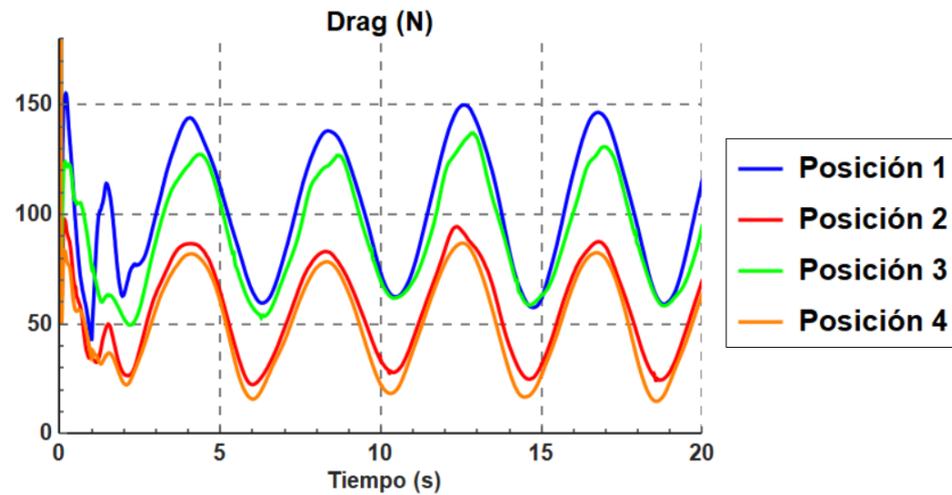


Figura 4.3: Representación de los resultados de la fuerza de resistencia del estudio en mar con oleaje para las diferentes posiciones.

Observando los valores de fuerza de resistencia obtenidos en este estudio, se aprecia una similitud entre las posiciones 1 y 3 y también entre la 2 y

4, hecho que en el estudio anterior no era tan destacado. Esto es debido principalmente a que unas tienen un brazo sumergido en el agua que aumenta la superficie frontal, y en las otras este brazo se encuentra alineado con el cuerpo. Por otro lado, se aprecia un ligero aumento de los valores medios con respecto al estudio en piscina, siendo más notable este aumento en las posiciones 2 y 3 (entre un 14 y 15% aproximadamente), mientras que en la posición 1 y 3 este aumento es menos acentuado (siendo del 2 y 4% respectivamente). Este aumento de los valores medios se debe a la aparición de las olas, las cuales llegan a cubrir al nadador cuando la ola alcanza al mismo, produciéndose un pico en los valores, el cual se corresponde con el momento en el que la ola aparece. Este hecho es observable en la Figura 4.3, donde los picos máximos tienen una frecuencia que se corresponde con la frecuencia establecida para las olas (4.2 segundos). Es por ello también que la amplitud de los valores registrados es mucho más elevada que cuando había olas, ya que en este estudio el nadador tenía ciertos grados de libertad (cabeceo y movimiento vertical) que le permitían moverse libremente con el oleaje, resultando que en ocasiones estuviera hundido la mayor parte del cuerpo y que en otras no. Los coeficientes de resistencia son similares a los del estudio anterior pero también presentan ese ligero aumento experimentado por la presencia de las olas. También cabe comentar que las curvas obtenidas no son tan limpias y homogéneas como las del estudio anterior, hecho que puede observarse en los picos máximos de la Figura 4.3, donde la presencia del oleaje provoca cierta discontinuidad.

Posición	Lift medio (N)	Lift máximo (N)	Lift mínimo (N)
1	561.82	580.92	537.75
2	554.44	571.99	531.77
3	612.12	634.48	579.59
4	596.11	613.23	574.06

Posición	Amplitud (N)	Frecuencia (s)	C_l
1	43.17	4.17	3.9416
2	40.22	4.08	3.8898
3	54.90	4.24	4.2945
4	39.17	4.22	4.1822

Tabla 4.5: Resultados de la fuerza de sustentación del estudio hidrodinámico con CFD en mar con oleaje.

En lo referente a los resultados de la fuerza de sustentación para este estudio, la presencia de las olas genera ciertos picos anómalos observables en la Figura 4.4. Aún así, los valores obtenidos no experimentan prácticamente ningún aumento en comparación con el estudio anterior, aunque sí se mo-

difica su período, como ocurría con la fuerza de resistencia, sincronizándose con el paso de las olas (4.2 segundos). Además, ocurre lo mismo que en el estudio en piscina, donde las posiciones 1 y 2 presentan valores similares y menores que la 3 y 4.

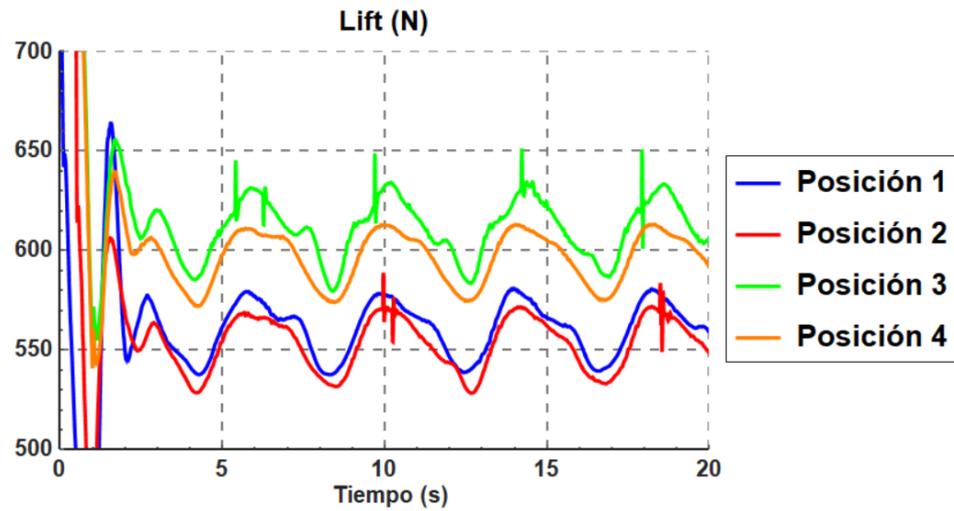


Figura 4.4: Representación de los resultados de la fuerza de sustentación del estudio en mar con oleaje para las diferentes posiciones.

4.2.3. Resultados del estudio del efecto del cansancio

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos en el estudio realizado en el mar con oleaje para tres posiciones distintas para las piernas, donde se partía de una posición inicial seguida de otras dos en las que las piernas estaban hundidas 15 y 30° respecto a la horizontal, originando una mayor superficie frontal.

Posición	Drag medio (N)	Drag máximo (N)	Drag mínimo (N)
1	106.42	150.47	57.63
2	125.10	187.54	68.71
3	137.16	186.84	88.16

Posición	Amplitud (N)	Frecuencia (s)	C_d
1	92.84	4.13	0.7466
2	118.83	4.20	0.8777
3	98.68	4.27	0.9623

Tabla 4.6: Resultados de la fuerza de resistencia del estudio hidrodinámico con CFD en mar con oleaje y diferentes posiciones para las piernas.

Los resultados obtenidos muestran claramente cómo aumenta el valor medio de la fuerza de resistencia en función de la posición de las piernas, ya que la superficie frontal con la que se encuentra el agua es mayor cada vez. Además se puede observar como la curva de resistencia es menos continua conforme se cambia la posición, ya que se generan más turbulencias en la zona posterior del cuerpo, provocando que la estela resultante no sea continua, como ocurre cuando las piernas están alineadas con el resto del cuerpo. Aún así, se sigue manteniendo el período de las curvas, coincidiendo con el de las olas, correspondiendo los picos máximos al momento en el que la ola alcanza al nadador. Por otro lado la amplitud de la posición 2 es mayor que las otras. Esto quizás sea debido a un error en la configuración del caso en el momento de introducir la fuerza Y de sustentación, provocando que los valores extremos sean más acentuados. Sin embargo, los datos registrados siguen la tendencia esperada.

Estos datos obtenidos, en los que el coeficiente de resistencia aumenta un 17% entre la posición 1 y la posición 2, servirán para alimentar el próximo estudio realizado de optimización energética.

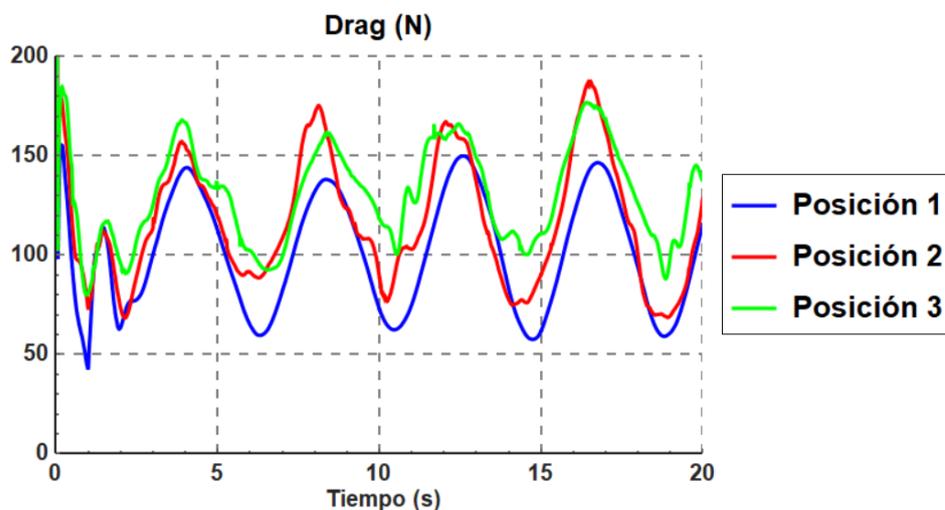


Figura 4.5: Representación de los resultados de la fuerza de resistencia del estudio en mar con oleaje para las diferentes posiciones de las piernas.

Los resultados obtenidos para la fuerza de sustentación en el presente estudio desvelan información similar al estudio anterior, donde la curva obtenida para aquellas posiciones menos limpias, es decir, con más superficie dentro del agua (Posición 2 y 3) generan diversas discontinuidades, además de un aumento en el valor medio entre la posición 1 y la 3. Es de destacar que se han obtenido el mismo valor prácticamente para la posición 1 y 2, siendo debido probablemente a que entre esas dos posiciones el hundimiento

de las piernas sea tal que provoque el mismo efecto de sustentación, aunque si haya un ligero aumento de la resistencia.

Posición	Lift medio (N)	Lift máximo (N)	Lift mínimo (N)
1	561.82	580.92	537.75
2	560.12	599.50	511.82
3	610.40	643.54	559.34

Posición	Amplitud (N)	Frecuencia (s)	C_l
1	43.17	4.17	3.9416
2	87.68	4.44	3.9297
3	84.20	4.42	4.2825

Tabla 4.7: Resultados de la fuerza de sustentación del estudio hidrodinámico con CFD en mar con oleaje y diferentes posiciones para las piernas.

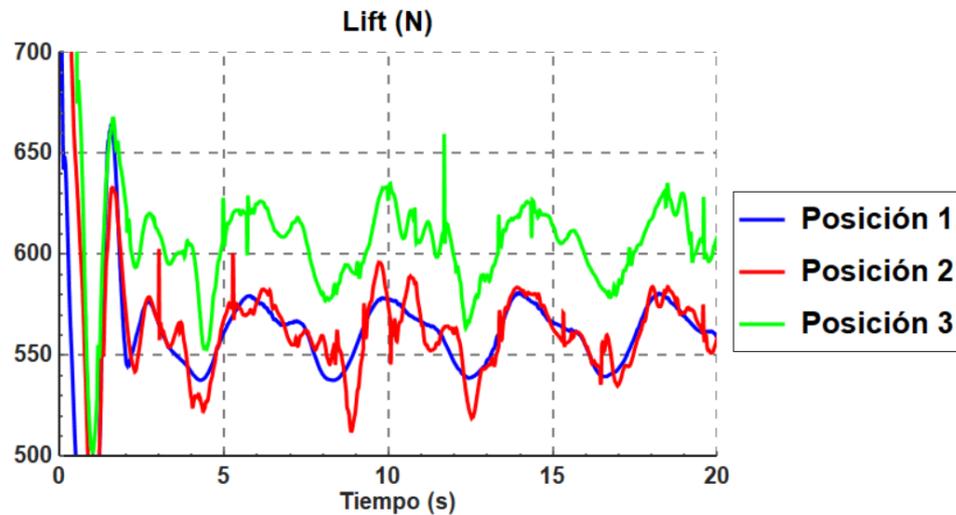


Figura 4.6: Representación de los resultados de la fuerza de sustentación del estudio en mar con oleaje para las diferentes posiciones de las piernas.

Los datos obtenidos para los 3 estudios han resultado satisfactorios, pues siguen tendencias similares a otros estudios realizados previamente por otros científicos como se comentó en el capítulo anterior, confirmando la validez de los mismos.

4.3. Optimización del consumo energético

Tras la ejecución del modelo con los parámetros descritos en el Capítulo 3 y los resultados de los coeficientes de resistencia (C_d) obtenidos del estudio CFD anterior, se presentarán los resultados en esta sección.

4.3.1. Resultados conjuntos

A continuación, se mostrará un gráfico donde se indica el tiempo que necesitaría el nadador para completar la distancia establecida de 750 metros en función de la velocidad de las corrientes, representado en la parte izquierda y cuyos valores van de 0 a 0.4 m/s , datos que se corresponden con las corrientes presentes en la costa de la provincia de Valencia; y también se indica en la parte inferior del gráfico el posible ángulo de las mismas, con un rango de 0° a 180° . Este gráfico sirve para tener una visión global y rápida acerca del tiempo estimado en función de la situación existente.

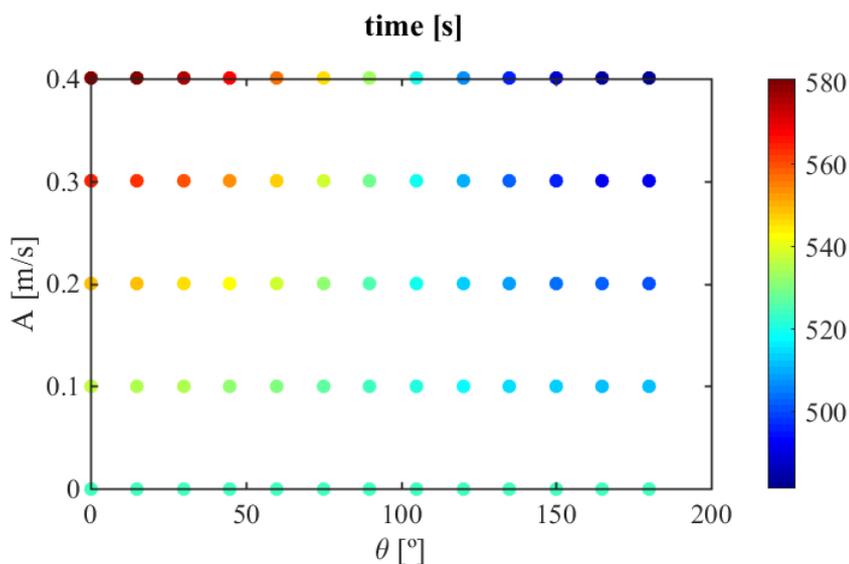


Figura 4.7: Gráfico donde se representa el tiempo en función del tipo de corriente.

Analizando la Figura 4.7 se pueden obtener gran cantidad de información. En primer lugar, se observa que el caso más desfavorable al que se puede encontrar el nadador ocurriría cuando la corriente lleva una velocidad de 0.4 m/s a 0° , es decir, se la encontraría de frente en el tramo 2 (el que realiza paralelo a la costa), dificultando enormemente su avance durante el mismo, y necesitando un tiempo de 580 s aproximadamente, es decir, unos 9 minutos y 30 segundos. Por el contrario, la situación más favorable se daría a esta misma velocidad de corriente pero cuando incide con un ángulo de

180°, es decir, la corriente actuaría en el mismo tramo que el caso anterior pero en el sentido de avance del nadador, provocando que en ese tramo el nadador aumente su velocidad notablemente hasta realizar la prueba en 480 s, es decir, un minuto y medio menos que antes.

Por otro lado, en el caso de que no existan corrientes durante el recorrido, el nadador lo haría en unos 520 s (8.5 minutos), que resulta de llevar una velocidad media de 1.5 m/s. Además, si la corriente tuviera una dirección de 90°, el nadador emplearía el mismo tiempo que si no hubieran corrientes. Esto es debido a que la corriente aparecería en el tramo inicial y el final, por lo que el efecto de velocidad que ganaría cuando la corriente fuera en el sentido de avance sería restado en el tramo en el que fuera en contra. Cabe destacar que posiblemente hubieran discrepancias si se realizara el estudio experimentalmente, debido a que en el tramo 2, aunque le venga de lado la corriente, el nadador tendría que hacer también algo de fuerza para evitar un posible desplazamiento lateral.

También resulta de interés destacar cómo aumenta el tiempo necesario para recorrer la distancia según aumenta la intensidad de la corriente para una incidencia entre 0° y 90°, debido fundamentalmente a que el efecto de la corriente que produce dicho aumento de tiempo es por la dirección en sentido contrario al del avance en el tramo 2, puesto que en el momento en el que la corriente se encuentra entre valores de 90° y 180°, el tiempo va disminuyendo conforme aumenta la intensidad de la corriente, ya que en este rango de ángulos la corriente va en el sentido favorable del tramo 2. El efecto que se produce en los otros dos tramos es nulo, pues ocurre lo mismo que para 90°, el avance producido en un tramo es compensado con el retraso en el otro tramo. Este efecto es reconocible en la Figura 4.7, pues si se observan los diferentes valores para una misma intensidad de corriente, el tiempo se va reduciendo conforme el ángulo aumenta, debido a lo expuesto anteriormente.

4.3.2. Análisis de casos

En esta sección se analizará la velocidad que debería adoptar el nadador en cada tramo, así como la potencia que generaría en cada instante para mantener esa velocidad y el tiempo total del recorrido en función de la corriente incidente en esa situación. Cabe recordar que se ha incluido el efecto que produciría el cansancio tras el avance en la prueba mediante una corrección del coeficiente de resistencia correspondiente con el hundimiento de las piernas. Dicho incremento se ha modelado mediante los resultados obtenidos en el estudio hidrodinámico con CFD, resultando en un incremento total del 17 % cuando el nadador ha consumido toda su energía. Además, el nadador acabará con un 5 % de la energía máxima disponible para así poder

llegar a meta. Por otro lado, los valores de potencia y energía máximos elegidos son 140 W y 490 kJ , obtenidos del estudio de Zamparo et al. (2005) para un nadador de alto nivel.

Para estudiar el efecto que la corriente provoca en estos parámetros, se representará la situación en la que no existe corriente, es decir, sin perturbaciones, junto a la corriente que existía el día en el que se realizó el Triatlón Sprint de Valencia ($A = 0.2\text{ m/s}$ y $\theta = 60^\circ$) para los diferentes parámetros de interés.

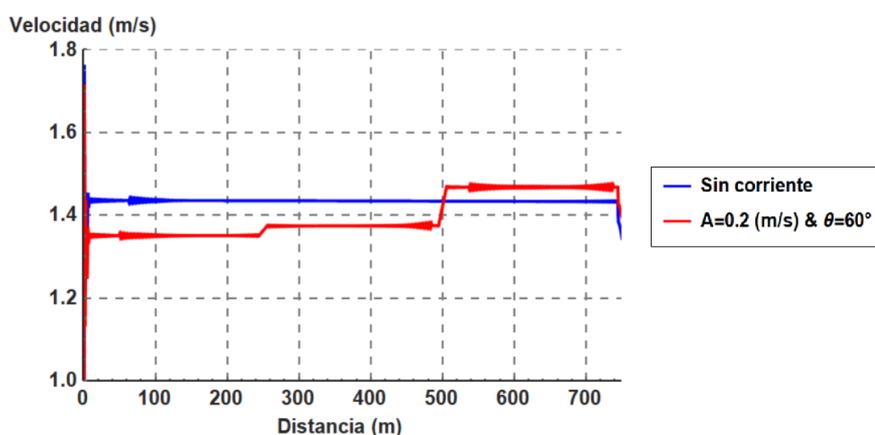


Figura 4.8: Representación de la velocidad que llevaría el nadador en función de la distancia recorrida sin corriente y para $A = 0.2\text{ m/s}$ y $\theta = 60^\circ$.

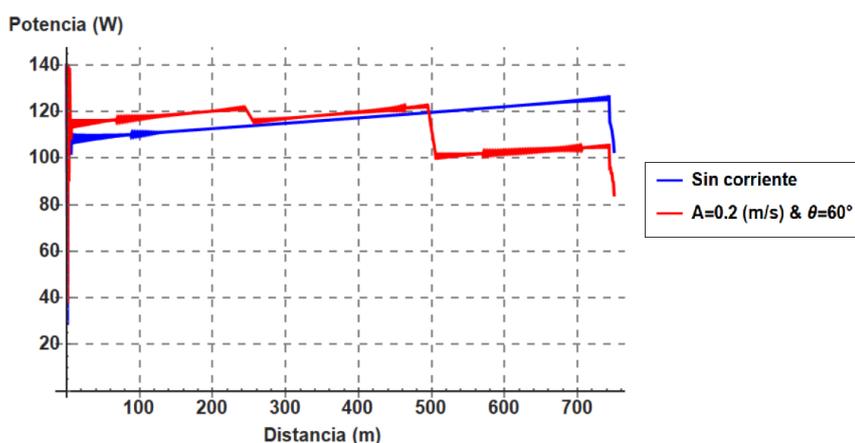


Figura 4.9: Representación de la potencia desarrollada en función de la distancia recorrida sin corriente y para $A = 0.2\text{ m/s}$ y $\theta = 60^\circ$.

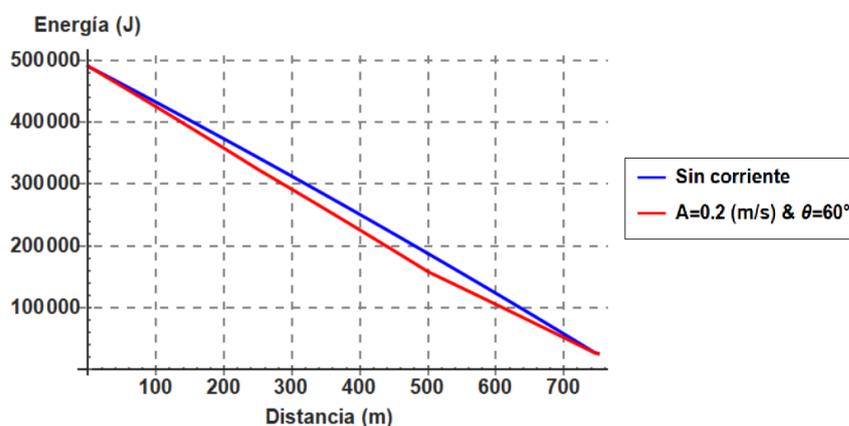


Figura 4.10: Representación de la energía disponible en función de la distancia recorrida sin corriente y para $A = 0.2\text{m/s}$ y $\theta = 60^\circ$.

Tramo	E (kJ)	P (W)	v (m/s)	Tiempo (s)
1	148.1	110.8	1.43	174.56
2	155.5	116.8	1.43	174.26
3	163.1	122.4	1.43	174.53
Total	466.7	116.6	1.43	523.35

Tabla 4.8: Valor de los parámetros en cada tramo del recorrido para una situación sin corriente.

Tramo	E (kJ)	P (W)	v (m/s)	Tiempo (s)
1	167.3	118.0	1.35	185.48
2	165.7	119.2	1.37	181.89
3	133.7	102.7	1.47	170.43
Total	466.7	113.3	1.40	537.80

Tabla 4.9: Valor de los parámetros en cada tramo del recorrido para una corriente de $A = 0.2\text{m/s}$ y $\theta = 60^\circ$.

Tras el análisis de las gráficas representadas en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 y de las Tablas 4.8 y 4.9, donde se muestran los valores medios de cada tramo y del recorrido total de la potencia desarrollada y la velocidad, además de la energía consumida en cada tramo y el tiempo, comparando los dos casos presentados, se observan diversos efectos.

En primer lugar, se observa claramente que el tiempo que el nadador ne-

cesita para concluir el trayecto es mayor cuando existen corrientes. Además, en los dos primeros tramos el efecto de la corriente es negativo, por lo que la velocidad se ve disminuida en comparación con el caso donde no hay corriente. Por el contrario, cuando esta corriente va en el sentido del avance del nadador, es decir, en el último tramo, la velocidad sí que es superior al caso sin corriente, recorriendo ese tramo en un tiempo menor que si no hubiera corriente.

Por otro lado, el nadador sin corriente lleva un ritmo constante de 1.43 m/s a costa de mantener un esfuerzo cada vez mayor, es decir, en cada tramo la potencia que desarrolle aumentará progresivamente, como se refleja en la Tabla 4.8. En cambio, el nadador que se ve afectado por la corriente debe aplicar una potencia mayor a pesar de que su velocidad es baja, para contrarrestar así el efecto negativo de la corriente. Pero al final, con poca potencia aplicada, es capaz de ir a una velocidad elevada gracias a la corriente. Esta diferencia de esfuerzo también se ve reflejada en el consumo de energía de la Figura 4.10 y Tabla 4.9.

Además, en ambos casos se ve como a medida que el nadador se cansa, es decir, las piernas se le van hundiendo y por consiguiente, aumentado el coeficiente de resistencia, el esfuerzo (potencia) que tiene que realizar para mantener la velocidad constante en cada es mayor.

También es posible apreciar que al finalizar el trayecto ambos nadadores están igual de cansados, es decir, han llegado a consumir toda la energía que tenían disponible al inicio, hasta quedar un 5% (24.6 kJ).

4.3.3. Comparación con otros nadadores

Resulta de interés analizar cómo cambian los resultados si se introducen unas características pertenecientes a un nadador distinto. Para ello, se analizarán diferentes casos donde se mantendrán las mismas dimensiones del nadador pero se irá variando la energía máxima disponible y la potencia que es capaz de generar, tomando como referencia el nadador anteriormente mostrado.

Para poder trabajar con órdenes de magnitud certeros, se emplearon los valores para la potencia máxima que el nadador es capaz de desarrollar que fueron calculados en diferentes estudios realizados por otros investigadores, y que aparecen reflejados en el artículo de Dominguez-Castells and Arellano (2011). Dichos valores se recogen en la Tabla 4.10.

Cabe destacar que los valores de la energía máxima se han calculado de

manera proporcional a la potencia, tomando como referencia los valores que aparecían en el estudio de Zamparo et al. (2005). Además, en dicha tabla también se presenta el tiempo que tardaría el nadador en abordar el trayecto para unas condiciones de corriente con una intensidad de 0.2 m/s y una incidencia de 60° . Estos datos de corriente se corresponden con los que había el día 13 de mayo de 2017 en Valencia, fecha en la cual se realizó el Triatlón Sprint de Valencia y cuyos resultados serán analizados más adelante, donde se compararán con los obtenidos con el modelo.

Autor	P	E	Tiempo
Shionoya et al. (1999)	51 <i>W</i>	167 <i>kJ</i>	945.24 <i>s</i>
Costill et al. (1986)	55 <i>W</i>	180 <i>kJ</i>	908.32 <i>s</i>
Dominguez-Castells and Arellano (2011)	66 <i>W</i>	217 <i>kJ</i>	822.84 <i>s</i>
Saijoh et al. (2008)	86 <i>W</i>	280 <i>kJ</i>	719.85 <i>s</i>
Toussaint et al. (2004)	97 <i>W</i>	318 <i>kJ</i>	673.62 <i>s</i>
Shimonagata et al. (2002)	101 <i>W</i>	329 <i>kJ</i>	661.81 <i>s</i>
Zamparo et al. (2005)	140 <i>W</i>	490 <i>kJ</i>	537.80 <i>s</i>
Toussaint and Truijens (2006)	220 <i>W</i>	719 <i>kJ</i>	442.31 <i>s</i>

Tabla 4.10: Capacidades energéticas extraídas de otros estudios.

Del análisis de la Tabla 4.10 se puede comprobar como tras empeorar las capacidades energéticas del nadador, este necesita más tiempo para recorrer la prueba. A la vista de estos resultados obtenidos, resulta necesario compararlos con datos experimentales. Para ello, se decidió tomar como referencia los tiempos que se registraron en el tramo de natación en el Triatlón Sprint de Valencia en mayo de 2017. Estos tiempos se han graficado en el histograma de la Figura 4.11, donde se puede ver que la mayoría de participantes realizaron el recorrido de natación entre 1000 y 1200 segundos, es decir, tardaron entre 16 y 20 minutos.

El día que se realizó dicho triatlón existía una corriente de 0.2 m/s con una incidencia de 60° aproximadamente. Por tanto, si se comparan con los resultados para esta corriente determinada con los realizados con los parámetros energéticos de este estudio para el que se obtuvo un tiempo de 538 *s*, se quedaría fuera del intervalo de tiempos del triatlón. Pero si se sitúan los distintos resultados obtenidos para los valores de potencia de los autores de la Tabla 4.10, como el de Shimonagata et al. (2002), se correspondería con los resultados de los más rápidos del triatlón. Además, si dicha potencia se reduce en un 70 %, es decir, a la potencia empleado por Shionoya et al. (1999), el tiempo final que se obtiene se corresponde con el de la media de los participantes.

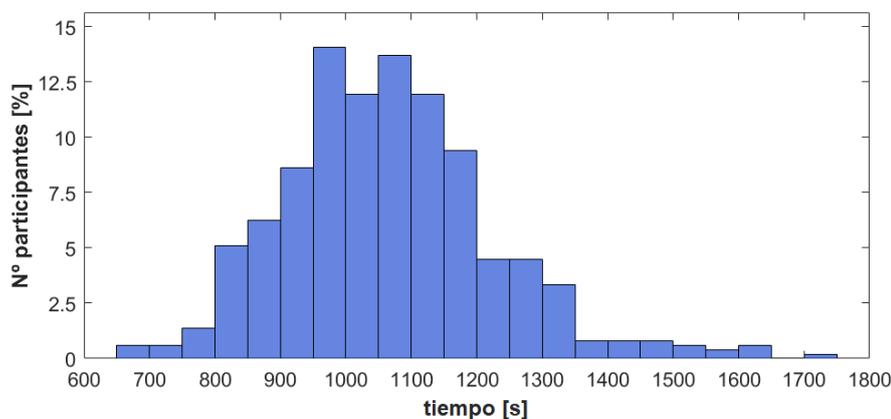


Figura 4.11: Resultados en la prueba de natación del triatlón sprint de Valencia de mayo de 2017.

Aún así, esta diferencia de tiempos observada entre los resultados del presente estudio y los del triatlón puede ser debida a diferentes motivos. En primer lugar, y el más evidente, es que en las pruebas de triatlón la natación es la primera disciplina, por lo que los deportistas no agotan toda su energía en esta primera parte de la prueba, reservando cierta cantidad para las disciplinas de ciclismo y carrera, donde las distancias son mayores. Además, los resultados que se tomaron como referencia se corresponden con un triatlón popular, donde la mayoría de participantes son amateurs, y no deportistas de alto nivel. Es necesario comentar este punto puesto que los parámetros introducidos en el modelado del nadador se corresponden con nadadores de alto nivel con unas capacidades técnicas superiores a la mayoría de los participantes de este triatlón.

Aún así, se toman como satisfactorios los resultados obtenidos, puesto que, a pesar de ciertas limitaciones, es una primera aproximación a un modelo optimizador que todavía no se ha desarrollado en este deporte y que puede aportar grandes avances futuros con correcciones y mejoras.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos Futuros

Contenidos:

5.1. Introducción	70
5.2. Resumen del trabajo realizado	70
5.2.1. Estudio hidrodinámico con CFD	70
5.2.2. Optimizador energético	72
5.2.3. Conclusiones	72
5.3. Trabajos futuros	73

5.1. Introducción

Durante el presente trabajo se han intentado alcanzar los dos principales objetivos, los cuales llevaron a una división del trabajo en dos partes claramente diferenciables en función del objetivo a cumplir.

El primero pretendía estudiar y analizar las diferentes fuerzas que aparecían en el nado, para lo que se emplearon varios programas con el fin de simular con la mayor exactitud y veracidad posible las condiciones que se presentan en un entorno acuático, tanto en piscina como en mar.

El otro objetivo se centraba en la búsqueda de la forma más eficiente energéticamente de realizar una prueba establecida en el mar, para lo que se analizaron varias combinaciones en las que contribuían diversos parámetros, algunos de los cuales eran resultados del primer estudio realizado. En este trabajo se presenta todo el proceso de configuración realizado para la obtención de unos resultados que han sido expuestos, los cuales también han servido para comprobar la eficacia de los métodos empleados.

Otros estudios anteriores similares sólo analizaban las fuerzas de resistencia cuando el nadador se encontraba con los brazos estirados y por debajo de la superficie. En cambio, en este trabajo se ha colocado al nadador en diferentes posiciones para estudiar el efecto de la posición de los brazos y, además, se ha realizado al nivel de la superficie para dotar de más veracidad al modelo. Sumado a ello, se han calculado las fuerzas de sustentación que aparecen, aunque no se ha encontrado ningún estudio anterior que estudiara dicha fuerza.

En este capítulo se mostrarán las conclusiones derivadas del análisis de los resultados obtenidos para los estudios realizados, así como las limitaciones surgidas y un resumen de posibles trabajos futuros.

5.2. Resumen del trabajo realizado

5.2.1. Estudio hidrodinámico con CFD

Para la realización del estudio hidrodinámico, fue necesario crear el diseño y la geometría del nadador con el que se iba a realizar dicho estudio. En este caso se eligió un ensamblaje obtenido de GRABCAD, el cual se colocó en las posiciones deseadas. Bien es cierto que el modelo elegido no era el que más se ajustaba a un nadador debido a las diferentes irregularidades presentes en el mismo en los ensamblajes de las articulaciones, además de que fue necesario colocarlo en posición horizontal para poder realizar las simulaciones.

Para la generación de la malla, fue necesario realizar un estudio de independencia previo para minimizar los tiempos de cálculo posteriores, de donde se obtuvo una cantidad de celdas de 1.5 millones. Para recrear la estela y las turbulencias, se empleó el modelo $k-\varepsilon$, que quedó validado con la comparación de otros estudios previos realizados con dicho modelo, además de que en la guía de tutoriales de STAR-CCM+ hacen uso del mismo modelo para simular un caso similar. Por otro lado, la velocidad establecida para el desplazamiento del nadador se obtuvo de la búsqueda en fuentes bibliográficas para nadadores de alto nivel.

Tras la ejecución del modelo y la obtención de resultados, se comprobó la validez del mismo, pues eran del mismo orden de magnitud que los estudios con los que se comparó (Machtsiras, 2013; Marinho et al., 2012). Con el desarrollo de la malla se encontraron ciertas limitaciones, principalmente en la gran cantidad de celdas necesarias, pero tras el estudio de independencia de malla, se consiguió obtener el tamaño óptimo de la misma que permitiera un tiempo de cálculo rápido con resultados satisfactorios. Además, dicha canti-

dad de celdas era similar al que se empleó en el estudio de Machtsiras (2013).

Por otro lado, el modelo de turbulencia empleado, tras un riguroso proceso de constatación, no dio ningún problema en el proceso de resolución, a pesar de que en el estudio anteriormente citado demostraba que el modelo de turbulencia LES obtenía más similitudes con resultados experimentales. Aún así, las posibles discrepancias en los resultados con estudios anteriores pueden ser debidas a factores como el modelo de nadador elegido, la configuración de la malla, las condiciones iniciales y de contorno establecidas, la colocación del nadador en la piscina o el modelo de turbulencia seleccionado. Con todo esto se pone de manifiesto la gran dificultad que supone la simulación de dicho problema en CFD, pero para el que cada vez se están consiguiendo mejores resultados.

Cabe destacar también que en un primer momento se intentó realizar el estudio en una configuración 2D para facilitar la configuración inicial. Pero tras numerosos intentos y pruebas, se llegó a la conclusión de que el estudio que se pretendía realizar no era posible simularlo en 2D debido a que el programa consideraría al nadador como un objeto infinitamente largo, impidiendo que el agua discurra por los laterales del mismo como ocurriría en la realidad. Por ello se decidió realizar todos los estudios en 3D, resultando finalmente satisfactorio todo el proceso y llegándose a alcanzar exitosamente el objetivo marcado.

5.2.2. Optimizador energético

En esta segunda parte del proyecto se buscaba desarrollar nuevas técnicas de entrenamiento basadas en el control del consumo energético que va realizando un nadador durante un determinado recorrido para la regulación de la velocidad que debería llevar, con el objetivo de realizar el recorrido estipulado en el menor tiempo posible. Cabe destacar que no se han llegado a encontrar estudios similares en nadadores, aunque sí para ciclistas o corredores. Es por ello que se planteaba un reto en conseguir modelar a un nadador para llevar a cabo este estudio. Para ello, se tomo como referencia el modelo propuesto por el estudio de Zamparo et al. (2005) donde se empleaba la analogía de la brazada con una pala de remo. Por tanto, una vez creado el modelo, se definieron los diferentes parámetros que lo configuraban, para los cuales se introdujeron datos del nadador con el que se hizo el estudio hidrodinámico anterior. Entre ellos, el más importante era el coeficiente de resistencia aerodinámico, para el que se realizó una función que hiciera incrementar su valor en función de la energía que le quedaba al nadador. Todos los datos referentes al consumo energético fueron obtenidos de fuentes bibliográficas (Zamparo et al., 2005).

Sumado a lo anterior, se decidió introducir perturbaciones en el recorrido, siendo éstas las corrientes marinas de la costa de Valencia. Tras recopilar los datos de páginas oficiales, se implementaron en el modelo. Dicho modelo realizaba la optimización energética para diferentes amplitudes y grados de incidencia de las corrientes.

Para la comprobación de los mismos se decidió comparar con resultados de campeonatos autonómicos de triatlón para el tramo de natación, y se observó que los tiempos obtenidos con el modelo planteado resultaban ser alrededor de 60 y 70 segundos menores que los realizados en la prueba de triatlón. Aún así, los resultados alcanzados son satisfactorios para ser una primera aproximación a un modelo todavía sin desarrollar para pruebas acuáticas.

5.2.3. Conclusiones

Tras haber abordado con éxito los diferentes estudios que se plantearon, para los cuales ha sido posible obtener resultados satisfactorios, y con ello cumpliéndose los objetivos inicialmente establecidos, se llega a la conclusión de la importancia actual del desarrollo de las técnicas científicas para la mejora en las diferentes disciplinas deportivas, en este caso la natación, para la cual se pone de manifiesto la importancia de la posición que el nadador adopta en el agua, pues como se ha visto a lo largo del presente trabajo, en función de la misma se pueden incrementar o reducir considerablemente las diferentes fuerzas que actúan en el deslizamiento por el medio acuático. Además, se ha comprobado que las pruebas en mar con presencia de oleaje añaden una dificultad más, ya que las fuerzas de resistencia que se han obtenido son mayores que las obtenidas en piscina. También se ha comprobado cómo afecta la superficie frontal del nadador al avance, hecho por el cual es necesario adoptar la posición más hidrodinámica posible, con el menor hundimiento de piernas posible para evitar el aumento de las fuerzas de arrastre.

En conclusión, se ha alcanzado la consecución de los objetivos establecidos, creando un proyecto que puede servir como base para la motivación y desarrollo de estos métodos con el fin de innovar y descubrir nuevas técnicas de nado y formas de entrenamiento. Además, este proyecto ha servido al autor para concluir con los estudios de Ingeniería Aeroespacial, así como para tener una primera toma de contacto con el mundo profesional tras la integración en un grupo de investigadores, sirviéndole para desarrollar capacidades de trabajo y aprender a trabajar y convivir en equipo, así como introducción al ámbito laboral.

5.3. Trabajos futuros

Para continuar ampliando el presente proyecto, se plantearán a continuación posibles mejores en diferentes aspectos, así como otros estudios que pueden resultar de interés.

- Creación de un modelo 3D de un nadador que calque la realidad del mismo, es decir, que sea una representación de un nadador real.
- Mejora de la malla del modelo CFD mediante la adición de más volúmenes de control en zonas donde la calidad de la misma es menor, como las manos.
- Creación de una malla dinámica que simule el movimiento del nadador, para así dotar de velocidad al mismo y dejar el agua y el aire en reposo para añadir más veracidad.
- Realizar de forma experimental los estudios propuestos para así poder constatar ambos resultados y obtener con certeza la precisión de los modelos.
- Realizar estudios que intenten cuantificar la resistencia activa, la resistencia debida al oleaje y la influencia de la profundidad respecto a la superficie del agua, además de estudiar la mejora experimentada tras el uso de bañadores de competición.
- Crear un modelo de corrientes que consiga implementar el efecto de aquellas que inciden de forma transversal al nadador.
- Sustituir el modelo energético del nadador por otro con mayor contenido fisiológico y por tanto más representativo de la realidad.

Documento II

Pliego de condiciones

Pliego de condiciones

1. Condiciones del puesto de trabajo

1.1. Introducción

Durante la realización del presente proyecto, el personal implicado en el desarrollo del mismo está expuesto a una serie de condiciones que pueden llegar a tener repercusiones en la salud del propio trabajador. Por ello es necesario seguir unas pautas de riesgos laborales para la prevención de cualquier situación que pueda poner en riesgo la salud del trabajador.

Este proyecto requiere de una gran cantidad horas enfrente de un monitor, por lo que se deberán regular las condiciones del puesto de trabajo para la prevención de cualquier riesgo que pudiera derivar del trabajo con Pantallas de Visualización de Datos (PVD) en referencia a la normativa que se recoge en el Real Decreto 488/1997 de España (1997), así como a la Guía Técnica que también lo acompaña elaborada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Cabe nombrar las definiciones que dicho decreto establece:

- *Pantalla de visualización*: una pantalla alfanumérica o gráfica, independientemente del método de representación visual utilizado.
- *Puesto de trabajo*: el constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona/máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato.
- *Trabajador*: cualquier trabajador que habitualmente y durante una parte relevante de su trabajo normal utilice un equipo con pantalla de visualización

Para la correcta determinación y prevención de los riesgos para la salud y seguridad de los trabajadores, será necesaria una evaluación de las carac-

terísticas propias del puesto de trabajo y de las exigencias de la tarea, para lo que se tendrá en cuenta:

- Tiempo que el trabajador utiliza el equipo.
- Tiempo máximo de atención a la pantalla que requiere la tarea.
- Exigencia de atención que requiera esa tarea.

1.2. Riesgos asociados al trabajo con pantallas de visualización

Los riesgos que pueden surgir en este tipo de puestos de trabajo son:

- Riesgo eléctrico.
- Higiene industrial.
 - Iluminación.
 - Ruido.
 - Condiciones termohigrométricas (temperatura y humedad).
- Ergonomía.
 - Trastornos musculoesqueléticos.
 - Problemas visuales.
 - Fatiga mental.

1.3. Condiciones de salud y seguridad

Para que la actividad en el puesto de trabajo puede desempeñarse sin exponerse a riesgos de salud y seguridad, el Real Decreto 486/1997 , recoge las medidas necesarias a adoptar por el empresario para que el uso de los lugares de trabajo no origine riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores o, si no fuera posible, para que tales riesgos se reduzcan al mínimo. Dichas medidas se exponen a continuación.

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. Para el presente pliego se supone que todas estas medidas ya fueron debidamente validadas durante el proceso de construcción de la instalación, donde se tuvo en cuenta su finalidad experimental y las características que ésta exige.

Medidas de protección contra incendios

Para la correcta implementación de las medidas de protección contra incendios, las instalaciones deber estar diseñadas, implantadas y mantenidas por empresas debidamente autorizadas por el organismo competente.

Instalación eléctrica

La instalación eléctrica deberá estar proyectada, puesta en funcionamiento y mantenida por una empresa autorizada por el Ministerio de Industria y Energía o por la Conserjería de Industria de la comunidad autónoma donde esté ubicado el centro de trabajo. Dicha instalación debe prever que, dado el uso que va a hacerse de la energía eléctrica, no se puedan originar contactos con las personas, incendios y/o explosiones, ateniéndose para ello a lo establecido sobre tensiones de seguridad en los cables conductores, sistemas de protección, etc., en los Reglamentos de Baja y Alta Tensión en vigor.

En lo referente a seguridad eléctrica, se establece lo siguiente para puestos de trabajo equipados con PVD:

- Garantizar el adecuado mantenimiento de los cables y conexiones eléctricas.
- Cumplir los requerimientos de la directiva sobre emisiones electromagnéticas, que exige que toda radiación electromagnética deberá reducirse a niveles insignificantes, desde el punto de vista de la protección, seguridad y salud de los trabajadores.
- Mantener separados los cables eléctricos de los telefónicos.
- Emplear longitudes de cable lo suficientes como para permitir futuros cambios, y al tiempo disponerlos de tal modo que su mantenimiento sea el correcto, es decir, fuera de superficies donde puedan ser pisados o sometidos a condiciones adversas.
- Facilitar el acceso y mantenimiento de los cables sin interrupción de la actividad laboral.

Condiciones termohigrométricas

La situación de bienestar o confort térmico es distinta para cada trabajador, si bien depende de factores como:

- Temperatura, humedad y velocidad del aire.
- Temperatura de paredes, suelos y objetos.

- Las actividades a desarrollar.
- La vestimenta.

El Real Decreto 188/1997 sobre puestos de trabajo con PVD establece las siguientes consideraciones a cumplir en estos puestos de trabajo:

- La temperatura operativa de confort debe mantenerse dentro de los siguientes rangos: de 23 a 26°C en verano, de 20 a 24°C en invierno y en ningún caso exceder los 26°C.
- En lo referente a la humedad, y con el fin de evitar efectos como la sequedad de ojos y mucosas, se debe establecer una humedad relativa del aire entre el 45 y 65 % para cualquier temperatura.

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.

En los puestos donde haya PVD debe existir una iluminación general. Además, si se utilizaran fuentes de iluminación individual complementaria, ésta no debe ser usada en las cercanías de la pantalla si produce deslumbramiento directo o reflexiones.

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. Además, se recomienda que la pantalla se coloque paralelamente a las ventanas, y nunca de frente o de espalda a ellas, ya que podrían originarse deslumbramientos. Estas medidas pueden ser complementadas mediante la utilización de cortinas o persianas que filtren la luz.

Ergonomía

Los riesgos presentados con anterioridad precisan de las medidas establecidas en el Real Decreto 488/1997 del 14 de Abril sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen

pantallas de visualización (PVD). El trabajo con dichas pantallas suele estar caracterizado por adoptar, por parte del trabajador, posturas estáticas prolongadas, cuyos efectos se pueden agravar si no se toman las medidas adecuadas mediante un correcto diseño del puesto de trabajo. Este diseño debe adaptarse a las condiciones anatómicas y fisiológicas de los usuarios. Además, el mobiliario y las superficies de trabajo deben carecer de esquinas y aristas agudas, el acabado debe tener aspecto mate para evitar reflejos y un tono preferiblemente neutro. Además, las superficies susceptibles a entrar en contacto con el usuario no deben ser buenas conductoras de calor, con el fin de evitar su transmisión a la piel del usuario.

A continuación se describen las recomendaciones a seguir para evitar riesgos de salud en el puesto de trabajo.

- **Asiento.** La altura del asiento debe ser regulable al rango necesario para la población de usuarios. El respaldo debe tener una suave prominencia para dar apoyo a la zona lumbar. Su altura e inclinación deben ser ajustables.
- **Mesa y espacio de trabajo.** La superficie de la mesa deberá ser poco reflectante, de dimensiones suficientes y que permita una colocación flexible de la pantalla, el teclado, los documentos y el material accesorio. El espacio deberá ser suficiente como para permitir a los trabajadores una posición cómoda.
- **Postura de referencia del usuario.** La postura recomendada a adoptar por el usuario es la siguiente:
 - Muslos horizontales y espinillas verticales.
 - Brazos verticales y antebrazos horizontales, formando ángulo recto desde el codo.
 - Manos relajadas, sin extensión ni desviación lateral, guardando al máximo la recta del antebrazo para evitar el síndrome del túnel carpiano. Se recomienda el uso de reposamanos.
 - Columna vertebral recta.
 - Planta del pie en ángulo recto con respecto a la pierna.
 - Línea de visión paralela al plano horizontal.
 - Línea de los hombros paralela al plano frontal, sin torsión del tronco.
 - Ángulo de la línea de visión menor de 60° bajo la horizontal.
- **Colocación de la pantalla.** La distancia de la pantalla a los ojos del usuario no debe ser menor de 40 *cm*, y la distancia óptima, desde

el punto de vista del confort visual, deber estar entre 45 y 75 *cm*. La pantalla debe colocarse de manera que su área útil pueda ser vista bajo ángulos comprendidos entre la línea de visión horizontal y la trazada a 60° bajo la horizontal. En el plano horizontal, la pantalla debe estar colocada dentro del ángulo de 120° del campo de visión del usuario.

- **Pantalla.** La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos u otras formas de inestabilidad. La pantalla deberá poder ser orientable e inclinable a voluntad del usuario.

- **Teclado.** El teclado deberá ser inclinado e independiente de la pantalla para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda, que no provoque cansancio en brazos y antebrazos. La altura de la tercera fila de letras no debe exceder 30 *mm* con respecto a la base de apoyo del teclado, y la inclinación de este debe estar comprendido entre 0 y 25° respecto a su plano horizontal.

- **Equipo de protección individual (EPI).** Se recomienda el uso de protectores de pantalla para proteger la vista del usuario, permitir una mayor claridad de contrastes y una mayor luminosidad de la pantalla y de sus contenidos.

Ruido

El Real Decreto 1316/1989 del 27 de Octubre acerca del ruido en los lugares de trabajo, establece que el empresario deberá evaluar la exposición de los trabajadores al ruido, con el objeto de determinar si se superan los límites establecidos en esta norma, para así poder aplicar las medidas procedentes en el origen, en el medio y en el receptor, y los reconocimientos médicos específicos para las personas expuestas al ruido con la periodicidad y características que indica el Real Decreto 1316/1989.

Normalmente, en los lugares donde se trabaja con PVD no suelen existir altos niveles sonoros, pero sí pueden existir ciertos ruidos que resulten molestos y puedan perturbar la atención de los usuarios de equipos informáticos. Para evitar dichos ruidos, se deben utilizar equipos con una mínima emisión sonora, y optimizar la acústica del lugar de trabajo. La directiva pertinente establece que para tareas complejas que requieran un cierto nivel de concentración por parte del usuario, el nivel sonoro continuo equivalente no debe exceder los 55 dB.

2. Condiciones de los recursos informáticos

2.1. Introducción

Para poder realizar la gran cantidad de simulaciones y cálculos llevados a cabo en este proyecto, se hace necesario el uso de recursos informáticos de altas prestaciones, los cuales pueden dividirse en *hardware* y *software*.

- **Hardware.** Son necesarias estaciones de trabajo con altas prestaciones para poder cumplir con las exigencias, referidas a la potencia de cálculo y memoria, de los cálculos llevados a cabo. Por ello, es necesario un continuo mantenimiento y revisión del equipo para asegurar el correcto funcionamiento del mismo.
- **Software.** Se han empleado diferentes programas informáticos para la realización de las diferentes tareas del proyecto, como programas de diseño (CAD), programas de simulación numérica y otros de cálculo teórico y de programación.

2.2. Condiciones del hardware

El hardware utilizado en este proyecto ha sido un equipo portátil ASUS N552VX, con las siguientes características:

- Modelo: ASUS N552VX.
- Procesador: Intel Core i7-6700HQ (2.6 GHz, 6 MB).
- Número de procesadores: 4.
- Memoria RAM: 16 GB DDR4.
- Tarjeta gráfica: Nvidia GeForce GTX 950M
- Almacenamiento: Disco duro 1TB (5400 rpm S-ATA) + 256 GB SSD
- Pantalla: 15.6" LED FullHD (16:9)
- Sistema operativo: Microsoft Windows 10 (64bits)

2.3. Condiciones del software

A continuación se muestran cada tipo de software empleado.

- Software CAD: SOLIDWORKS 2017.
- Software de simulación numérica: STAR-CCM+.
- Software de programación: Matlab.

Documento III

Presupuesto

Presupuesto

1. Introducción

En el presente documento se presenten cuantificar los costes totales necesarios para la completa realización del proyecto. Para ello se analizarán las horas dedicadas por el personal implicado además del coste de los materiales empleados para la consecución de todas las actividades llevadas a cabo que se describirán en la siguiente sección.

El presupuesto de este proyecto, al ser meramente informático, se contabilizará en horas dedicadas al mismo, además de los costes parciales de las licencias y de los recursos informáticos empleados.

La unidad que se empleará para contabilizar el esfuerzo del personal será la hora de trabajo y la unidad monetaria será euros por hora ($\text{€}/h$).

2. Actividades realizadas

A continuación se detallarán todas las actividades realizadas para la correcta finalización del presente proyecto.

1. **Búsqueda y tratamiento de información.** Recopilación y selección de la información necesaria para comenzar el proyecto, fundamentada principalmente en estudios previos similares.
2. **Diseño de la geometría y mallado.** Creación y colocación del dummy en las diferentes posiciones deseadas mediante el programa SOLIDWORKS que se emplearán posteriormente en los cálculos. Además, se crea la geometría y dominio en STAR-CCM+ y se elabora la malla, donde se incluye el estudio de independencia de malla.
3. **Configuración de los casos de estudio y cálculo.** Preparación del *Set Up* de los diferentes estudios a realizar y ejecución de los cálculos.

los deseados para cada estudio, incluyendo aquellos realizados para la validación del modelo. Destacar que esta es la actividad donde más tiempo se ha consumido.

4. **Postprocesado de los resultados CFD.** Recopilación de los resultados obtenidos en diferentes hojas Excell, así como la obtención de gráficas que resulten de interés e imágenes que aporten información y datos interesantes con su correspondiente análisis. Se incluye también la realización y edición de vídeos.
5. **Modelado del optimizador energético.** Manipulación y aprendizaje con el modelo presentado para realizar el estudio energético con Matlab.
6. **Configuración y cálculo del optimizador.** Introducción de los diferentes parámetros necesarios en el modelo y cálculo iterativo hasta encontrar la solución más eficiente para cada situación configurada.
7. **Análisis de los resultados del optimizador.** Tratamiento de la información obtenida del modelo, así como la preparación de los resultados en gráficos para su posterior inclusión en la memoria.
8. **Realización de la memoria.**

3. Recursos empleados

Dentro de esta sección, se distinguen dos grupos distintos de recursos, los humanos y los materiales.

Los recursos humanos que han sido necesarios para la realización del presente proyecto son:

- 1 Ingeniero Aeroespacial
- 2 Especialistas en CFD
- 1 Experto programador

Por otro lado, los recursos materiales necesarios han sido:

- 1 ordenador portátil
- Licencias de software
- 1 puesto de trabajo
- Materiales fungibles

4. Presupuestos parciales

4.1. Costes directos

Presupuestos de las actividades

En las tablas que se muestran a continuación se exponen los costes de cada una de las actividades anteriormente explicadas.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Importe
<i>Ingeniero Aeroespacial</i>	35 h	30 €/h	1,050 €
<i>Especialista en CFD 1</i>	15 h	40 €/h	600 €
<i>Especialista en CFD 2</i>	15 h	35 €/h	525 €
<i>Experto programador</i>	20 h	40 €/h	800 €
TOTAL:			2,975 €

Tabla 1: Presupuesto para la actividad de búsqueda y tratamiento de la información.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Importe
<i>Ingeniero Aeroespacial</i>	30 h	30 €/h	900 €
<i>Especialista en CFD 1</i>	25 h	40 €/h	1,000 €
<i>Especialista en CFD 2</i>	10 h	35 €/h	350 €
<i>Licencias de software</i>	100 h	0.7 €/h	70 €
TOTAL:			2,320 €

Tabla 2: Presupuesto para la actividad de diseño de la geometría y mallado

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Importe
<i>Ingeniero Aeroespacial</i>	100 h	30 €/h	3,000 €
<i>Especialista en CFD 1</i>	40 h	40 €/h	1,600 €
<i>Especialista en CFD 2</i>	20 h	35 €/h	700 €
<i>Licencias de software</i>	320 h	0.7 €/h	224 €
TOTAL:			5,524 €

Tabla 3: Presupuesto para la actividad de configuración y cálculo CFD.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Importe
<i>Ingeniero Aeroespacial</i>	55 h	30 €/h	1,650 €
<i>Especialista en CFD 1</i>	20 h	40 €/h	800 €
<i>Especialista en CFD 2</i>	10 h	35 €/h	350 €
<i>Licencias de software</i>	100 h	0.7 €/h	70 €
TOTAL:			2,870 €

Tabla 4: Presupuesto para la actividad de postprocesado de los resultados CFD.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Importe
<i>Ingeniero Aeroespacial</i>	20 h	30 €/h	600 €
<i>Experto programador</i>	45 h	40 €/h	1,800 €
<i>Licencias de software</i>	120 h	0.7 €/h	84 €
TOTAL:			2,484 €

Tabla 5: Presupuesto para la actividad de modelado del optimizador energético.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Importe
<i>Ingeniero Aeroespacial</i>	40 h	30 €/h	1,200 €
<i>Experto programador</i>	30 h	40 €/h	1,200 €
<i>Licencias de software</i>	100 h	0.7 €/h	70 €
TOTAL:			2,470 €

Tabla 6: Presupuesto para la actividad de configuración y cálculo del optimizador.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Importe
<i>Ingeniero Aeroespacial</i>	40 h	30 €/h	1,200 €
<i>Experto programador</i>	20 h	40 €/h	800 €
<i>Licencias de software</i>	100 h	0.7 €/h	70 €
TOTAL:			2,070 €

Tabla 7: Presupuesto para la actividad de análisis de los resultados del optimizador.

Concepto	Unidades	Coste Unitario	Importe
<i>Ingeniero Aeroespacial</i>	120 h	30 €/h	3,600 €
<i>Especialista en CFD 1</i>	15 h	40 €/h	600 €
<i>Especialista en CFD 2</i>	10 h	35 €/h	350 €
<i>Experto programador</i>	15 h	40 €/h	600 €
<i>Licencias de software</i>	150 h	0.4 €/h	60 €
TOTAL:			5,210 €

Tabla 8: Presupuesto para la realización de la memoria.

Costes globales de las actividades

En la Tabla 9 se presenta un resumen del coste total de todas las actividades, al cual hay que sumarle los impuestos (IVA).

Concepto	Importe
<i>Coste Búsqueda de información</i>	2,975.00 €
<i>Coste Geometría y Mallado</i>	2,320.00 €
<i>Coste Configuración y Cálculo</i>	5,524.00 €
<i>Coste Postprocesado CFD</i>	2,870.00 €
<i>Coste Modelado Optimizador</i>	2,484.00 €
<i>Coste Cálculo Optimizador</i>	2,470.00 €
<i>Coste Análisis de resultados</i>	2,070.00 €
<i>Coste Redacción de la Memoria</i>	5,210.00 €
Subtotal	25,923.00 €
IVA 21 %	5,443.83 €
TOTAL	31,366.83 €

Tabla 9: Presupuesto global de las actividades.

Presupuesto del equipo informático

Debido al alto valor que adquieren los equipos informáticos empleados para la realización del proyecto, es necesario incluirlos dentro del presupuesto del mismo. Para ello, se ha hecho uso de un ordenador portátil ASUS, con el que se han realizado todas las simulaciones requeridas, por lo que será necesario calcular el precio de la amortización del mismo, el cual viene detallado en la Tabla 10.

Concepto	Coste total	Período de amortización	Período amortizado	Coste de amortización
<i>Ordenador portátil</i>	1,150 €	2 años	1 año	575 €
TOTAL:				575 €

Tabla 10: Coste de amortización de los recursos informáticos.

Presupuesto global de los costes directos

Para conocer el valor de los costes directos del presente proyecto, se sumarán el presupuesto global de las actividades (IVA incluido) y el de los sistemas informáticos, quedando reflejados en la Tabla 11

Concepto	Importe
<i>Coste actividades</i>	31,366.83 €
<i>Costes de amortización</i>	575.00 €
<i>Materiales fungibles</i>	20.00 €
Total costes directos	31,961.83 €

Tabla 11: Presupuesto de los costes directos.

4.2. Costes indirectos

Además de todos los costes que se han presentado hasta ahora hay que añadir otro tipo de coste que cuantifica unos gastos que no tienen una influencia directa en el proyecto pero que resultan indispensables para la exitosa realización del mismo. Se les denomina costes indirectos y están relacionados con el consumo de electricidad y de agua, la climatización del lugar de trabajo, el personal administrativo, etc.

Para el actual proyecto estos costes representa un 3% del total de los costes directos (Tabla 12).

Concepto	Importe
<i>Costes directos totales</i>	31,961.83 €
<i>Porcentaje costes indirectos</i>	3%
Total costes indirectos	958.85 €

Tabla 12: Presupuesto de los costes indirectos.

4.3. Beneficio industrial

A continuación se muestra el beneficio industrial que ganaría el empresario con la realización del actual proyecto. Dicho beneficio se establece en un 7% de los costes directos anteriores (sin IVA). El valor del mismo queda reflejado en la Tabla 13.

Concepto	Importe
<i>Costes directos totales</i>	31,961.83 €
<i>Porcentaje beneficio industrial</i>	7%
Subtotal	2,237.33 €
IVA 21 %	469.84 €
Total beneficio industrial	2,707.17 €

Tabla 13: Presupuesto del beneficio industrial.

5. Presupuesto global del proyecto

En la siguiente tabla se muestran el presupuesto total del presente proyecto (IVA incluido), compuesto por todo lo descrito anteriormente.

Presupuesto global del proyecto	
Concepto	Importe
Presupuesto de los costes directos	31,961.83 €
Presupuesto de los costes indirectos	958.85 €
Presupuesto del beneficio industrial	2,237.33 €
TOTAL	35,627.85 €

Tabla 14: Presupuesto global del proyecto.

El presupuesto total del proyecto asciende a:

TREINTA Y CINCO MIL SEISCIENTOS VEINTISIETE EUROS
CON OCHENTA Y CINCO CÉNTIMOS #.

Bibliografía

- Barbosa, T. M., Bragada, J. A., Reis, V. M., Marinho, D. A., Carvalho, C., and Silva, A. J. (2010). Energetics and biomechanics as determining factors of swimming performance: updating the state of the art. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2):262–269.
- Bixler, B., Pease, D., and Fairhurst, F. (2007). The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer. *Sports Biomechanics*, 6(1):81–98.
- Clarys, J. (1979). Human morphology and hydrodynamics. *Swimming III*, 8:3–41.
- Costill, D., Rayfield, F., Kirwan, J., and Thomas, R. (1986). A computer based system for the measurement of force and power during front crawl swimming. *J Swim Res*, 2(1):16–9.
- Cureton, T. (1975). Factors governing success in competitive swimming: a brief review of related studies. *Swimming II*, pages 9–41.
- de España, J. d. E. (1997). Real decreto 488/1997, del 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización. *Boletín Oficial del Estado*, pages 12928–31.
- De Groot, G. and van Ingen Schenau, G. (1988). Fundamental mechanics applied to swimming: technique and propelling efficiency. *Swimming science V*, 18:17–30.
- de Koning, J. J., Bobbert, M. F., and Foster, C. (1999). Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2(3):266–277.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., and Carmeliet, J. (2010). Aerodynamic study of different cyclist positions: Cfd analysis and full-scale wind-tunnel tests. *Journal of biomechanics*, 43(7):1262–1268.

- Dominguez-Castells, R. and Arellano, R. (2011). Muscular and arm crawl stroke power: Evaluating their relationship. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*, volume 1.
- Gibo, T. (2005). Swimming: A dragging battle against the forces of physics. 7(2).
- Hendrix, C. R., Housh, T. J., Mielke, M., Zuniga, J. M., Camic, C. L., Johnson, G. O., and Schmidt, R. J. (2009). Critical torque, estimated time to exhaustion, and anaerobic work capacity from linear and non-linear mathematical models. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(12):2185–2190.
- Huijing, P., Toussaint, H., Mackay, R., Vervoorn, K., Clarys, J., and Hollander, A. (1988). Active drag related to body dimensions. *Swimming Science V*, pages 31–37.
- Keller, J. B. (1973). A theory of competitive running. *Physics today*, page 43.
- Kolmogorov, S. and Duplishcheva, O. (1992). Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *Journal of biomechanics*, 25(3):311–318.
- Lefton, J. and Malone, A. (2009). Anthropometric assessment. *ADA pocket guide to nutrition assessment, 2nd edition*. Chicago, IL: American Dietetic Association, pages 160–161.
- Lyttle, A. (2000). *Hydrodynamics of the human body during the freestyle tumble turn*. University of Western Australia.
- Lyttle, A., Benjanuvatra, N., Blanksby, B. A., and Elliott, B. C. (2000). Morphology and hydrodynamic resistance in young swimmers. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*, volume 1.
- Lyttle, A. D., Blanksby, B., Elliot, B., and Lloyd, D. G. (1998). The effect of depth and velocity on drag during the streamlined glide. *Journal of Swimming Research*, 13:15–22.
- Machtsiras, G. (2013). Utilizing flow characteristics to increase performance in swimming.
- Marinho, D. A., Mantha, V. R., Vilas-Boas, J. P., Ramos, R. J., Machado, L., Rouboa, A. I., and Silva, A. J. (2012). Effect of wearing a swimsuit on hydrodynamic drag of swimmer. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 55(6):851–856.
- Marinho, D. A., Reis, V. M., Alves, F. B., Vilas-Boas, J. P., Machado, L., Silva, A. J., and Rouboa, A. I. (2009). Hydrodynamic drag during gliding in swimming. *Journal of Applied Biomechanics*, 25(3):253–257.

- Martin, R. B., Yeater, R. A., and White, M. K. (1981). A simple analytical model for the crawl stroke. *Journal of biomechanics*, 14(8):539–548.
- Moria, H., Chowdhury, H., Alam, F., Subic, A., Smits, A. J., Jassim, R., and Bajaba, N. S. (2010). Contribution of swimsuits to swimmer’s performance. *Procedia Engineering*, 2(2):2505–2510.
- Morton, R., Fitz-Clarke, J., and Banister, E. (1990). Modeling human performance in running. *Journal of applied physiology*, 69(3):1171–1177.
- Oeffner, J. and Lauder, G. V. (2012). The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications. *Journal of Experimental Biology*, 215(5):785–795.
- Payton, C. J., Bartlett, R. M., Baltzopoulos, V., and Coombs, R. (1999). Upper extremity kinematics and body roll during preferred-side breathing and breath-holding front crawl swimming. *Journal of Sports Sciences*, 17(9):689–696.
- Pendergast, D., Mollendorf, J., CuvIELLO, R., and Termin, A. (2006). Application of theoretical principles to swimsuit drag reduction. *Sports Engineering*, 9(2):65–76.
- Popa, C., Zaidi, H., Arfaoui, A., Polidori, G., Taiar, R., and Fohanno, S. (2011). Analysis of wall shear stress around a competitive swimmer using 3d navier-stokes equations in cfd. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 13(1):3–11.
- Rouboa, A., Silva, A., Leal, L., Rocha, J., and Alves, F. (2006). The effect of swimmer’s hand/forearm acceleration on propulsive forces generation using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics*, 39(7):1239–1248.
- Rumyantsev, V. (1982). Biomechanics of sport swimming. *Central State in Institute of Physical Culture, Moscow*.
- Saijoh, T., Ohba, M., and Shionoya, A. (2008). Development of the multiple regression models for estimating the force in tethered swimming (ts) and the power in semi-tethered swimming (sts). In *Proceedings of the 1st International Scientific Conference of Aquatic Space Activities. Tsukuba, Japan: University of Tsukuba*, pages 340–345.
- Schlichting, H. and Gersten, K. (2000). *Boundary-Layer Theory (8th rev. & enl. ed.)*. London, Springer.
- Sharp, R., Hackney, A., Cain, S., and Ness, R. (1988). The effect of shaving body hair on the physiological cost of freestyle swimming. *Journal of Swimming Research*, 4(1):9–13.

- Sharp, R. L. and Costill, D. L. (1989). Influence of body hair removal on physiological responses during breaststroke swimming. *Medicine and science in sports and exercise*, 21(5):576–580.
- Shimonagata, S., Taguchi, M., and Miura, M. (2002). Effect of swimming power, swimming power endurance and dry-land power on 100m freestyle performance. *Chatard JC. Biomechanics and medicine in swimming IX. Saint-Etienne: University of Saint Etienne*, pages 391–6.
- Shionoya, A., Shibukura, T., Koizumi, M., Shimizu, T., Tachikawa, K., Hasegawa, M., and Miyake, H. (1999). Development of ergometer attachment for power and maximum anaerobic power measurement in swimming. *Applied Human Science*, 18:13–22.
- Toussaint, H. M., de Looze, M., Van Rossem, B., Leijdekkers, M., and Dignum, H. (1990). The effect of growth on drag in young swimmers. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6(1):18–28.
- Toussaint, H. M., Roos, P. E., and Kolmogorov, S. (2004). The determination of drag in front crawl swimming. *Journal of biomechanics*, 37(11):1655–1663.
- Toussaint, H. M. and Truijens, M. (2006). Power requirements for swimming a world-record 50-m front crawl. *International journal of sports physiology and performance*, 1(1):61–64.
- Toussaint, H. M., van Stralen, M., and Stevens, E. (2002). Wave drag in front crawl swimming. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*, volume 1.
- Toussaint, M. H. (2000). An alternative fluid dynamic explanation for propulsion in front crawl swimming. In *ISBS-Conference Proceedings Archive*, volume 1.
- Vennell, R., Pease, D., and Wilson, B. (2006). Wave drag on human swimmers. *Journal of biomechanics*, 39(4):664–671.
- Vilas-Boas, J. P., Costa, L., Fernandes, R. J., Ribeiro, J., Figueiredo, P., Marinho, D., Silva, A. J., Rouboa, A., and Machado, L. (2010). Determination of the drag coefficient during the first and second gliding positions of the breaststroke underwater stroke. *Journal of applied biomechanics*, 26(3):324–331.
- von Loebbecke, A., Mittal, R., Fish, F., and Mark, R. (2009). Propulsive efficiency of the underwater dolphin kick in humans. *Journal of Biomechanical Engineering*, 131(5):054504.
- Vorontsov, A. and Rumyantsev, V. (2000). Propulsive forces in swimming. *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention*, pages 205–231.

- Wilson, B. and Thorp, R. (2003). Active drag in swimming. *Biomechanics and medicine in swimming IX. Publications of Saint Etienne University, France*, pages 15–20.
- Zaidi, H., Fohanno, S., Taiar, R., and Polidori, G. (2010). Turbulence model choice for the calculation of drag forces when using the cfd method. *Journal of Biomechanics*, 43(3):405–411.
- Zamparo, P., Pendergast, D., Mollendorf, J., Termin, A., and Minetti, A. (2005). An energy balance of front crawl. *European journal of applied physiology*, 94(1-2):134–144.