



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



IUMPA  
Instituto Universitario de Matemática  
Pura y Aplicada

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO



Trabajo de Fin de Máster

---

## Estudio de las estructuras coherentes y su evolución temporal en canales turbulentos

---

**Autor:**

Francisco Noguero Rodríguez

**Titulación:**

Máster en Ingeniería Aeronáutica

---

**Tutor:** D. Sergio Hoyas Calvo

**Cotutor :** D. Lluís García Raffi

**Cotutor externo:** José Javier Aguilar Fuertes

Septiembre 2020



*La simplicidad es la máxima sofisticación.*

Leonardo Da Vinci



# Índice general

Índice general	III
<b>I. Memoria</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción al problema de la turbulencia</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción . . . . .	3
1.2. Antecedentes históricos . . . . .	4
1.2.1. Etapa pre-Kolmogorov . . . . .	4
1.2.2. Teoría de Kolmogorov . . . . .	5
1.2.3. Etapa de post-Kolmogorov . . . . .	7
1.3. Flujos de pared . . . . .	10
1.4. Definición de vórtice . . . . .	13
1.5. Objetivos del trabajo . . . . .	16
<b>2. Fundamentos del DNS</b>	<b>17</b>
2.1. Método pseudo-espectral de simulación DNS . . . . .	18
2.2. Dominio computacional . . . . .	20
2.3. Criterios de identificación de vórtices . . . . .	20
2.3.1. Método de Chong . . . . .	21
2.3.2. Método de los eventos Qs . . . . .	23
2.3.3. Estudio de percolación . . . . .	24
2.4. Energía de las estructuras coherentes y consideraciones finales . . . . .	26
<b>3. Herramientas computacionales desarrolladas</b>	<b>31</b>
3.1. Código de agregado de vórtices . . . . .	32
3.2. Código de seguimiento temporal . . . . .	33
3.2.1. Conexiones fáciles . . . . .	35
3.2.2. Conexiones difíciles . . . . .	35
3.2.3. Calibración . . . . .	37
3.3. Código de actualización de la estructura . . . . .	37
3.4. Memoria virtual . . . . .	39
<b>4. Estudio de la estática de las estructuras coherentes</b>	<b>41</b>
4.1. Clasificación de los objetos identificados . . . . .	42
4.2. Caracterización geométrica y posición de las estructuras ligadas a la pared . . . . .	44
4.2.1. Tamaño de la caja . . . . .	44
4.2.2. Forma de los objetos individuales . . . . .	48
4.2.3. Posición de las estructuras coherentes . . . . .	50
4.3. Relación entre los distintos tipos de objetos . . . . .	52
<b>5. Evolución temporal de las estructuras coherentes</b>	<b>55</b>
5.1. Introducción . . . . .	55
5.2. Clasificación estructuras coherentes . . . . .	57
5.3. Tamaño medio de los objetos identificados . . . . .	59

5.4. Evolución temporal . . . . .	62
5.4.1. Tiempo de vida de los vórtices . . . . .	62
5.4.2. Evolución posición de los objetos. Relación <i>sweeps-ejections</i> . . . . .	65
5.5. Velocidad de advección . . . . .	69
5.6. Cascada turbulenta a partir de las estructuras coherentes . . . . .	71
5.6.1. Introducción . . . . .	71
5.6.2. Cascadas directa e inversa de vórtices . . . . .	72
5.6.3. Posición relativa de los vórtices secundarios . . . . .	74
<b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>77</b>
6.1. Conclusiones del proyecto . . . . .	77
6.2. Trabajos futuros . . . . .	79
<b>II. Pliego de condiciones y presupuesto</b>	<b>81</b>
<b>7. Pliego de condiciones</b>	<b>83</b>
7.1. General . . . . .	83
7.2. Lugar de trabajo . . . . .	84
<b>8. Especificaciones técnicas</b>	<b>87</b>
8.1. Hardware . . . . .	87
8.2. Software . . . . .	88
<b>9. Presupuesto</b>	<b>89</b>
9.1. Introducción . . . . .	89
9.2. Costes parciales . . . . .	89
9.2.1. Recursos humanos . . . . .	89
9.2.2. Costes de equipos y software . . . . .	90
9.2.3. Presupuesto total del proyecto . . . . .	92
<b>Bibliografía</b>	<b>93</b>

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer la labor de los tutores para la elaboración de este proyecto, en especial a Sergio Hoyas, que me introdujo en el campo de la turbulencia, enseñó las bases de la computación paralela y supuso un constante apoyo para arrojar luz cuando todo parecía condenado a las sombras.

En segundo lugar, encomiar la labor de la familia para sacar adelante cualquier proyecto que he afrontado durante toda la carrera. Su importancia no sólo radica en posibilitar los medios necesarios para estudiar fuera del hogar, y afrontar todos los gastos que ello conlleva. Sino que va más allá: inculcarme la filosofía del trabajo duro y creer en mí mucho más de lo que yo he sido capaz.

Finalmente, agradecer el sustento anímico que han ofrecido los grandes amigos y compañeros de piso que he ido conociendo en estos 6 años. La carga de trabajo se tornaba más liviana siempre que se compartía con ellos. En especial, quiero mencionar a mi compañero de despacho José Carlos, quien tiene la mitad de culpa de que este trabajo esté finalizado. Él supone la prueba de que el trabajo en equipo es más que la suma de las partes. En general, todos ellos me han ayudado a disfrutar de un viaje que desafortunadamente aquí termina.



# Nomenclatura

## Letras griegas

$\alpha$	Umbral de percolación de Chong
$\alpha_{cr}$	Umbral de percolación de Chong crítico
$\Delta$	Incremento
$\delta$	Anchura del canal $2h$
$\Delta_t$	Paso temporal de muestreo
$\Delta_x$	Tamaño longitudinal de la caja envolvente al vórtice
$\Delta_y$	Tamaño perpendicular a la pared de la caja envolvente al vórtice
$\Delta_z$	Tamaño trasversal de la caja envolvente al vórtice
$\epsilon$	Disipación
$\eta$	Escala de longitud de Kolmogorov
$\kappa$	Constante de Karman
$\mu$	Viscosidad dinámica
$\nabla$	Operador nabla (gradiente o divergencia)
$\nu$	Viscosidad cinemática
$\Omega$	Vorticidad
$\omega$	Fluctuación de vorticidad
$\omega_y$	Vorticidad normal a la pared
$\phi$	Laplaciano de la velocidad normal $v$
$\rho$	Densidad
$\tau$	Esfuerzo tangencial de Reynolds
$\tau_w$	Esfuerzo tangencial de Reynolds en la pared
$\tau_\eta$	Escala de tiempo de Kolmogorov
$u_\eta$	Escala de velocidad de Kolmogorov

## Letras latinas

$\mathcal{L}$	Escala integral del problema
$CFL$	Número de Courant-Friedrichs-Lewy
$E$	Energía cinética
$h$	Semi-anchura del canal
$k$	Energía cinética turbulenta

$l$	Escala de las estructuras más grandes del problema
$l_x$	Tamaño longitudinal del dominio/caja media de un vórtice
$l_y$	Altura del dominio/caja media de un vórtice
$l_z$	Tamaño transversal del dominio/caja media de un vórtice
$m_x$	Discretización en x
$m_y$	Discretización en y
$m_z$	Discretización en z
$Re$	Número de Reynolds
$Re_b$	Número de Reynolds del problema (canal)
$Re_l$	Número de Reynolds de la escala $l$
$Re_\tau$	Número de Reynolds de fricción
$U$	Velocidad media del flujo
$u$	Fluctuaciones de velocidad longitudinal
$U_c$	Velocidad en la línea central del canal
$U_s$	Velocidad de advección
$u_\tau$	Velocidad de fricción
$V$	Volumen
$v$	Fluctuaciones de velocidad perpendicular a la pared
$V_{sd}$	Volumen de la cascada directa
$V_{si}$	Volumen de la cascada inversa
$w$	Fluctuaciones de velocidad transversal
$k$	Número de onda

**Superíndices y subíndices** [+]Referente a unidades de pared

# Resumen

El propósito de este Trabajo Final de Máster es la identificación espacial y el seguimiento temporal de estructuras o vórtices que presentan coherencia y autosemejanza desarrollados en canales turbulentos mediante una simulación DNS.

Partiendo de un programa LISO, que realiza la simulación y proporciona información de las variables del campo fluido, se han desarrollado algoritmos en Fortran para la identificación espacial y temporal de los mismos, y su almacenamiento en una gran estructura de datos extraída del programa mediante HDF5. Se han necesitado aplicar herramientas de paralelización para poder llevar a cabo el proyecto como OMP y MPI.

Los principales resultados analizados se centran en tres aspectos: la energía y esfuerzos de Reynolds presentes en estas estructuras respecto al total que evidencian el interés e importancia de su estudio; la morfología y posición de las mismas dentro del dominio y su volumen; e información respecto a la evolución de la vida de los vórtices mientras están en el canal, su velocidad de advección y su interacción con el resto de estructuras, tanto entre diferentes tipos de estructuras para determinar si hay una unidad coherente mayor que domine la turbulencia, como entre los objetos con la misma definición que se unen o separan formando una cascada de estructuras coherentes.

Asimismo, se estudian dos definiciones o criterios distintos que determinan dónde hay una región de vórtices en el dominio. Estas metodologías (que dependen de valores de umbral que han de ser determinados por percolación) definen estructuras que actualmente siguen siendo discutidas: los *vortex cluster* y los *uv clusters* (*sweeps* y *ejections*), que serán tratadas durante el trabajo.



# Abstract

The purpose of this Final Master's Thesis is the spatial identification and temporal tracking of the structures or vortex which present coherence and self-similarity and which are developed in turbulent channels by a DNS simulation.

From a LISO program, which runs the simulation and provides information on the variables of the fluid field, Fortran algorithms have been developed for spatial and temporal identification, and the resulting information has been stored in a large data structure (datatypes) extracted from the program using HDF5. It has been necessary to apply parallel tools to be able to carry out the project such as OMP and MPI.

The main results were analysed focusing on three aspects: the energy and the Reynolds stress  $uv$  present in these structures with respect to the total, what show the interest and the importance of this study; their morphology and position within the domain and their volume; and information regarding the evolution of the vortex timelife while they are in the channel, advection velocities and interactions among vortex, considering different types of structures to determine if there is a larger coherent unit that dominates the turbulence, or considering objects with the same definition joined or separated forming a cascade of coherent structures.

Besides we study two different definitions in vortex identification that determine where the vortex regions are within the problem domain. These methodologies (which depend on threshold values calculated by percolation) define structures that are still in discussion: vortex clusters and  $uv$  clusters (sweeps and ejections), which will be covered during the job.



# Resum

El propòsit d'aquest Treball Final de Màster és la identificació espacial i el seguiment temporal de les estructures o vòrtexs que presenten coherència i autosemblança desenvolupats en canals turbulents mitjançant una simulació DNS.

Partint d'un programa LISO, que realitza la simulació i proporciona informació de les variables del camp fluid, s'han desenvolupat algoritmes en Fortran per a la identificació espacial i temporal d'aquests, i el seu emmagatzematge en una gran estructura de dades extreta del programa mitjançant HDF5. S'han necessitat aplicar eines de paralització per a poder dur a terme el projecte com OMP i MPI.

Els principals resultats analitzats se centren en tres aspectes: l'energia i esforços de Reynolds presents en aquestes estructures respecte al total que evidencien l'interés i importància del seu estudi; la morfologia i posició de les mateixes dins del domini i el seu volum; i informació respecte a l'evolució de la vida dels vòrtexs mentre estan en el canal, la seua velocitat de advecció i la seua interacció amb la resta d'estructures, tant entre diferents tipus d'estructures per a determinar si hi ha una unitat coherent major que domine la turbulència, com entre els objectes amb la mateixa definició que s'uneixen o separen formant una cascada d'estructures coherents.

Així mateix, s'estudien dues definicions o criteris diferents que determinen on hi ha una regió de vòrtexs en el domini. Aquestes metodologies (que depenen de valors de llindar que han de ser determinat per percolació) defineixen estructures que actualment continuen sent discutides: els *vortex cluster* i els *uv clusters* (*sweeps* i *ejections*), que seran tractades durant el treball.

**Parte I.**  
**Memoria**



# 1

## Introducción al problema de la turbulencia

### Índice

---

<b>1.1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Antecedentes históricos</b>	<b>4</b>
1.2.1. Etapa pre-Kolmogorov	4
1.2.2. Teoría de Kolmogorov	5
1.2.3. Etapa de post-Kolmogorov	7
<b>1.3. Flujos de pared</b>	<b>10</b>
<b>1.4. Definición de vórtice</b>	<b>13</b>
<b>1.5. Objetivos del trabajo</b>	<b>16</b>

---

### 1.1. Introducción

Un flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y presión altamente irregulares en tiempo y espacio. Este tipo de flujos presenta alta difusividad y transferencia de masa y energía. Por lo tanto, se produce un movimiento del fluido que forma pequeñas estructuras rotacionales y tridimensionales que a lo largo del trabajo denominaremos como vórtices. Esta definición, aparentemente imprecisa, se desarrollará posteriormente proporcionando diversos criterios para determinar que es una estructura coherente del flujo o vórtice.

Asimismo, los flujos turbulentos son muy sensibles a las perturbaciones en las condiciones iniciales y de contorno. Por ello, pese a que los campos se rigen con ecuaciones deterministas presentan soluciones aleatorias. Este es el motivo por el que a lo largo de la historia su estudio ha sido abordado con herramientas estadísticas.

La importancia en el estudio de la turbulencia radica en su presencia en múltiples campos de la ingeniería, debido a su incremento de tasas de transferencia de momento, masa y calor. La mayoría de los flujos que se estudian en la totalidad de aplicaciones ingenieriles son turbulentos. Contrariamente, para considerar un flujo laminar se deben dar ciertas condiciones (escalas muy pequeñas o viscosidades muy altas) que limitan estos problemas al estudio de la lubricación. La turbulencia controla magnitudes como la resistencia aerodinámica o la transferencia de calor, abarcando aplicaciones como el cálculo de capas límites en vehículos

y tuberías o sistemas de ignición en motores. Asimismo, muchos fenómenos de la naturaleza también se explican a través de la turbulencia como son la meteorología y las corrientes oceánicas.

Una de las aplicaciones más importantes desde el punto de vista ingenieril son los flujos de pared y las capas límites turbulentas. Actualmente, un 25% de la energía usada en la industria se emplea en desplazar flujos a través de tuberías y canales, o en vehículos contra el aire o agua y un cuarto de esta se disipa por la turbulencia en las zonas próximas a la pared según Javier Jiménez [1].

En este trabajo, se estudian este tipo de flujos, intentando abordar la morfología y dinámica de estructuras coherentes que se forman en ellos y que tienen una importancia fundamental en el transporte de la energía.

La mayoría de los conceptos y teoría presentada en los apartados venideros ha sido tomada de [2].

## 1.2. Antecedentes históricos

### 1.2.1. Etapa pre-Kolmogorov

A lo largo de la historia los humanos se han interesado por el movimiento caótica de la turbulencia que observaban en múltiples fenómenos de la naturaleza. El término “turbolenza” fue acuñado en el siglo XVI por Leonardo Da Vinci, que fue el primero en realizar observaciones detalladas de los flujos turbulentos.

Sin embargo, no fue hasta la primera mitad del siglo XIX que comenzó el estudio científico de la misma. En 1845 Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes añaden los términos viscosos en la ecuación de Euler, formulando así las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones rigen el comportamiento de los flujos y son deterministas. Sin embargo, las soluciones que se obtienen pueden ser aleatorias (turbulentas), como es el caso del problema estudiado.

En 1839, G.H.L. Hagen señaló la existencia de dos regímenes diferentes en flujo viscoso. Midiendo la caída de presión en tuberías de latón obtuvo una expresión para modelar la misma. Sin embargo, a partir de cierto caudal no era válida y la caída de presión no era lineal con el caudal de la tubería. Posteriormente, otros ingenieros como Darcy y el propio Hagen, encontraron que las pérdidas de presión en tuberías tenían dos componentes: la primera variaba con la velocidad media del flujo  $U$  y era proporcional a la viscosidad cinemática del fluido; mientras que la segunda evolucionaba con  $U^2$  y era independiente de la viscosidad. Esto suponía una paradoja ya que la disipación se definía a partir de la viscosidad, y este hecho suponía que la disipación no se anulaba cuando la viscosidad tendía a cero.

En 1883, el ingeniero Osborne Reynolds publicó un experimento mediante un hilo de tinta, que observaba la existencia de los dos tipos de regímenes, predichos por Hagen. Este autor predijo la transición entre los dos regímenes para ciertos problemas (tubería) cuando el valor de cierto parámetro adimensional supera un umbral. Este se conoce como número de Reynolds por el investigador. A pesar de que tiene múltiples definiciones según el problema, la más genérica se muestra en la Ecuación 1.1

$$Re = \frac{Ul}{\nu} \quad (1.1)$$

También se deben a este científico los primeros intentos de resolver este problema con un enfoque estadístico descomponiendo las variables en una componente media y una desviación, obteniendo las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes. Sin embargo, aparecen nuevos términos conocidos como esfuerzos de Reynolds, que generan esfuerzos adicionales, pero no se pueden resolver con el número de ecuaciones disponibles (continuidad, energía, 3 de momento, 2 relaciones termodinámicas entre las variables de estado). Es decir, este camino produce más incógnitas. Esta dificultad se conoce como problema de cierre.

Muchos científicos e ingenieros propusieron múltiples modelos para resolver este problema. Entre ellos, Boussinesq propuso modelar este esfuerzo adicional con su analogía de la viscosidad turbulenta. Otros como Taylor y Karman, postularon relaciones entre este término y el gradiente de la velocidad media.

En 1904, Prandtl publicó un artículo en el que describía cómo el campo fluido puede dividirse en dos regiones: una capa delgada (capa límite) donde la viscosidad es importante, y una región exterior donde es despreciable. En 1914, demostró que la transición turbulenta también ocurre en la capa límite.

Al mismo tiempo, Richardson propuso una descripción multiescala de la turbulencia, donde la energía se inyecta al flujo a través de las escalas grandes o remolinos. Estas estructuras se rompen debido a fuerzas externas que generan inestabilidades en el flujo dando lugar a escalas más pequeñas. Estas a su vez se rompen en remolinos más pequeños hasta que su tamaño es tan pequeño que pueden disiparse por la viscosidad del fluido.

### 1.2.2. Teoría de Kolmogorov

En la década de los 40, Kolmogorov desarrolló su teoría de la turbulencia [3], que supuso uno de los grandes avances en la comprensión de la misma. Dotó de matemática a lo introducido por Richardson 20 años antes.

Kolmogorov consideró un flujo turbulento isotrópico donde tenía cabida la interpretación multiescala de Richardson, es decir la turbulencia se compone de torbellinos de diferentes tamaños. El tamaño del torbellino más grande es comparable a la escala del problema,  $l_0 = \mathcal{L}$ , y la velocidad de los mismo  $u_0 = u(l)$ , del orden de las fluctuaciones de velocidad  $u' = (\frac{2}{3}k)^{\frac{1}{2}}$ .

En esta escala el número de Reynolds es muy elevado, por lo que el efecto de la viscosidad es pequeño. Estos torbellinos grandes son inestables, y se rompen transfiriendo su energía a torbellinos más pequeñas.

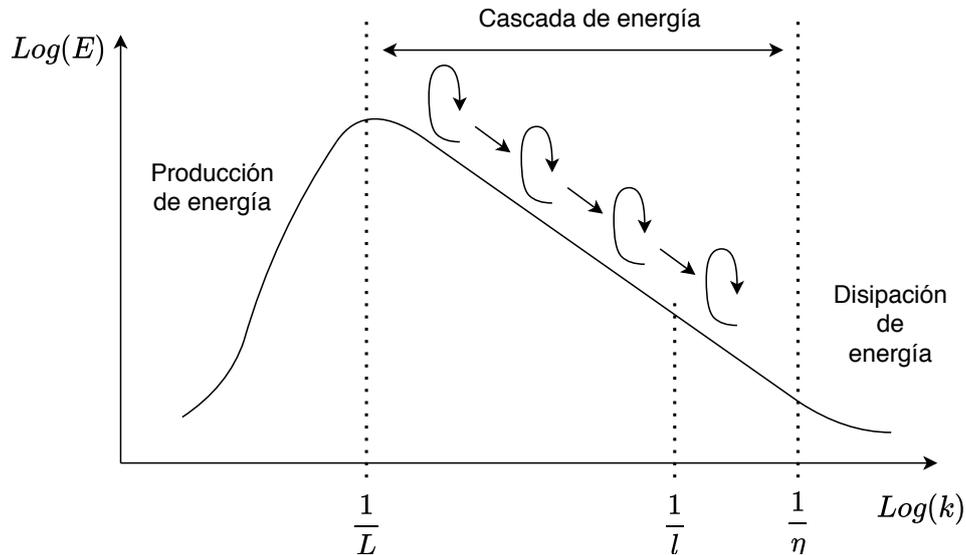
El ratio de disipación global debe estar determinado por este primer proceso en la secuencia de transferencia desde estas escalas grandes. Su energía es del orden de  $u_0^2$  y el tiempo escala con  $\tau_0 = \frac{l_0}{u_0}$ . Entonces la disipación queda según la Ecuación 1.2

$$\epsilon = \frac{u_0^2}{\tau_0} = \frac{u_0^3}{l_0} \quad (1.2)$$

Esta coincide con los resultados experimentales que decían que la disipación era independiente de la viscosidad para número de Reynolds altos.

Los nuevos torbellinos sufren un proceso de rotura similar derivando su energía a escalas más pequeñas y así sucesivamente hasta que el  $Re(l) = u(l)l/\nu$  es suficiente pequeño y el movimiento del torbellino es estable, siendo la viscosidad efectiva para disipar la energía.

Este proceso se conoce como cascada de energía de Kolmogorov.



**Figura 1.1.:** Esquema de la cascada de energía propuesta por Kolmogorov que relaciona el logaritmo de la energía cinética turbulenta con el logaritmo del número de onda.

En general, los torbellinos grandes son anisótrpos y están afectados por las condiciones de contorno del problema. Sin embargo, tras varios saltos energéticos en la cascada, los torbellinos se olvidan de su origen y se vuelven homogéneas e isotropas estadísticamente (hipótesis de isotropía local).

Siguiendo la definición anterior la velocidad característica de los torbellinos de tamaño  $l$  es

$$u_l \sim (u_L^3/L\epsilon)^{1/3} \sim (\epsilon l)^{1/3} \quad (1.3)$$

Y mediante razonamientos dimensionales, el espectro de energía unidimensional se expresa según la Ecuación 1.4.

$$E_{uu} \sim \epsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (1.4)$$

que es conocida como la ley de Kolmogorov 5/3, con  $k = 1/l$  el número de onda.

Finalmente, las escalas más pequeñas del fluido (donde los términos viscosos son del orden de los inerciales), se describen en las Ecuaciones 1.5-1.7. En estas las estructuras pueden disiparse. Se conocen como escala de Kolmogorov.

Escala de longitud de Kolmogorov

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4} \quad (1.5)$$

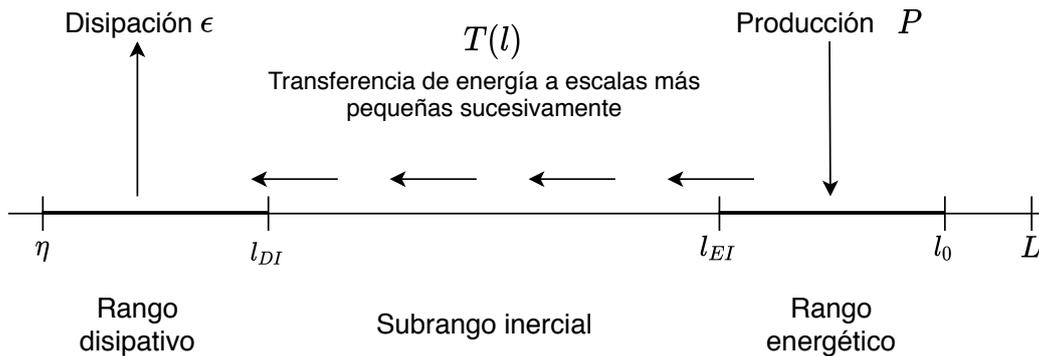
Escala de tiempo de Kolmogorov

$$\tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2} \quad (1.6)$$

Escala de velocidad de Kolmogorov

$$u_\eta = (\nu\epsilon)^{1/4} \quad (1.7)$$

Sin embargo, el proceso de transferencia energética entre las escalas es una idealización de una realidad física más compleja. Asimismo, a partir de la teoría anterior, se pueden distinguir tres rangos energéticos (que ya se han introducido) del problema según la influencia de la viscosidad y la isotropía del flujo. Se esquematizan en la Figura 1.2.



**Figura 1.2.:** Esquema de los rangos energéticos y disipativos característicos del flujo turbulento.

Por un lado tenemos las escalas más pequeñas que  $L_{EI}$ . Este rango se denomina rango de equilibrio universal, ya que está formado por torbellinos pequeños capaces de adaptarse en un equilibrio dinámico con la tasa de transferencia de energía (disipación) impuesta por las escalas grandes. Este a su vez se divide en dos rangos. Las estructuras menores que  $L_{DI}$  forman parte del rango disipativo. En ellas, la viscosidad tiene suficiente importancia para disipar los vórtices, y tienen una forma universal determinada por  $\epsilon$  y  $\nu$ . En cambio, si son mayores que este límite forma el sub-rango inercial y se ven poco afectadas por la viscosidad (vienen únicamente determinadas por  $\epsilon$ ). Por otro lado, se encuentran el rango energético, donde se encuentran las estructuras grandes del tamaño del problema y se inyecta la energía.

### 1.2.3. Etapa de post-Kolmogorov

#### Intermitencia

Pese a la gran importancia que supuso en su momento, la teoría desarrollada por Kolmogorov presentaba defectos. En primer lugar, asume que los gradientes de velocidad son uniformes en el espacio conforme las escalas decrecen. En contraposición a esta hipótesis, Batchelor y Townsend [4] completaron la teoría introduciendo el concepto de intermitencia.

La intermitencia es esta no homogeneidad de los flujos turbulentos. A raíz de este concepto surgen modelos como el de Frisch [5]. Estos confían en cascadas multiplicativas donde el tamaño de los vórtices decrece por un factor constante, pero las velocidades están multiplicadas por uno aleatorio. Por lo tanto, surgen diferentes escalas con dimensiones fractales distintas, de las cuales la escala clásica de Kolmogorov es una de ellas.

### Estructuras coherentes

A finales del siglo XX, se desarrollaron técnicas de visualización experimentales que ayudaron a la mayor comprensión del fenómeno de la turbulencia, y consiguieron mejorar los modelos anteriores. Algunos de ellos son los realizados por Kline *et al* [6]. Realizó estudios cuantitativos de la turbulencia en las capas límites buscando una explicación determinista del problema. Observó la existencia de los *streaks* de baja velocidad  $u$  en las regiones muy cercanas a la pared ( $y^+ < 10$ ), y su posterior elevación y proceso de *bursting* hasta la aparición de un *ejection*, que tienen un papel fundamental en la producción y transporte turbulento.

A partir de ellos, se empezó una aproximación más determinista de la turbulencia basado en estructuras coherentes en lugar de las teorías estadísticas de Kolmogorov. Se caracterizan por presentar regiones coherentes en tiempo y espacio, en función de una definición previa que intenta describir el comportamiento de un vórtice (mayor transporte de momento, mayor rotación que elongación). Estos estudios se han realizado principalmente en flujo libre como mezclas, y en flujos de pared como la capa límite. Las diferentes definiciones y criterios se discutirán más adelante en un apartado independiente.

Posteriormente, Kline y Robinson [7], realizaron un sumario con todas las estructuras visualizadas durante 30 años en el estudio de turbulencia en canales. Además de las ya mencionadas, tenemos los *sweeps*, regiones de alta velocidad que se desplazan hacia la pared, también estructuras vorticales de distintas formas, etc. Estas últimas se han estudiado en las diferentes regiones de la capa límite y algunos autores han propuesto el concepto de *hairpin*, que se tratará más adelante.

En la actualidad, las mayores simulaciones realizadas en canales alcanzan un número de Reynolds de Fricción  $Re_\tau = 10000$ , en un dominio con  $8 \cdot 10^{10}$  puntos y generando una base de datos aproximada de  $100TB$  [8]. Este hecho sitúa muy próximo los estudios computacionales a los experimentales en cuanto a Reynolds de fricción, con la ventaja que puedes obtener información de todas las variables en cada punto del dominio.

### Métodos de trabajo. Experimentación y computación

Al principio este enfoque se realizaba únicamente de forma experimental con los modelos comentados. Entre estos métodos, la técnica más utilizada es la velocimetría por seguimiento óptico (PIV). Sus grandes virtudes radican en ser una medida intrusiva y en poder medir instantáneamente las dos componentes de la velocidad (3 en su versión estereoscópica) en un punto del plano. Se introducen en el flujo partículas que se iluminan con un haz de láser plano. Los distintos instantes temporales se realizan con fotografías tomadas en diferentes intervalos, para posteriormente procesar estas imágenes.

Sin embargo, con el avance de la informática y la capacidad de cálculo de los computadores, se ha optado por abordar este problema mediante simulación numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes. Consiste en resolver estas ecuaciones con sus correspondientes condiciones de contorno en una malla discreta. Los métodos y el tamaño de la malla dependen de qué escalas turbulentas se quieren resolver y cuáles se quieren modelar con aproximaciones.

La principal ventaja respecto al enfoque experimental es que te permite acceder a cualquier valor de una variable en el tiempo (siempre que guardes dicha información). La simulación directa tiene un coste muy elevado que crece mucho con el número de Reynolds, por lo

que en ingeniería se suele optar por modelar ciertas variables. El método RANS consiste en resolver las ecuaciones promediadas de Reynolds sustituyendo o modelando el término del tensor de esfuerzos de Reynolds por otros esfuerzos equivalentes proporcionales a una viscosidad turbulenta.

Entre este modelo y la simulación directa se encuentra el método LES (Large Eddy Simulation). Pese a tener mayor coste que el RANS, sigue siendo independiente del número de Reynolds. Resuelve solo las escalas grandes de turbulencia que dependen del tamaño del problema siendo independientes del Reynolds (a diferencia de la escala de Kolmogorov). Las escalas del rango inercial, dependiente de  $\epsilon$  y  $\nu$ , se resuelven con modelos sub-malla. Tiene una mayor precisión que el RANS, principalmente cuando aparecen grandes estructuras no estacionarias que el anterior es incapaz de predecir. Además, las escalas que se resuelven abarcan la mayor parte de la energía total del dominio (80% de la energía).

### Simulación numérica directa

Un paso más allá en cuanto a coste computacional y precisión aparece la simulación numérica directa (DNS), que aborda las ecuaciones de Navier Stokes resolviendo todas sus escalas, desde las integrales hasta las disipativas sin recurrir a ningún modelo de turbulencia. Evidentemente, esto supone un incremento considerable del coste computacional, que es dependiente del número de Reynolds. Este determina el ratio entre las escalas grandes y las pequeñas, y por lo tanto, determina el número de puntos del mallado y las operaciones requeridas.

El desarrollo del DNS va ligado a la evolución de la capacidad computacional, y hasta 1970 estos problemas eran irrealizables. Pese al gran desarrollo actual, estos problemas solo son posibles para geometrías sencillas debido a los requisitos de las mallas, siendo su uso fundamentalmente científico. Sin embargo, se ha experimentado una gran evolución de la informática en la mitad del siglo XX que implicaba un aumento de la capacidad de cálculo de 3 órdenes de magnitud cada 15 años [9] haciendo más accesible este tipo de técnicas.

Dentro de estas simulaciones se pueden establecer ciertos grupos en función de las condiciones de contorno y la forma de resolverlos. La turbulencia homogénea se caracteriza por tener dominios periódicos en todas las direcciones. Además, debido a esta periodicidad, se pueden emplear métodos que se basan en la transformada discreta de Fourier, que es muy eficiente computacionalmente. En el caso de que una de las direcciones no sea periódica, se denomina turbulencia no homogénea y supone mayor coste. Esta suele presentar solo una dirección de anisotropía, para aprovechar la eficiencia de los métodos de Fourier en las otras direcciones, y complementarlo con otro método (polinomios de Chebyshev o diferencias finitas compactas) en la dirección anisótropa.

Por otro lado, si se resuelven las ecuaciones de Navier Stokes completas en el dominio de Fourier, estos métodos se denominan espectrales. Sin embargo, si alguna parte de las mismas como los términos no lineales, se resuelven en el campo físico, se conocen como métodos pseudo-espectrales.

El problema del que se parte en este trabajo es un flujo de pared, es decir, se trata de turbulencia no homogénea debido a la presencia de la pared. Además se va a resolver con métodos pseudo-espectrales. En este tipo de problemas el número de operaciones se relaciona con el Reynolds de corte con  $Re_\tau^{15/4}$  (Jiménez [9]). En el capítulo 2 se desarrollará en profundidad

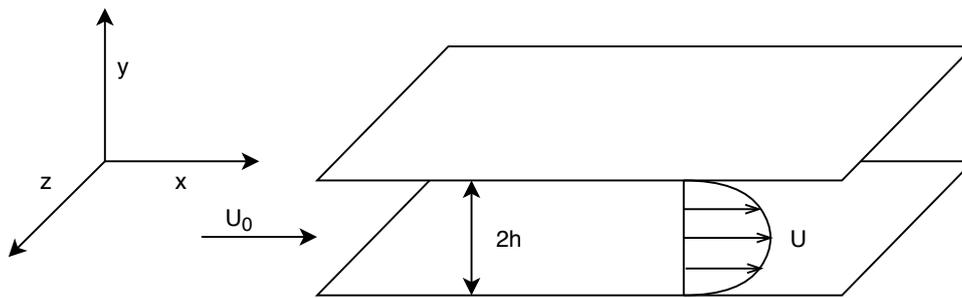
el método utilizado para resolver la simulación.

### 1.3. Flujos de pared

La mayor parte de los flujos turbulentos tienen como condición de contorno una pared o superficie sólida, como pueden ser las tuberías o un vehículo. Esto supone la peculiaridad de que el fluido tiene la misma velocidad que la pared en el punto donde están en contacto (condición de no deslizamiento). Existen tres geometrías simples que se asemejan a la mayoría de los flujos de pared que aparecen en la ingeniería: canales, tuberías y capas límites.

#### Flujo en un canal turbulento

Se considera un flujo completamente desarrollado a través de un canal rectangular de altura  $\delta = 2h$ . El conducto presenta gran longitud ( $L/\delta \gg 1$ ), y un gran alargamiento ( $b/\delta \gg 1$ ). El flujo medio es principalmente axial (Eje X), y la mayor variación del mismo se encuentra en la dirección de  $h$  (Eje Y). Asimismo, la velocidad del fluido es igual a la de la pared en  $y = 0$  e  $y = 2h$ . Esta geometría queda ejemplificada en la Figura 1.3.



**Figura 1.3.:** Geometría del canal turbulento.

Al considerar flujo completamente desarrollado se supone que el flujo es estadísticamente simétrico respecto al eje X y en las direcciones paralelas a la pared. Exceptuando el gradiente de presión media, que se encarga de impulsar el flujo venciendo la resistencia de fricción por el rozamiento con las paredes. Asimismo se considera estadísticamente estacionario y unidimensional (las estadísticas solo depende de la coordenada Y).

En este problema se pueden definir muchos números de Reynolds distintos en función de lo que representen. En concreto, el número de Reynolds general del problema caracterizado por la velocidad media del flujo y la geometría del canal viene dado por la Ecuación 1.8. Por encima de 2000 se dice que el flujo en un canal es turbulento.

$$Re_{canal} = \frac{U_c h}{\nu} \quad (1.8)$$

A la velocidad en la dirección del flujo se le aplica la descomposición de Reynolds, dividiéndola en la componente media y las fluctuaciones. El resto de velocidades tienen media nula.

$$u_t(x, y, z, t) = U(y) + u(x, y, z, t) \quad (1.9)$$

Sustituyendo esta definición en las ecuaciones de Navier-Stokes y tomando la media se llega a las ecuaciones de Reynolds promediadas:

$$\frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial t} + \langle U_i \rangle \frac{\partial}{\partial x_i} \langle U_j \rangle = \nu \nabla^2 U_j - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \langle u_i u_j \rangle \quad (1.10)$$

Particularizando para el problema del canal se obtienen las Ecuaciones 1.11 y 1.12.

$$\frac{\partial \langle uv \rangle}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \langle U \rangle}{\partial y^2} \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial \langle v^2 \rangle}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial y} \quad (1.12)$$

Si se toma la Ecuación de momento medio transversal junto a la condición de no deslizamiento, se obtiene una expresión para la presión (Ecuación 1.13).

$$\frac{\partial}{\partial x} \langle P \rangle = \frac{d}{dx} P_0 \quad (1.13)$$

Este resultado se puede introducir en la Ecuación del momento medio longitudinal, e integrándola se obtiene una expresión para el esfuerzo de Reynolds.

$$\langle uv \rangle = -\frac{y}{\rho} \frac{dP_0}{dx} + \nu \partial_y \langle U \rangle - u_t a u^2 \quad (1.14)$$

El último término se trata de la constante de integración y tiene las mismas unidades que el tensor de Reynolds, es decir, de velocidad al cuadrado. Este término se conoce como velocidad de fricción,  $u_\tau$ , y va a caracterizar el problema. Si se evalúa en la pared, se obtiene:

$$u_\tau^2 = \nu \partial_y U = \tau_w \quad (1.15)$$

que es igual al esfuerzo cortante en la pared del canal.

Si se particulariza la Ecuación 1.14 para  $y = h$ , es decir en la mitad del canal, aprovechando la simetría, se obtiene que :

$$-\frac{h}{\rho} \frac{dP_0}{dx} = \tau_w \quad (1.16)$$

A partir de este resultado se puede obtener una expresión para el tensor de esfuerzos de cortantes:

$$\tau = -\langle uv \rangle + \nu \partial_y \langle U \rangle = \left(1 - \frac{y}{h}\right) u_\tau^2 \quad (1.17)$$

que indica como los esfuerzos tangenciales tienen el máximo en la pared ( $\tau_w$ ) y va disminuyendo linealmente hasta anularse en el centro del canal.

El objetivo ahora es adimensionalizar la Ecuación anterior para obtener la mayor información posible del comportamiento del mismo y a su vez simplificar la solución del problema.

Las velocidades se adimensionalizan con la velocidad de fricción ( $U^+ = \frac{U}{u_\tau}$ ), obteniendo las variables en unidades de pared. Las longitudes utilizan la anchura de la mitad del canal  $h$  ( $Y = \frac{y}{h}$ ). De esta forma se obtiene la Ecuación 1.18.

$$\frac{\tau}{\tau_w} = -\langle uv \rangle^+ + \frac{1}{Re_\tau} \partial_y \langle U \rangle^+ = (1 - Y) \quad (1.18)$$

$Re_\tau = \frac{u_\tau h}{\nu}$  es el número de Reynolds de fricción o de corte. Esta ecuación solo tiene validez lejos de la pared, ya que cuando la distancia a la pared se anula,  $y = 0$ , el esfuerzo cortante se hace 0. Cerca de la pared los esfuerzos tangenciales son principalmente viscosos, por lo tanto el  $Re_\tau$  no puede ser infinito, que sería la única posibilidad de cumplir la expresión anterior en la pared.

Por ello, es necesario buscar otra adimensionalización válida cerca de la pared (donde los esfuerzos viscosos no se hagan despreciables a altos números de Reynolds). Si en lugar de adimensionalizar las longitudes con la anchura del canal, se emplean también unidades de pared mediante la relación  $y^+ = yu_\tau/\nu \sim 1$ , se obtiene la Ecuación 1.19.

$$\frac{\tau}{\tau_w} = -\langle uv \rangle^+ + \partial_{y^+} \langle U \rangle^+ = (1 - \frac{y^+}{Re_\tau}) \quad (1.19)$$

Esta ecuación es válida cerca de la pared, e indica que para  $y^+$  bajos (cercanos a la pared) y  $Re_\tau$  altos el esfuerzo cortante es prácticamente constante e igual al esfuerzo en la pared.

A continuación se van a resolver estas ecuaciones para problemas donde el  $Re_\tau$  tiende a infinito (soluciones asintóticas). En función de la importancia de la viscosidad se van a distinguir dos zonas principalmente.

En primer lugar, está la región interior. Se caracteriza por tener  $y^+$  cercano a la unidad e  $Y \ll 1$ , además de predominar los efectos viscosos. El flujo medio viene determinado por la Ecuación 1.20.

$$-\langle uv \rangle^+ + \partial_{y^+} \langle U^+ \rangle = 1 \quad (1.20)$$

La ecuación anterior no depende de ningún parámetro, y el canal es simétrico. La solución por lo tanto tiene que tener una forma:

$$U^+ = f(y^+) \quad (1.21)$$

$$\langle uv \rangle^+ = g(y^+) \quad (1.22)$$

Estas relaciones se conocen como Leyes de pared de Prandtl. Aún más cerca de la pared, el esfuerzo de Reynolds se hace nulo, y se simplifica la Ecuación 1.20, y aplicándolo a las leyes de Prandtl se obtiene un perfil lineal de la velocidad media.

$$U^+ \cong y^+ \quad (1.23)$$

Experimentalmente se ha comprobado que por debajo de  $y^+ = 5$  se puede asumir que el tensor de Reynolds es muy cercano a 0. Esta zona se denomina sub-capa viscosa. La región por encima de esta pero que no es exterior se conoce como capa *buffer* o cercana a la pared.

En segundo lugar, se utiliza la Ecuación 1.18. Cuando el  $Re_\tau$  tiende a infinito, y los efectos viscosos son despreciables, se simplifica de la forma:

$$-\langle uv \rangle^+ = (1 - y/h) \quad (1.24)$$

Nótese, que la expresión de arriba no cumple las condiciones de no deslizamiento en la pared. Además no proporciona información respecto al perfil de velocidad media. Mediante análisis dimensional, von Karman postuló que debía existir una función universal, Ley de defecto de la velocidad:

$$\langle U^+ \rangle - U_c^+ = F(Y) \quad (1.25)$$

siendo  $U_c$  la velocidad en el centro del canal.

Por ultimo, tenemos una región intermedia, que debe acoplar ambas regiones. Derivando y manipulando las Ecuaciones anteriores se llega (a través de un desarrollo presente en la mayoría de los libros de Mecánica de Fluidos), la Ecuación 1.26 del perfil medio de velocidad.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log(y^+) + B \quad (1.26)$$

siendo  $\kappa = 0,41$  y  $B = 5.1$ .  $\kappa$  se conoce como la constante de Karman y se obtiene de forma experimental.

Esta región se conoce como capa logarítmica y es válida para  $y^+ > 100 - 200$  y  $Y < 0.1 - 0.3$ .

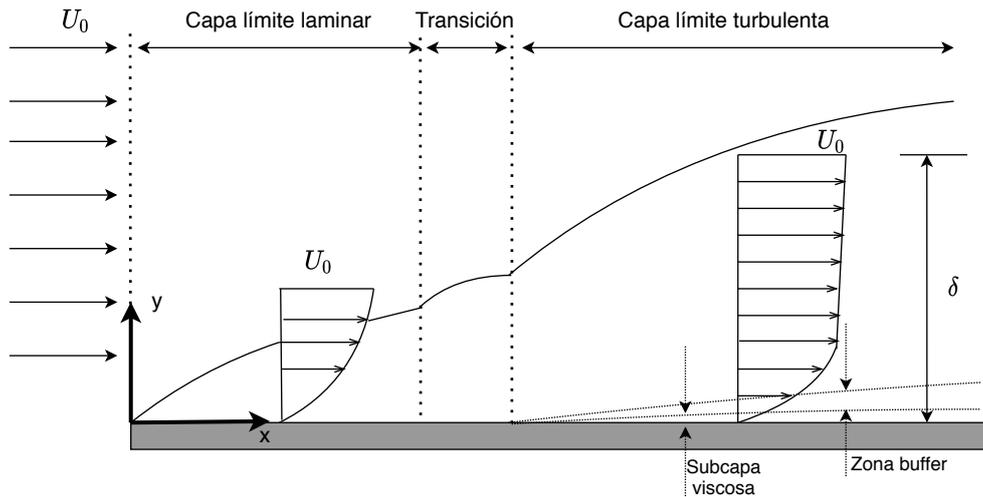
### Capa límite

En cuanto a las capas límites el procedimiento es análogo, sin embargo, esta vez solo hay una superficie, por lo que no hay simetría en la dirección de la corriente. Desde el punto de vista numérico, es más complejo que el problema del canal, en parte debido que se desarrolla continuamente, por lo que en general las derivadas de las magnitudes estadísticas no son 0. Sin embargo las ecuaciones son muy similares, por lo que no se desarrollarán en este documento.

La estructura y regiones de una capa límite se representan en la Figura 1.4. Además se presentan los dos regímenes que suelen convivir : el laminar y el turbulento.

## 1.4. Definición de vórtice

Anteriormente se ha introducido el concepto de estructuras coherentes, que aparecieron como una forma de estudio diferente al enfoque clásico estadístico. La idea se resume en que existen zonas del espacio y del tiempo significativamente más grandes que las escalas más pequeñas de forma que el fluido tiene una forma coherente característica. Desde este momento, muchos científicos se han preguntado que definiciones tomar de estructura coherente y su importancia en la dinámica de la turbulencia.



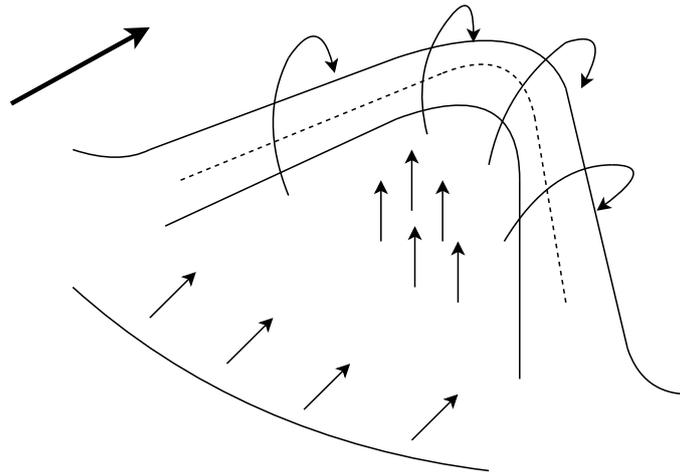
**Figura 1.4.:** Esquema del desarrollo de una capa límite turbulenta.

El primer experimento en visualizar estructuras vorticales fue llevado a cabo por Kline *et al.* [6], como ya se había introducido. Se trataban de los *streaks*, un movimiento relativamente lento del fluido cercano a la pared. Sin embargo, se han observado otras estructuras más alejadas, que se creen muy importantes en los mecanismos de transporte. En función de sus características y la zona donde se desarrollan se pueden distinguir otros tipos de estructuras coherentes, de entre las que destacan las que se encuentran más allá de la capa *buffer*. Estas han sido las menos estudiadas hasta ahora, pero se piensa que tienen un papel fundamental en la dinámica de la turbulencia.

Se caracterizan por tener mayor volumen y tamaño que las estrías generadas cerca de la pared. Asimismo, presentan una morfología anisótropa, y desempeñan un papel fundamental en los procesos de transporte turbulento en los flujos de pared. La mayor parte del trabajo teórico sobre este tipo particular de estructuras viene de los trabajos de Perry y Chong [10], y se describen de forma similar a las descritas en Townsend en 1976 [11] en su teoría de torbellino ligado a la pared. Los autores conciben los flujos turbulentos como bosques de racimos ligados a la pared autosimilares, similares a los torbellinos de herradura descritos por Townsend, distribuidos de forma aleatoria por el espacio. Estos contienen toda la vorticidad del flujo.

Posteriormente, Head y Bandyopadhyay [12] realizaron experimentos de visualización con humo que demostraban la existencia de unas estructuras similares inclinadas  $45^\circ$ . Con el desarrollo de la computación es más fácil identificar este tipo de configuraciones en función de criterios en base a las variables del flujo. Gracias al DNS, una nueva iteración de esta estructura emergió con el nombre de paradigma de paquetes de *hairpins* (originalmente propuesto por Adrián *et al.* [13]). Estas estructuras eran similares a las anteriormente descritas, pero con una inclinación media menor.

Este modelo de turbulencia de pared se concibe como un conjunto de paquetes de *hairpins* que crecen desde la pared hasta la región exterior con tiempo de vida mayor que el tiempo característico de formación. Sugiere, además, que estos paquetes conservan su coherencia con el tiempo porque sus miembros se mueven a la misma velocidad, y el flujo inducido de cada paquete proviene del efecto cooperativo de varios *hairpins*. El crecimiento de estos paquetes involucra múltiples mecanismos como autoinducción, autogeneración, y mezcla

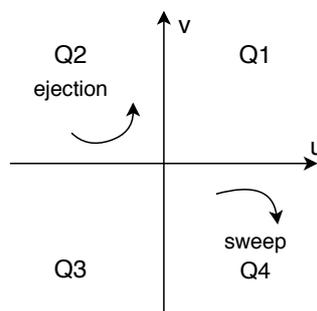


**Figura 1.5.:** Esquema de la morfología de un *hairpin*.

con otros paquetes. Sin embargo, la evidencia de estos paquetes y su relación con otras estructuras aún no está clara.

Las estructuras mostradas se supone que contienen una importante fracción del transporte turbulento o de la disipación. Sin embargo, esta influencia depende del criterio de identificación impuesto. Normalmente se definen como estructuras turbulentas de fluctuaciones de velocidad mayores que el resto del dominio. Esto implica que debe haber un umbral que decide qué puntos del dominio pertenecen al vórtice o están fuera de él. En el siguiente capítulo se discuten varios criterios en función del umbral y de las variables del flujo utilizadas.

Otra aproximación para la resolución del problema, sería considerar el análisis de cuadrantes introducido por Wallace *et al.* [14]. Propone estudiar regiones turbulentas que tienen un elevado esfuerzo tangencial de Reynolds en los distintos cuadrantes etiquetados de Q1 a Q4. Estos eventos contribuyen de forma dominante al intercambio de momento en la dirección del flujo entre las distintas capas del fluido, y por lo tanto tienen mucha importancia en la generación de la fuerza de arrastre. Este análisis, al igual que los anteriores, busca eventos con gran relevancia, por lo que empíricamente deben superar un cierto umbral  $|uv|$



**Figura 1.6.:** Esquema de la clasificación en eventos por cuadrantes de  $u$  y  $v$ .

Las estructuras más importantes serían los *ejections* en el segundo cuadrante ( $u < 0, v > 0$ ) y los *sweeps* en el cuarto cuadrante ( $v < 0, u > 0$ ). Estas organizaciones se conocen como *uv clusters*, y se van a estudiar en detalle a lo largo de este trabajo. Por lo tanto, esta concepción supone los *ejections* y los *sweeps* como los movimientos constitutivos primarios de las estructuras coherentes.

Según este enfoque o modelo, los *streaks* del flujo tienen un comportamiento característico conocido como *bursting*. El *streak* va creciendo en velocidad y alrededor de  $y^+ > 10$  se frena en la velocidad axial y se desplaza alejándose de la pared. Este proceso se conoce como *ejection*. Si una parte del fluido se aleja de la pared, por continuidad debe aparecer otra parte del fluido realizando el movimiento contrario, denominadas *sweeps*. La importancia de los mismos, y su posible relación con los paquetes de *hairpins* también será discutida en este trabajo.

## 1.5. Objetivos del trabajo

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es analizar las estructuras coherentes que aparecen en flujos turbulentos de pared a partir de un código que identifica y agrega estas estructuras de acuerdo a un criterio. Además de la identificación espacial se realiza un seguimiento de las mismas a lo largo del tiempo para caracterizar sus tiempos de vida, sus procesos de formación y disipación y su velocidad de advección.

Este trabajo parte de un código DNS funcional, verificado y validado. A partir de este se han establecido los objetivos a seguir durante el proyecto.

- **Discusión de los criterios de identificación:** se han probado y analizado ciertos criterios de identificación de vórtices. Asimismo, se ha realizado un estudio de percolación para determinar el umbral necesario para obtener resultados coherentes teniendo en cuenta el número de vórtices obtenidos y la energía que contienen respecto a su volumen de ocupación.
- **Generación de un código de identificación y seguimiento de vórtices:** a partir de una matriz con información de los puntos del dominio que determinan un vórtice se realiza un código de agregado espacial de estos puntos en estructuras mayores. Después se analizan instantes temporales consecutivos para obtener información de la vida de estos vórtices. Todo esto en un código acoplado que resuelve el campo y la información de los vórtices al mismo tiempo.
- **Análisis de los resultados estáticos y dinámicos :** por una parte se analizará la morfología y tamaño de las estructuras agregadas en instantes temporales aislados; por otro lado se analiza la evolución temporal de estas estructuras para determinar cuánto viven, y sus procesos de formación y rotura, es decir, intentar determinar la dinámica de los vórtices en simulaciones a número de Reynolds moderado  $Re_\tau = 500 - 1000$ .
- **Relación entre diferentes tipos de estructuras :** se discutirá la relación entre los *sweeps* y *ejections* formados, y su relación de ambos con los *vortex cluster* presentes en el dominio. Se discutirá la validez de los resultados teniendo en cuenta el  $Re_\tau$  de la simulación.

Este trabajo sigue la estela de trabajos o tesis similares que buscan buscar explicación a la dinámica de la turbulencia a través de estructuras coherentes. Del Álamo estudió la estática y parte de la dinámica de los *vortex cluster* [15]. Lozano-Durán [16], profundizó en el estudio temporal centrándose en los *uv cluster*. Aguilar [17] realizó un trabajo similar a los anteriores, del cual se han tomado algunos conceptos a la hora de elaborar el código, como la organización de los datos obtenidos del seguimiento temporal.

# 2

## Fundamentos del DNS

### Índice

---

<b>2.1. Método pseudo-espectral de simulación DNS</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Dominio computacional</b>	<b>20</b>
<b>2.3. Criterios de identificación de vórtices</b>	<b>20</b>
2.3.1. Método de Chong	21
2.3.2. Método de los eventos Qs	23
2.3.3. Estudio de percolación	24
<b>2.4. Energía de las estructuras coherentes y consideraciones finales</b>	<b>26</b>

---

En el capítulo anterior se había introducido la simulación numérica directa y las formas de encontrar la solución dependiendo del problema. Este método supone un coste computacional elevado y limita por lo tanto el número de Reynolds que se puede analizar. Sin embargo, en este trabajo resulta indispensable, porque necesitamos los valores reales de las variables en todo el campo fluido para determinar donde se encuentran las estructuras coherentes.

Por consiguiente, este trabajo parte de un código que resuelve un canal turbulento mediante DNS. Las direcciones paralelas a la pared se consideran infinitas y se implementan mediante condiciones de contorno periódicas. La dirección perpendicular a la pared es finita y en ella se impone la condición de no deslizamiento en la pared. Asimismo se impone un gradiente de presión en la dirección del flujo  $\frac{\partial p}{\partial x}$ . Se trata, entonces, de un problema de turbulencia no homogénea resuelto mediante métodos pseudo-espectrales, que utilizan la transformada de Fourier para las direcciones paralelas debido a su gran eficiencia computacional. La dirección no homogénea se resuelve mediante una expansión de polinomios de Chebychev (mediante diferencias finitas compactas propuestas por SK Lele [18]), que permite un espaciado no equidistante que posibilita una mejor resolución del problema.

Asimismo, el canal turbulento considerado se caracteriza por paredes inmóviles y el flujo desplazándose debido a gradiente de presión favorable en la dirección de corriente. Es decir, se emplean flujos de Poiseuille.

El código LISO, del que se parte en este trabajo, ha sido ampliamente empleado y validado en múltiples trabajos anteriores, entre los que se encuentran [19],[20], en los que nos hemos apoyado por validar los códigos desarrollados y sus resultados.

La base de este se desarrollará a continuación, partiendo del esquema numérico desarrollado por Moser [21].

## 2.1. Método pseudo-espectral de simulación DNS

La geometría es la típica de un canal turbulento ya mostrada en la Figura 1.3. El dominio computacional depende del número de Reynolds, pero siempre teniendo la dirección de corriente más larga que la transversal, y ambas direcciones homogéneas mucho mayores que la perpendicular a la pared. El tamaño de la malla también varía, incrementándose el número de elementos, y por lo tanto el coste computacional, con el  $Re_\tau$ . En este dominio computacional, el espaciado del mallado en la dirección longitudinal y transversal son respectivamente  $\Delta x^+ \approx 12$  y  $\Delta z^+ \approx 12$  en unidades de pared.

El esquema numérico empleado parte de las ecuaciones de Navier-Stokes (conservación del momento y continuidad en un flujo incompresible):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \cdot \nabla u_i = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_i \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial u_i} = 0 \quad (2.2)$$

Estas ecuaciones se pueden reducir a otras dos más convenientes desde el punto de vista computacional. Una ecuación de cuarto orden para la velocidad normal a la pared  $v$ , o de segundo orden para su laplaciano  $\phi = \nabla^2 v$ ; y una ecuación de segundo orden para la componente normal de la vorticidad  $w_y$ . Partiendo de las ecuaciones anteriores se introduce el término de la helicidad, proyección de la vorticidad sobre la velocidad,  $\vec{H} = \vec{u} \times \vec{\omega}$ .

Aplicando esta definición al término convectivo y las propiedades del operador nabla ( $\frac{1}{2} \nabla(\vec{u} \cdot \vec{u}) = \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} + (\vec{u} \nabla \cdot) \vec{u}$ ), se obtiene la Ecuación 2.3.

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(\vec{u} \cdot \vec{u}) - \vec{H} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_i \quad (2.3)$$

Tras esto, aplicamos la divergencia a la ecuación anterior para obtener la divergencia de la helicidad. Asimismo, se puede simplificar con la continuidad obteniendo la Ecuación 2.4.

$$\nabla \cdot H = \frac{1}{2} \nabla^2(\vec{u} \cdot \vec{u}) + \frac{1}{\rho} \nabla^2 P \quad (2.4)$$

Aplicando el operador laplaciano a la Ecuación 2.3 e introduciendo la definición obtenida de la divergencia de la helicidad se obtiene:

$$\frac{\partial(\nabla^2 \vec{u})}{\partial t} + \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H = \frac{1}{Re} \nabla^4 \vec{u} \quad (2.5)$$

Si además se aplica el rotacional de la Ecuación 2.3 considerando que el rotacional de un gradiente es nulo se obtiene la Ecuación 2.6.

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{H} = \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{\omega} \quad (2.6)$$

Estas ecuaciones son vectoriales, sin embargo, solo nos interesan las direcciones perpendiculares a la pared. A partir de las Ecuaciones 2.4 y 2.6, se obtienen las dos que había introducido que serán útiles para resolver el problema desde el punto de vista computacional.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 v = h_v + \frac{1}{Re} \nabla^2 \phi \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} g = h_g + \frac{1}{Re} \nabla^2 g \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.9)$$

Donde

$$g = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = w_y$$

$$h_v = -\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial H_1}{\partial x} + \frac{\partial H_3}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) H_2$$

$$h_g = \frac{\partial H_1}{\partial z} - \frac{\partial H_3}{\partial x}$$

La ventaja de seleccionar estas dos variables para resolver las ecuaciones es que no es necesario resolver la presión, y, principalmente, que reducimos un problema vectorial (una ecuación por cada dirección de la velocidad) por dos únicas ecuaciones.

Estas son resueltas en el dominio de la frecuencia, por lo que es necesario aplicar las transformadas de Fourier a las ecuaciones presentadas. En concreto, se emplean las FFT para cambiar al dominio de la frecuencia por su gran eficiencia computacional. Los términos no lineales necesitan un tratamiento especial, y se operan en el dominio físico (en este paso también se guardan las estadísticas), que supone menos coste que realizar el producto de convolución, para posteriormente acoplarlo de nuevo en el dominio de la frecuencia.

Así, quedaría resuelta la discretización espacial. En cuanto a la evolución temporal se resuelve mediante un esquema Runge-kutta semi-implícito de tercer orden. Partiendo de una Ecuación de transporte genérica 2.10 que diferencia entre una parte lineal  $L(u)$  y otra no lineal  $N(u)$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = L(u) + N(u) = R(u) \quad (2.10)$$

La parte lineal incluye los términos viscosos y de presión, mientras que la parte no lineal incluye los términos convectivos. Los tres pasos de Runge-Kutta para avanzar un instante temporal consisten en :

$$u' = u_n + \Delta t [L(\alpha_1 u_n + \beta_1 u') + \gamma_1 N_n] \quad (2.11)$$

$$u'' = u' + \Delta t [L(\alpha_2 u' + \beta_2 u'') + \gamma_2 N' + \zeta_1 N_n] \quad (2.12)$$

$$u_{n+1} = u'' + \Delta t [L(\alpha_3 u'' + \beta_3 u_{n+1}) + \gamma_3 N'' + \zeta_2 N'] \quad (2.13)$$

Éste método se encuentra más desarrollado en [22], junto con los coeficientes de las ecuaciones anteriores.

El código utilizado desarrolla todas estas ecuaciones en Fortran y fue realizado por Javier Jiménez. Posteriormente, se introdujo la resolución y escritura en paralelo mediante MPI por Sergio Hoyas.

## 2.2. Dominio computacional

Las simulaciones realizadas en este trabajo se han resuelto empleando el código LISO, con unas estrategias descritas en el apartado anterior. Ahora nos centramos en describir el dominio computacional. La separación del mallado normal a la pared se ajusta para intentar mantener una resolución de  $\Delta y = 1.5\eta$  aproximadamente constante, siendo  $\eta$  la longitud característica de la escala de Kolmogorov. En unidades de pared,  $\Delta y^+$  varía de 0.3 en la pared hasta 12 en la línea central del canal.

El fluido se desplaza debido a un gradiente de presión en la dirección X. El resto de parámetros están presentes en la Tabla 2.1. El tamaño del mallado y por lo tanto, el coste computacional, dependen del  $Re_\tau$ . Se han estudiado problemas con  $Re_\tau$  desde 180 hasta 1000 (sin embargo, solo se han analizado los resultados de los casos recogidos en la tabla).

<b>Características del flujo</b>		
Número de Reynolds de fricción $Re_\tau$	500	1000
Número de Reynolds $Re$	11480	20580
Velocidad de fricción $u_\tau$	0.0487	0.0449
<b>Características geométricas</b>		
Número de puntos en x, $N_x$	1536	3072
Número de puntos en y, $N_y$	251	383
Número de puntos en z, $N_z$	1152	2304
Longitud del dominio en x, $L_x$	$8\pi$	$8\pi$
Longitud del dominio en z, $L_z$	$3\pi$	$3\pi$
Altura del canal	2	2
<b>Características de la resolución temporal</b>		
$CFL$	0.9	0.9
Paso temporal $\Delta t$	0.0295	0.0146

**Tabla 2.1.:** Parámetros de la simulación.

## 2.3. Criterios de identificación de vórtices

Pese a que la idea de la importancia de los vórtices empieza a estar clara desde que experimentalmente se demostró la presencia de estructuras organizadas en el seno del fluido, no existe una definición única de lo que limita la región espacial constitutiva de un vórtice. Existen multitud de criterios para su definición en función de las variables o propiedades del fluido que se analizan, siempre relacionadas con el movimiento vortical.

En este trabajo se utilizan criterios eulerianos locales que utilizan la velocidad y sus derivadas para determinar qué puntos del dominio cumplen las condiciones impuestas para ser incluidos en la región vortical. En principio estos métodos pueden variar su complejidad en dos sentidos: en primer lugar, dependiendo de si el umbral es fijo o depende de la distancia

a la pared; y en segundo lugar si es capaz de identificar el núcleo del vórtice (que tiene que cumplir ciertos requisitos) o simplemente no distingue regiones dentro del mismo vórtice. Conforme aumenta la complejidad del método también incrementa su coste computacional.

En este trabajo se discutirán dos métodos basados en el gradiente del tensor velocidad con umbral de detección variable y que no distinguen el núcleo de la estructura coherente.

El problema de identificación de conjuntos de vórtices no es trivial, y diferentes autores han dado resultados diversos, siendo difícil encontrar un método que dé buenos resultados en todas las condiciones particulares. Actualmente, se acepta que las estructuras coherentes se caracterizan por un movimiento de *swirl* o remolino y su presencia ha sido fuertemente asociada con la presencia de líneas de corrientes espirales o cerradas. Por ello, la mayoría de los criterios se basan en el tensor gradiente de velocidad  $\nabla u = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ .

En la bibliografía se puede encontrar información detallada de estos métodos con su justificación matemática completa. Sin embargo, este trabajo únicamente se centra en la formulación necesaria para implementarlo en un código funcional.

### 2.3.1. Método de Chong

El criterio cinemático de Chong identifica una región donde el tensor gradiente de velocidad está dominado por su componente de rotación. En términos matemáticos se expresa como que el discriminante de  $\nabla u$ ,  $D$ , debe ser mayor que 0.

Perry y Chong [10], propusieron una técnica que consiste en verificar las líneas de corriente en cada punto del campo fluido, en un sistema de referencia móvil moviéndose a la velocidad de ese punto. Aplican en cada uno de estos puntos un análisis de puntos críticos, mediante los autovalores del tensor gradiente de velocidad  $A_{ij} = \nabla u$ . Una región de autovalores complejos se define como vórtice, ya que autovalores complejos implican que el patrón de las líneas de corriente son cerrados o con forma de espiral en ese sistema de referencia local. Esto es equivalente a que la parte antisimétrica del tensor domina sobre la simétrica.

Para hallar el discriminante, antes es necesario calcular el valor de los invariantes del tensor de velocidad, que se definen:

$$P = A_{ii} , \quad (2.14)$$

$$Q = \frac{1}{2} [P^2 - S_{ij}S_{ji} - W_{ij}W_{ji}] , \quad (2.15)$$

$$R = \frac{1}{3} [-P^3 + 3PQ - S_{ij}S_{jk}S_{ki} - 3W_{ji}W_{jk}S_{ki}] \quad (2.16)$$

donde  $S_{ij} = (A_{ij} + A_{ji})/2$  es el tensor de deformación o parte simétrica de  $A_{ij}$  y  $W_{ij} = (A_{ij} - A_{ji})/2$  es la parte antisimétrica o tensor de rotación. Para flujos incompresibles el primer invariante  $P$  es nulo y la formulación del determinante queda según la Ecuación 2.17.

$$D = \frac{27}{4}R^2 + Q^3 \quad (2.17)$$

La curva  $D = 0$  divide el flujo en dos regiones en función de si tienen autovalores complejos. Sin embargo, a efectos prácticos este criterio proporciona una excesiva cantidad de puntos

del dominio que pertenecen a las estructuras coherentes. Por ello, muchos autores prefieren utilizar un umbral para discriminar una gran cantidad de vórtices pese a que cumplen el criterio anterior. El valor de este criterio se determina mediante un estudio de percolación, que se detallará en un apartado posterior.

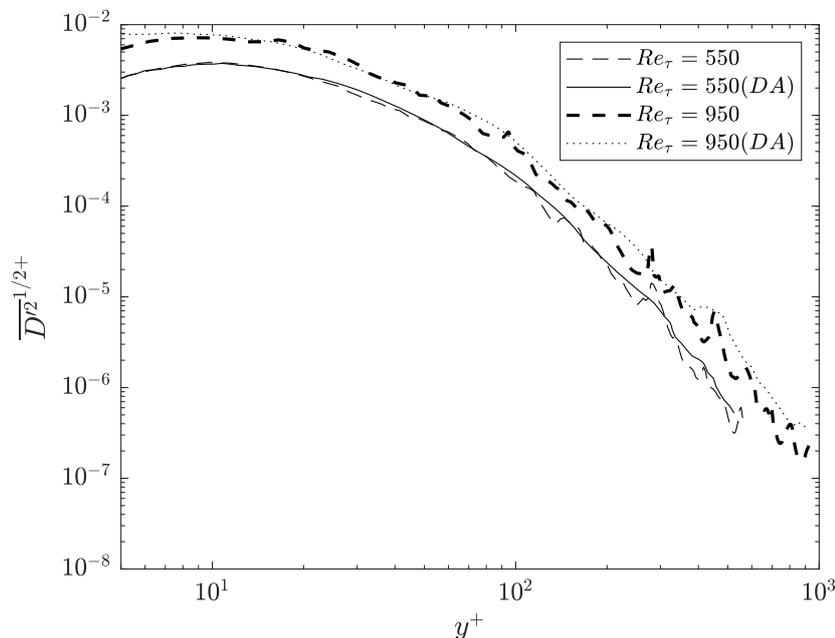
Sin embargo, emplear un umbral constante puede resultar problemático debido a la no homogeneidad del flujo en la dirección  $Y$ . Esto ocasiona que si se emplea un valor del umbral adecuado para el centro del canal, cerca de la pared aparecerá plagado de vórtices, mientras que si es adecuado para las zonas cercanas a la pared, al ascender disminuye el número de ellos hasta ser inexistentes en la mitad del canal.

Del Álamo *et al.* [23] proponen escalar el valor del umbral en cada plano de  $Y$  constante como representa la Ecuación 2.18.

$$D(x) > D_{thresh}(y) = \alpha_t \cdot \overline{((D')^2)}^{1/2}(y) \quad (2.18)$$

El término de la derecha se compone del parámetro de umbral (obtenido mediante percolación), y la desviación estándar del tensor gradiente de velocidad.

Del Álamo emplea un valor del parámetro de  $\alpha_t = 0.02$ . Los valores de la desviación estándar del discriminante adimensionalizado obtenidos con nuestra simulación y comparados con la del Álamo se presentan en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.:** Desviación típica en función de la distancia a la pared  $\overline{((D')^2)}^{1/2}(y)$  del discriminante del tensor gradiente de velocidad. Se comparan los resultados obtenidos con la base de datos de Torroja.

Estas estructuras que quedan definidas con el criterio mostrado se corresponden con los torbellinos autosemejantes descritos en la introducción similares a las estructuras de Townsend. A lo largo del trabajo los llamaremos *vortex clusters* (o *hairpins*).

### 2.3.2. Método de los eventos $Qs$

Otro método de identificación empleado en este trabajo está destinado a determinar los puntos del dominio caracterizados por un esfuerzo de Reynolds elevado, es decir, los llamados eventos de cuadrantes  $Qs$ . Estos eventos son coherentes en espacio y tiempo y parten de las estructuras más elementales (los *streaks*) a partir de un proceso de *bursting*.

Este método consiste en evaluar la intermitencia tomando como variable el esfuerzo de Reynolds del fluido, cantidad que está asociada con la transferencia de momento medio y con la producción media de energía cinética turbulenta. Como se había introducido, los eventos resultantes se pueden clasificar en 4 cuadrantes, desde Q1 hasta Q4. La mayoría de los puntos donde  $|uv|$  presenta un valor bastante más elevado que su media pertenecen o bien a los Q2 (*ejections*), donde la  $v$  positiva transporta velocidades bajas desde la pared hacia arriba, o a los Q4 (*sweeps*) que son opuestos a los anteriores. Ambos eventos se agrupan en  $Q^-s$  debido a su signo. Por lo tanto, se toman los eventos de cuadrante fuertes que superan cierto umbral, y por lo tanto son los contribuidores dominantes al intercambio de momento.

Los *streaks*, de velocidad baja cercanos a la pared, sufren el fenómeno de *bursting* (elevación, oscilación, rotura y eyección). Kim *et al.* [24] demostró que la mayoría de la producción turbulenta se genera durante estos procesos. Luego estas estructuras crecen y se desarrollan hasta la región exterior. Por lo tanto, los eventos Q2 y Q4 juegan un papel importante en cómo la energía cinética turbulenta y el momento se redistribuyen en turbulencia de pared.

La formulación matemática de todas estas ideas se plasma en la Ecuación 2.19.

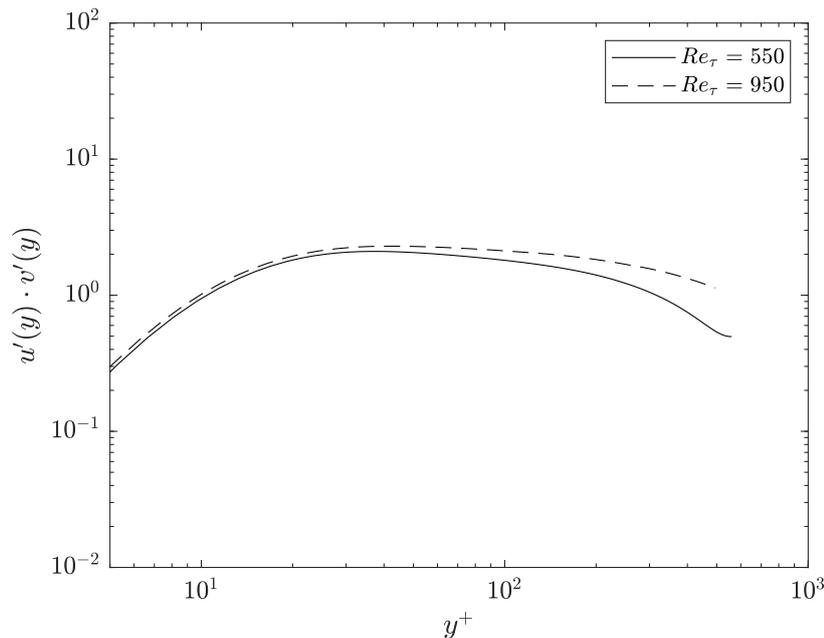
$$|\tau(x)| > Hu'(y)v'(y) \quad (2.19)$$

donde  $\tau(x) = -u(x)v(x)$  es el esfuerzo de Reynolds instantáneo en un punto del dominio y  $H$  el parámetro del umbral.

En esta definición se deben tener 3 aspectos en cuenta:

- En primer lugar, las variables en minúscula suponen las fluctuaciones de la velocidad según la descomposición de Reynolds. Por lo que la ecuación anterior requiere calcular la desviación típica de esas fluctuaciones que tienen media nula.
- Al igual que con el método de Chong, un valor del umbral constante supondría resultados confusos debido a la no homogeneidad del flujo. Por ello, es más conveniente utilizar un umbral que depende de la altura en  $Y$  como el mostrado en la Ecuación 2.19. Los valores del producto de la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad  $U$  y  $V$  se muestran en la Figura 2.2. También se podría optar por utilizar la desviación del esfuerzo de Reynolds. La única diferencia sería que el parámetro  $H$  tendría otro valor.
- Por último, a la hora de programar este método en el código no resulta tan trivial como la identificación de *vortex cluster*. Esa formulación solo distingue los eventos  $Qs$ . Es necesario distinguir entre los distintos eventos basándose en los signos de  $u$  y  $v$ .

Para determinar el valor de  $H$  se debe realizar un estudio de percolación. Según Lozano-Durán ([16]) el óptimo debe situarse en el rango  $1 < H < 3$ . En este trabajo a estas estructuras se les llamará en general *uv clusters* o eventos  $Qs$ .



**Figura 2.2.:** Desviación típica en función de la distancia a la pared de las fluctuaciones de velocidad  $u$  y  $v$ . Se comparan los resultados obtenidos con la base de datos de Torroja.

### 2.3.3. Estudio de percolación

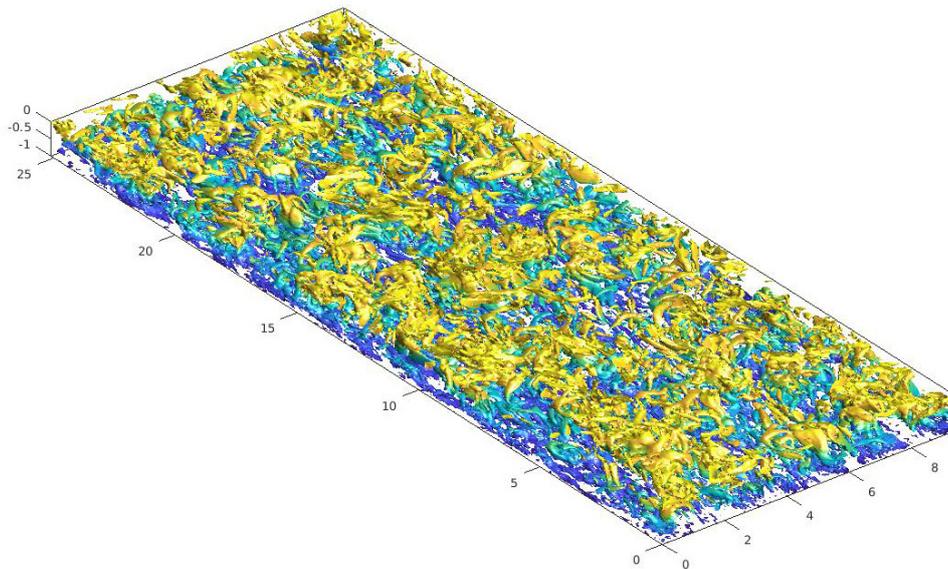
Físicamente los criterios propuestos separan el campo según si una variable es mayor que 0, debido a que existan autovalores con soluciones imaginarias. Sin embargo, desde el punto de vista práctico conduce a resultados confusos donde todas las estructuras coherentes parecen interconectadas y forma objetos complicados desde el punto de vista computacional y de análisis.

Para solucionar esto, se añade un parámetro cuyo valor determina la forma y el número de las estructuras encontradas en la simulación. A continuación, se justifica la elección del mismo.

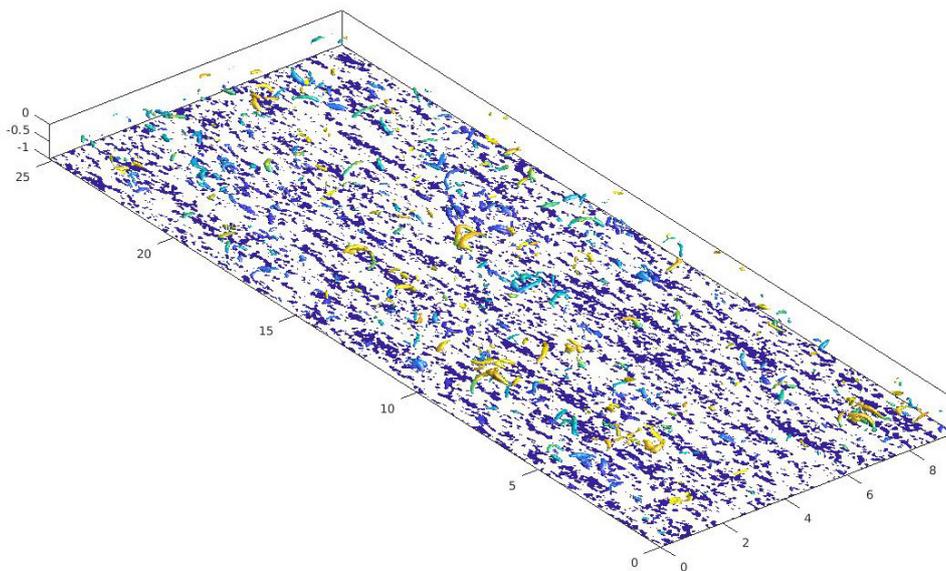
Si tomamos un valor muy cercano a cero (valor de  $\alpha_t$  poco restrictivo), se obtiene una estructura compleja en forma de esponja que conecta la mayoría de las estructuras coherentes encontradas formando un gran vórtice del tamaño del dominio. Este resultado se puede observar en la Figura 2.3, donde todo el dominio está ocupado por vórtices que se tocan entre sí.

En el lado opuesto, si el valor de  $\alpha_t$  es muy restrictivo, los vórtices quedan muy estilizados y los más pequeños directamente desaparecen. Es decir, el número encontrado se reduce mucho, y la información que ofrecen deja de ser adecuada, y solo se mantienen los hilos más turbulentos (núcleos de algunos vórtices). Este efecto se puede apreciar en la Figura 2.4.

Por lo tanto, mediante el estudio de percolación se pretende obtener un valor del umbral dentro de un rango que permita obtener vórtices de tamaño adecuado más allá de sus núcleos eliminando el ruido de estructuras muy pequeña sin interés práctico, pero que no genere una estructura esponjosa incapaz de diferenciar entre diferentes vórtices. Los resulta-



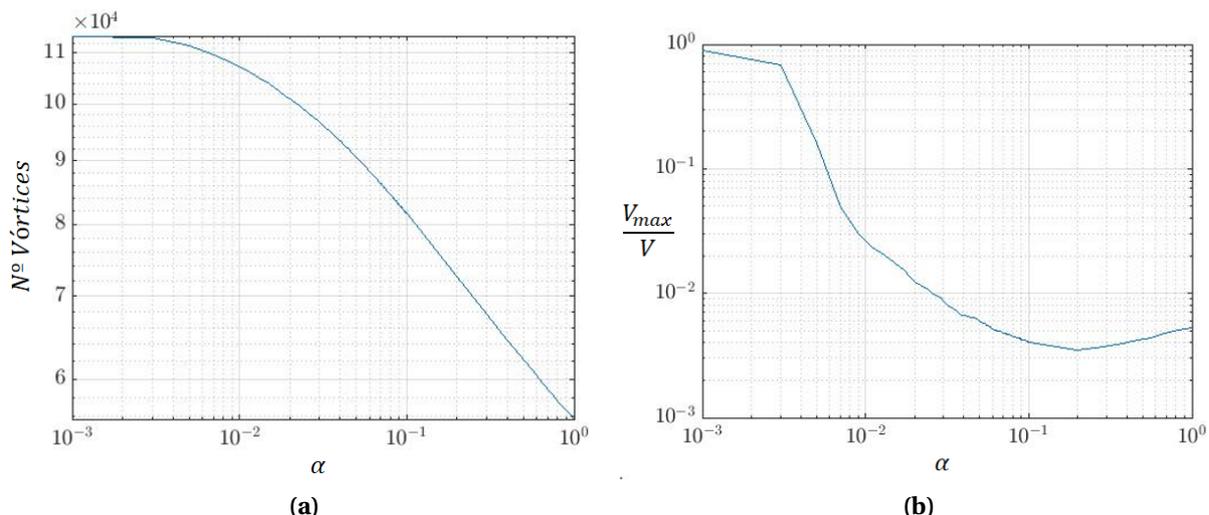
**Figura 2.3.:** Isosuperficies del criterio de vorticidad de Chong para  $\alpha = 0.001$ .



**Figura 2.4.:** Isosuperficies del criterio de vorticidad de Chong para  $\alpha = 1$ .

dos aparecen en la Figura 2.5.

Por un lado, (Figura 2.5(a)) tenemos el número de vórtices resultantes al variar el número del umbral  $\alpha_t$ . Conforme aplicamos un criterio más restrictivo el número de vórtices disminuye. En la Figura 2.5(b) se representa el volumen del mayor vórtice respecto al volumen de todo el conjunto. Cuando  $\alpha_t$  es muy grande (cercano a la unidad) se identifican pocos objetos de pequeño tamaño. Conforme el parámetro se hace menos restrictivo aparecen nuevos conjuntos de vórtices, mientras que otros ya existentes se juntan formando mayores objetos. La Figura muestra que al llegar a cierto punto la tendencia se vuelve constante y dejan aparecer vórtices nuevos. Sin embargo los ya existentes se siguen juntando formando la estructura de esponja. El hecho que en la Figura 2.5(a) llegue a una zona constante pese a que se forma



**Figura 2.5.:** (a) Número de vórtices encontrados en una caja  $8\pi h \times 3\pi h \times 2h$  respecto al parámetro  $\alpha$ . (b)  $V_{max}$  del vórtice más grande normalizado con el volumen ocupado por todos los vórtices representado frente a  $\alpha$ .

está esponja que engloba muchos racimos (aparentemente debería descender el número total), es debido a que se genera mayor ruido y se identifican como vórtices pequeños objetos de pocos puntos. Del Álamo propone un punto previo a la zona donde  $V/V_{max}$  se estabiliza. El punto donde la pendiente es máxima en la gráfica de la relación de volumen se conoce como crisis de percolación. Del Álamo propone como parámetro óptimo  $\alpha_t = 2.5\alpha_{critico}$ , siendo este punto crítico el correspondiente a la pendiente máxima.

Este proceso desarrollado se corresponde a una simulación de  $Re_\tau = 250$ , para reducir el coste computacional. En cuanto a la identificación de eventos  $Qs$ , se ha realizado un proceso análogo. Posteriormente estos resultados se pueden extrapolar a Reynolds de fricción mayores. De acuerdo con los resultados obtenidos, el estudio de percolación obtenido sale similar al encontrado en la bibliografía, por ellos para los *vortex cluster* usamos el valor de  $\alpha_t = 0.02$ , y para los *uv clusters* empleamos un valor de  $H = 1.75$ .

## 2.4. Energía de las estructuras coherentes y consideraciones finales

En este apartado se analiza la contribución energética de las estructuras coherentes halladas. Es decir, se diferencia entre la energía que llevan los puntos identificados como vórtices respecto a la energía total de todo el campo fluido. Los objetos identificados pretenden dar un enfoque más determinista al problema de la turbulencia y actuar como estructuras elementales que determinen el transporte de masa y energía.

En este trabajo se estudian 2 tipos de estructuras: los *cluster* de vórtices, también denominados por otros autores *hairpins*, caracterizados por una fuerte disipación; y los eventos  $Qs$  (*sweeps* y *ejections*, con  $uv < 0$ ), responsables principalmente de la transferencia de momento. Ambos producen jerarquías de estructuras bien definidas desde las regiones más cercanas a la pared (*buffer*) hasta la zona exterior, pasando por la capa logarítmica. Además, estas tienen tamaños suficientemente elevados para considerarlas estructuras coherentes.

En numerosos estudios se han evaluado la contribución de estas estructuras, haciendo referencia a la importancia que desempeñan en la capa logarítmica. Para que un canal turbulento desarrolle capa logarítmica es necesario un número mínimo de  $Re_\tau$ . Esta capa está limitada por dos condiciones:

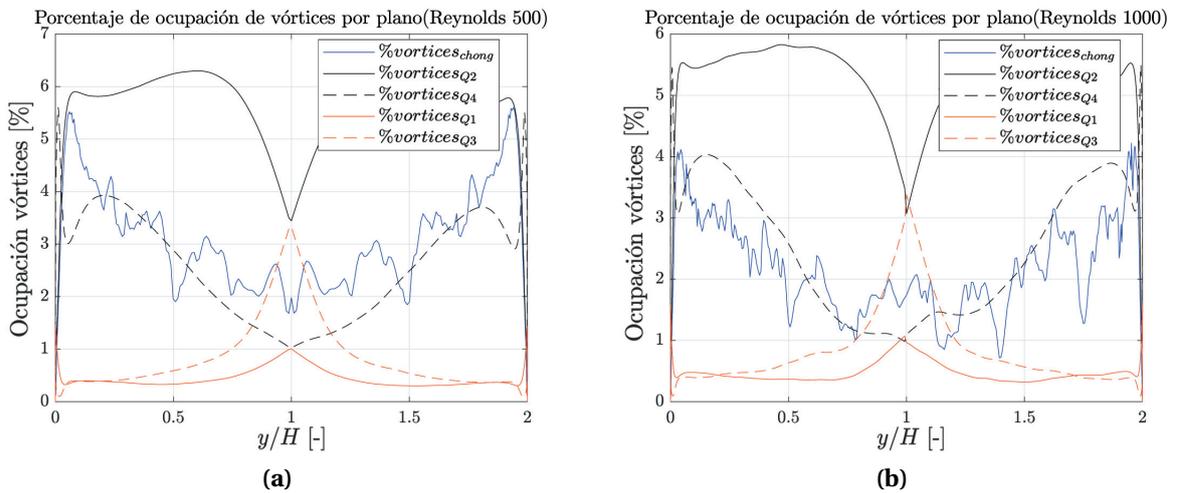
$$y^+ = y \cdot Re_\tau > \text{lower limit} \sim 100 - 200 \quad (2.20)$$

$$\frac{y}{H} < \text{upper limit} \sim 0.1 - 0.3 \quad (2.21)$$

Si se juntan estas dos condiciones se obtiene que el Reynolds de fricción debe ser del orden de 1000-2000 para que aparezca una capa logarítmica adecuada.

$$Re_\tau > \frac{\text{lower limit} \cdot H}{\text{upper limit}} \quad (2.22)$$

Un primer resultado importante es el porcentaje de ocupación en volumen de las estructuras coherentes estudiadas (Figura 2.6). Este resultado difiere entre los distintos autores, ya que depende directamente del criterio escogido. Por ejemplo, Del Álamo [15] obtiene una fracción de volumen de 2% – 3% para los *vortex clusters*, mientras que la obtenida por Tanahashi *et al.* [25] alcanza el 39%. Esta diferencia se puede explicar teniendo en cuenta que un criterio más restrictivo solo localiza los vórtices más intensos. En nuestro canal la fracción de volumen se asemeja más a la obtenida por Del Álamo, y se encuentra en un rango entre 2% – 4%, dependiendo de la distancia a la pared. En el caso de los *uv clusters*, se obtiene un porcentaje mayor que el de *uv clusters*. Este, además, depende del valor de parámetro  $H$ , y otros autores lo sitúan en un valor cercano al obtenido,  $H = 1.75$ .

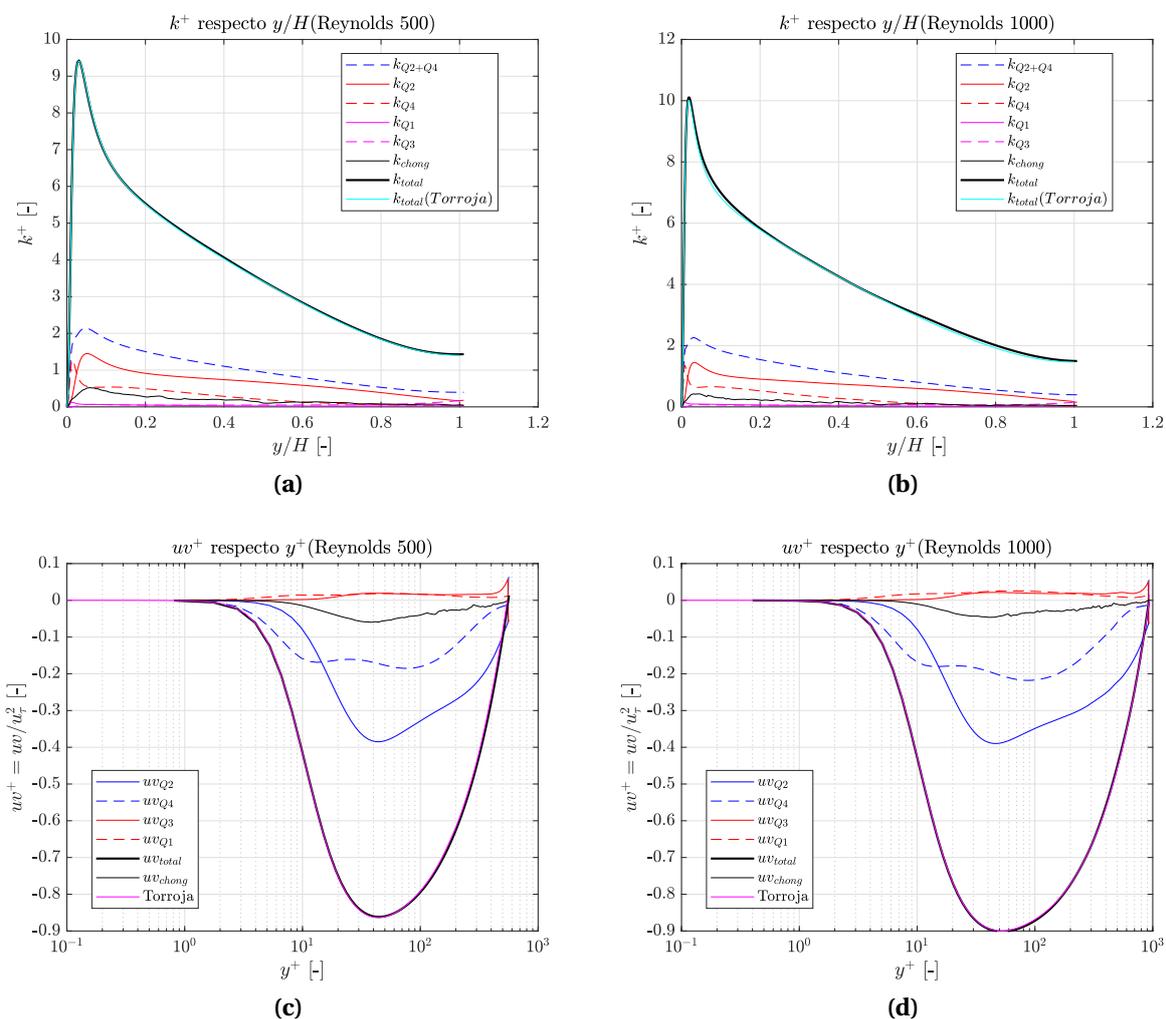


**Figura 2.6.:** Porcentaje de ocupación en volumen de cada tipo de estructura coherente respecto al total en función de la distancia a la pared (por planos). (a)  $Re_\tau = 500$ . (b)  $Re_\tau = 1000$ .

A pesar de que debería existir un equilibrio entre *sweeps* y *ejections*, aparecen más objetos de los últimos. Este fenómeno es acorde con lo obtenido por otros autores como Lozano-Durán [16], que describe la asimetría en media de *sweeps* y *ejections*. Si se toma como valor

del umbral  $H = 0$  sí que se obtendría el mismo porcentaje de ocupación de eventos  $Q^-$ s. Los resultados para los distintos números de Reynolds son similares. El caso de  $Re_\tau = 1000$  presenta una fracción ligeramente inferior al caso de  $Re_\tau = 500$ , sin embargo, esta diferencia no es significativa.

En la Figura 2.7(a y b) se observa como los eventos  $Q2$  y  $Q4$  suponen una importante contribución a la energía cinética turbulenta. A pesar se que los eventos  $Q2$  aportan más energía cinética al total, se debe a que tienen mayor ocupación de vórtices (misma contribución en proporción). Sin embargo, los *vortex cluster* tienen poca relevancia desde el punto de vista energético (su curva se encuentra muy por debajo de la de los *uv clusters*). Si se integra la curva se obtiene que las estructuras ( $Q^-$ ) con un 8% de volumen suponen un 25% de energía cinética turbulenta, es decir, su contribución es 3 veces mayor que la media.



**Figura 2.7.:** (a) y (b) Energía cinética turbulenta procedente de las diferentes estructuras identificadas adimensionalizada en unidades de pared respecto a la altura  $y/H$ , para distintos números de Reynolds. (c) y (d) Esfuerzo de Reynolds  $uv$  procedente de las distintas estructuras identificadas respecto a la distancia a la pared  $y$ , adimensionalizando en unidades de pared, para distintos números de Reynolds.

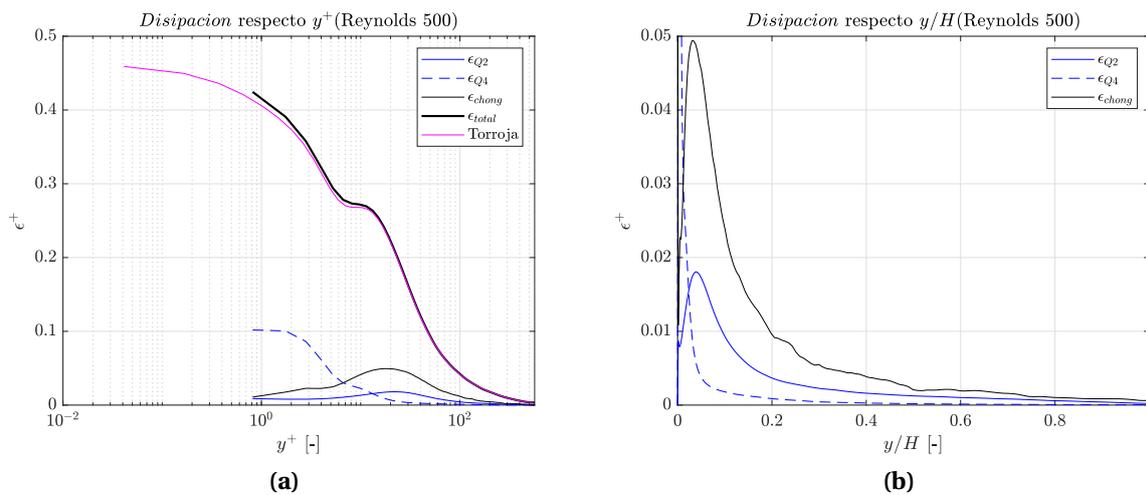
Jiménez ([26]) relaciona los resultados de energía (para los eventos  $Q^-$ s) en función de la ocupación de vórtices (introduciendo distintos valores de umbral en los criterios de identi-

ficación). Analiza la contribución de diversas magnitudes, entre ellas la fracción de energía cinética turbulenta debida a la velocidad normal a la pared  $v$ . Para una ocupación de 8–10% la contribución de las estructuras a la variable  $v^2$  es un mayor de un 40%. Los resultados obtenidos en nuestra simulación son inferiores y suponen aproximadamente un 31% del total, para ambos números de Reynolds.

En la Figura 2.7(c y d), se representa la contribución al esfuerzo de Reynolds discriminando por tipo de estructuras coherentes. Los eventos  $Q^-$ s, caracterizados por ser regiones con un valor de  $uv$  superior a la media, suponen una gran contribución al total, por lo que tienen una función dominante en el transporte de momento. Si se integra la curva se obtiene un 65% del total de  $|uv|$  para aproximadamente un 8% de ocupación del volumen (para *sweeps* y *ejections* de forma conjunta). Para esta magnitud, Jiménez ([26]) obtiene un 60% de la transferencia de momento total para un 7% de fracción de volumen, es decir un valor prácticamente igual al obtenido en nuestros resultados.

Al igual que con la energía cinética turbulenta, los *vortex cluster* no tienen una contribución proporcional a su ocupación mayor que el resto de los puntos del dominio.

Por lo tanto, tenemos unas estructuras *uv cluster* que tienen gran importancia en el transporte de momento y producción de la turbulencia, que deben tener un importante papel en la dinámica de la misma. Por otro lado, aparecen otras estructuras poco energéticas *vortex cluster* cuya importancia radica en que se caracterizan por una fuerte disipación. Esta conclusión se obtiene de la Figura 2.8, que relaciona la disipación aportada al total del dominio discriminando por estructuras coherentes estudiadas. En este caso, se puede observar que los *vortex cluster* presentan una gran disipación turbulenta, mayor que la generada en los eventos  $Q^-$ s. Si se integra la obtenida para todo el canal, se obtiene que con una ocupación del 4% la disipación supone un 27% del total. Del Álamo ([15]), obtuvo un 15% para un 1–2% de ocupación en volumen (algo mayor al alcanzado en este trabajo). El valor obtenido para los *vortex cluster* supone un 13% para un 8% de ocupación, es decir, una proporción bastante inferior.



**Figura 2.8.:** Disipación turbulenta en unidades de pared,  $\epsilon^+$ , aportada por las diferentes estructuras identificadas respecto a  $y$ , para  $Re_\tau = 500$ . (a) Incluye la disipación total y la obtenida con la base de datos de Torroja. (b) Sólo las estructuras vorticales.

Por lo tanto en los capítulos siguientes se van a analizar estática y dinámicamente las estructuras identificadas. Por un lado, los *uv clusters* están justificados por su importancia en el transporte turbulento, mientras que los *vortex clusters* pese a ser regiones menos energéticas se caracterizan por una alta disipación. Además es interesante su estudio para intentar hallar una posible relación entre los distintos tipos de objetos.

# 3

## Herramientas computacionales desarrolladas

### Índice

---

<b>3.1. Código de agregado de vórtices</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>3.2. Código de seguimiento temporal</b> . . . . .	<b>33</b>
3.2.1. Conexiones fáciles . . . . .	35
3.2.2. Conexiones difíciles . . . . .	35
3.2.3. Calibración . . . . .	37
<b>3.3. Código de actualización de la estructura</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>3.4. Memoria virtual</b> . . . . .	<b>39</b>

---

En este apartado se describe de forma somera el código desarrollado en la identificación de vórtices, agregado de estructuras y seguimiento temporal. Se abordará de forma secuencial, haciendo hincapié en los aspectos de mayor relevancia desde el punto de vista físico. Asimismo, se presentarán las limitaciones del código y los problemas que ellas acarrearán en el análisis posterior de los resultados.

El código ha sido desarrollado en Fortran 90, apoyándose en herramientas de computación paralela: MPI y OMP. Cada uno de estos enfoques (memoria distribuida o memoria compartida) tiene ciertas ventajas necesarias para ciertas partes del código. El código en su totalidad se compone de más de 6000 líneas y se encuentra acoplado con el código LISO, de manera que todo se resuelve al mismo tiempo, para evitar guardar grandes cantidades de memoria en disco.

El código LISO resuelve una DNS de un canal turbulento. Aplicando los criterios de identificación propuestos se genera una matriz booleana donde un 1 indica que ese punto pertenece a una región de vorticidad y un 0 que no ha pasado el criterio. Esta matriz es el punto de partida del código de agregación de vórtices. Esta matriz tiene un tamaño igual que la malla del DNS ( $m_x \times m_z \times m_y$ ).

El código se ha dividido en 4 grandes bloques claramente diferenciados, según la función que realizan. En todos se ha introducido paralelización siguiendo un esquema *master-slaves*, donde en nodo principal suele ser el nodo 0. El número total de procesadores se ha de dividir entre estos bloques y el código LISO, ajustándolo para que todos puedan ejecutarse al tiempo. Estos 4 bloques son:

- **Código de agregación de vórtices** a partir de los resultados obtenidos con los distintos criterios de identificación.

- **Código de seguimiento temporal de vórtices** a partir de la información de estructuras agregadas en instantes temporales consecutivos.
- **Actualización de la matriz temporal** incluyendo los resultados del bloque anterior
- **Módulo de memoria virtual** que permite las comunicaciones entre los distintos grupos de procesadores y el almacenamiento de datos en memoria RAM

### 3.1. Código de agregado de vórtices

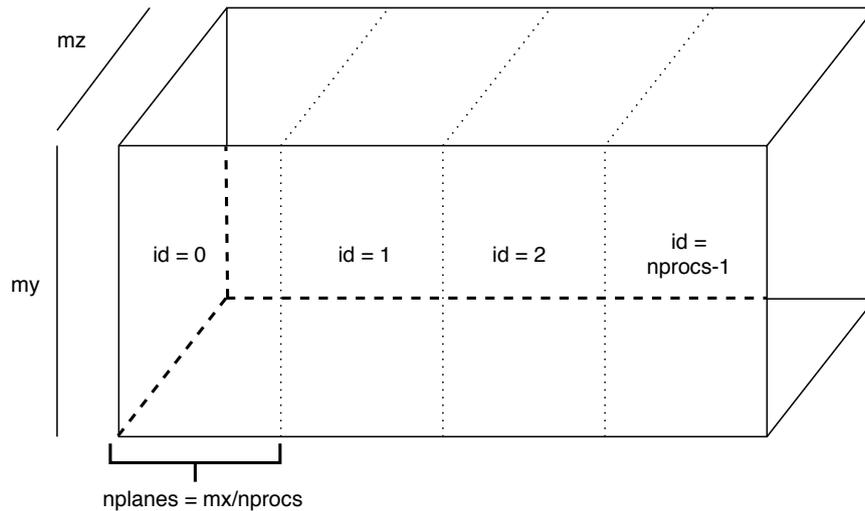
Una vez se tiene la matriz booleana de los puntos que cumplen el valor del umbral se clasifican en una estructura coherente mediante un algoritmo de acumulación. Para cada punto se define la conectividad con los seis puntos adyacentes en las tres direcciones según una malla numérica cartesiana.

Mediante un sistema de colas o pila que simula el funcionamiento de una función recursiva se van añadiendo los puntos que pertenecen a un vórtice de forma que cada punto que se añade incluye en la pila los 6 adyacentes si aún no han sido considerados como parte de la estructura. A su vez, a cada vórtice se le asigna un índice en una matriz auxiliar que evita la repetición y facilita problemas posteriores en la identificación. Sin embargo, debido a la paralelización del código cada procesador tiene únicamente una parte del dominio y para obtener información de las partes contiguas se deben realizar envíos de información mediante funciones MPI (principalmente **MPI\_SEND**, **MPI\_RECV** entre procesadores y **MPI\_BCAST** del nodo máster al resto de esclavos).

La división del dominio se ejemplifica en la Figura 3.1. Cada procesador abarca un conjunto de planos consecutivos en X, y se comunica con los procesadores adyacentes y con el nodo Máster (el nodo máster también realiza el análisis en su parte de dominio). Además, este último lee mediante *HDF5* datos necesarios respecto a la simulación que debe comunicar al resto de procesadores. El dominio tiene condiciones de contorno periódicas en la dirección X y en la dirección Z. Respecto a X, este problema se soluciona cuando se realiza las comunicaciones entre planos. Sin embargo, la simetría en la dirección Z se ha de llevar a cabo en el primer agregado por parte de cada procesador, y cuando un punto se encuentra en las posiciones correspondientes a las condiciones de contorno debe comprobar conectividad entre puntos separados  $mz$  elementos.

Esta división necesariamente añade complejidad al código ya que un vórtice puede atravesar varias divisiones. Por ello, en una primera parte cada procesador resuelve un problema de agregado aislado: se localizan los conjuntos de puntos conexos de cada parte del dominio obteniendo un mayor número de ellos, y se envía al nodo máster. Posteriormente, se realiza la unión de estructuras coherentes diferenciadas teniendo en cuenta la información entre planos, mediante un vector que indica conectividad a la derecha del plano o a la izquierda, con su respectivo índice. Este procedimiento también se emplea para determinar las simetrías en la dirección X (primer plano del primer procesador junto al plano del externo del último procesador).

Para llevar a cabo la conectividad entre planos cada procesador envía su último plano al procesador consecutivo y ambos se comparan (comprobación si tienen en la misma posición de la matriz un 1). Esta información se envía al nodo máster que es el que finalmente junta los vórtices y los guarda en un vector junto a unos índices que indican la extensión en puntos



**Figura 3.1.:** Esquema de la división del dominio computacional en función del número de procesadores.

del dominio de cada vórtice. Ambos vectores sirven para la reconstrucción completa de la matriz, y ésta a su vez para validar el funcionamiento adecuado del código.

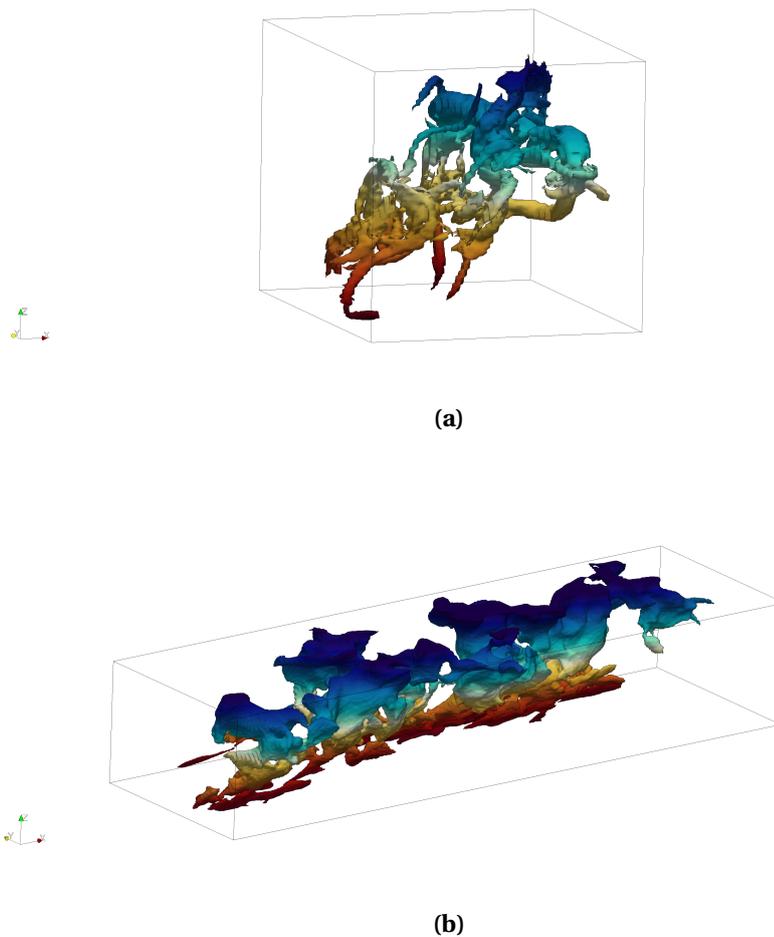
Esta información no es suficiente para la siguiente tarea del código, sino que se necesita calcular ciertas características de los vórtices como el volumen, el centro de masas o las dimensiones de una caja ficticia que lo envuelve. Para optimizar este proceso, se ha paralelizado de nuevo (mediante MPI) dividiendo la carga de trabajo entre todos los procesadores (hilos), repartiendo el mismo número de vórtices para cada procesador. Este reparto no divide la carga de trabajo de forma exacta entre los procesadores ya que los vórtices encontrados no tienen necesariamente el mismo número de puntos.

Finalmente se obtiene un archivo (**.vor**) con información de los puntos que forman las estructuras coherentes y de la morfología de los mismos. Todos estos campos, se agrupan en vectores para reducir el tamaño de los archivos (enteros o reales en función del tipo de información). Los vectores de datos se pueden guardar mediante *HDF5* en un archivo independiente para procesarlos y obtener resultados sobre las estructuras estáticas, o mantenerlos en memoria RAM hasta que sean utilizados por la segunda parte del código, mediante el sistema de memoria virtual.

## 3.2. Código de seguimiento temporal

En esta parte del código se obtiene la correlación temporal entre las estructuras tridimensionales anteriormente identificadas. Se parte de los vectores de información relativa en cada instante temporal. Este código compara dos archivos consecutivos (realmente es un número mayor al estar realizado de forma paralela) para luego enviar los resultados y almacenarlos en una matriz con toda la información temporal de la simulación. Los archivos consecutivos se encuentran separados 5 instantes temporales debido que de esta forma el LISO genera la matriz booleana (para reducir coste computacional sin influir prácticamente al procesado posterior).

Los intervalos de muestreo  $\Delta t_s$  crecen con  $Re_\tau$ , pero siempre son más pequeños que la es-



**Figura 3.2.:** Ejemplos de vórtices en un instante temporal. a) *vortex cluster*. b) *uv cluster*.

cala de tiempo de Kolmogorov. En concreto, para el  $Re_\tau = 950$  se obtiene este intervalo en unidades de pared:

$$\Delta t_s^+ = 0.6 \quad (3.1)$$

Cabe destacar que este código está preparado para introducir en cada instante los vórtices de Chong (*vortex clusters*) o los eventos  $Q^-$ s. Si se opta por lo segundo se debe incluir el tipo de estructura identificada en función del cuadrante (*sweeps* o *ejections*) ya que no se puede establecer conexión entre ellas.

La paralelización que lo controla se aborda mediante los dos enfoques clásicos. Por una parte se emplea MPI para calcular varios pares de instantes temporales a la vez. Esto se realiza de forma inmediata al estar programado mediante subrutinas que se pueden llamar de forma independiente. Por otro lado, la parte del código encargada de realizar la identificación de un par de instantes se paraleliza con un enfoque OMP. Se abre una región paralela con `$OMP PARALLEL`. Debido a que la memoria es compartida hay que tener cuidado con la escritura de datos. Las únicas variables de datos propias de cada procesador deben ser declaradas como privadas. La carga de trabajo se reparte de forma automática con `$OMP DO`, haciendo que cada hilo recorra una parte del vector de vórtices. Asimismo, en ocasiones es necesario que el cálculo solo se realice por un hilo para evitar sobrescribir resultados. Esto

es posible con el comando **\$OMP SINGLE**.

Este código se divide a su vez en dos partes: por una lado se encuentra un bucle rápido (que lo denominamos *conexiones fáciles* y por otro, uno lento y con mayor precisión (*conexiones difíciles*).

### 3.2.1. Conexiones fáciles

El primer bucle analiza y compara dos conjuntos de vórtices en función de características geométricas y solo establece conexiones directas. Estos parámetros se combinan de tal forma que entre dos estructuras su relación queda definida por un parámetro  $\bar{d}$  (distancia modificada). Para que las *conexiones fáciles* den un resultado como conexión directa se debe cumplir que el valor de este parámetro, el mínimo encontrado de entre todos los vórtices, sea menor que un umbral arbitrario determinado en un proceso de calibración y que la relación de volumen supere otro límite impuesto.

La definición de este parámetro (Ecuación 3.2) parte de la distancia entre centro de masas entre dos estructuras que se comparan adimensionalizando cada dirección entre la longitud de cada dimensión del dominio ( $l_x$ ,  $l_z$  y  $2h$ ). Este resultado se pondera con la relación de volumen entre los dos vórtices (si supera el valor establecido de  $V_{threshold}$  se descarta directamente).

$$\bar{d} = \sqrt{\frac{d_{CDM-X}}{l_x} + \frac{d_{CDM-Z}}{l_z} + \frac{d_{CDM-Y}}{2h}} / \min(V_{ratio}, 1/V_{ratio}) \quad (3.2)$$

El límite impuesto a la relación de volumen es un valor completamente arbitrario y determina el umbral para concluir si se considera un vórtice como hijo (*children* en los siguientes apartados) de otro o como su conexión directa para alcanzar un equilibrio entre una vida adecuada de un vórtice en cuanto a duración sin que experimente cambios muy abruptos de volumen. Este parámetro puede implicar que estos resultados difieran respecto a los de otros autores en lo relativo a la vida de un vórtice. Asimismo, este umbral también se introduce en las *conexiones difíciles*.

Este primer bucle se caracteriza por una gran velocidad y por relacionar la mayor parte de los vórtices encontrados (mediante conexiones directas), ya que es el caso más común entre pasos temporales sucesivos. Cada vórtice de un instante se compara con todos los del instante posterior mediante dos bucles anidados. Al no emplear los puntos exactos que conforman cada conjunto de vórtices no es capaz de relacionar todas las estructuras y es necesario validar sus resultados mediante el proceso de calibración. Por ello, surge la necesidad de idear un sistema que cubra todas estas particularidades que se quedan sin identificar.

### 3.2.2. Conexiones difíciles

La segunda parte de este bloque se corresponde con las *conexiones difíciles*. Suponen un mayor coste computacional que el anterior porque necesita información de todos los puntos pertenecientes a un vórtice. Sin embargo, solo se aplica a aquellos objetos que no han sido resueltos en el paso anterior.

El algoritmo se basa en superponer dos campos en la misma malla y determinar el número de coincidencias o puntos que se sobreponen entre ellas. Si hay alguna coincidencia se puede establecer una conexión (en principio indirecta). Sin embargo, se deben tener en cuenta dos consideraciones:

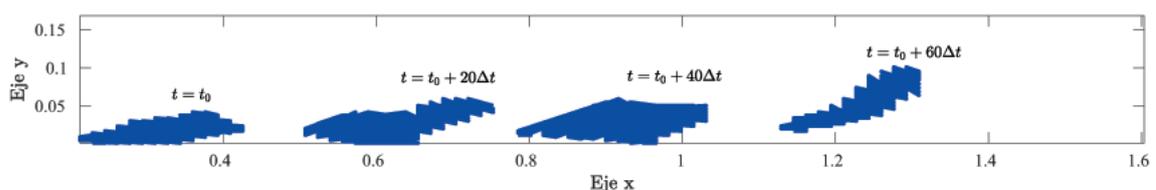
- Un vórtice puede tener coincidencias con más de una estructura del paso temporal siguiente. Por ello, el código acumula estas coincidencias, y determina con que estructura tiene un mayor porcentaje de solapamiento. Esto, junto a la relación de volumen determina qué estructura se define como conexión.
- El campo más avanzado en el tiempo se ha desplazado respecto al primero debido a la velocidad de advección. Por ello, todos los vórtices del segundo campo se atrasan tantas unidades de malla correspondientes  $u_s \Delta t$ . La velocidad de advección se estima como la velocidad media y varía en función de la distancia a la pared.

Asimismo, para reducir la carga de memoria (debido a que los campos son muy pesados), se realiza una reconstrucción parcial de la malla que solo incluye la región del dominio ocupada por la caja del vórtice que se está analizando. Si las estructuras del campo complementario intersecan esta caja se escriben en esta matriz parcial y se procede a determinar las coincidencias.

Este procedimiento se realiza dos veces, analizando el primer instante respecto al segundo y viceversa, siempre estableciendo conexiones indirectas. Finalmente, se comparan las nuevas conexiones establecidas y si un par de estructuras de cada uno de los campos han establecido una conexión indirecta, esta se convierte en directa (siempre que la relación de volumen supera el umbral establecido).

Un último filtro se puede incluir en las *conexiones difíciles* para incrementar el número de conexiones captadas. Algunos vórtices son muy pequeños y al desplazarse con la velocidad de advección no intersecan con su correspondiente vórtice del instante temporal anterior. El último filtro pretende solucionar este problema a cambio de incrementar el coste computacional. Parte de los resultados anteriores y analiza los objetos que no tienen ningún tipo de conexión, para establecer conexiones directas con algún vórtice que comparta este problema, o conexión indirecta con alguno mayor que cuente con cierto número de conexiones previas. Emplea como parámetros la distancia mínima entre las superficies de 2 conjuntos de puntos y la relación de volumen entre ellos. Además tiene en cuenta información relativa a las conexiones ya existentes de posibles candidatos.

Finalmente, el resultado que se obtiene de esta subrutina se trata de dos vectores con las conexiones, del primero respecto el segundo y viceversa.



**Figura 3.3.:** Representación bidimensional de diferentes instantes temporales de un vórtice (*ejection*) separados  $20\Delta t$  entre ellos.

### 3.2.3. Calibración

Para realizar las *conexiones fáciles* de forma adecuada es necesario calibrar ciertos parámetros del modelo. Entre ellos, los que se han estudiado son el parámetro que adimensionaliza cada una de las distancias entre centros de masa, el peso y la forma que incluir el volumen ( $d/(V_{ratio})^{cf}$ ) y el umbral que no deben superar para que se considere que existe conexión *fácil*.

El resultado final debe resultar en un equilibrio entre el porcentaje del total de conexiones que captan las *conexiones fáciles*, y el número de falsos positivos que queremos minimizar. Este error se puede considerar respecto al total de conexiones directas o respecto a las añadidas como fáciles (este siempre va a ser mayor). Cabe destacar que el error remanente suelen ser de estructuras muy pequeñas que posteriormente se considerarán ruido y se filtrarán al analizar los resultados.

Para llevarlo a cabo, se necesita hacer un estudio que resuelva el problema múltiples veces acumulando los resultados. Para ello, una vez resueltas las conexiones fáciles se vuelve a poner a 0, forzando de esta forma que se resuelva de forma íntegra mediante las *conexiones difíciles*, que las tomamos como solución correcta debido a su mayor precisión. Se han utilizado un gran número de archivos **.vor** y se ha calculado la media.

Los resultados respecto a la distancia entre centros de masas y el ratio de volumen son los mostrados en la Ecuación 3.2, adimensionalizando entre las dimensiones de la caja y  $cd = 1$ . Los resultados con respecto al umbral de distancia modificada se muestran resumidos en la Tabla 3.1. Los resultados mostrados son relativos a los *uv clusters*. Los *vortex clusters* requieren un proceso similar pero el error es ligeramente superior, ya que tener en cuenta la característica de tipo de estructura (*sweep* o *ejection*) facilita la identificación temporal de vórtices.

Umbral	% Total	Error(% rápidas)	(Error (% total)
0.05	74.5	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{-2}$
0.04	72	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$
0.03	66	$1 \cdot 10^{-2}$	$6.6 \cdot 10^{-3}$

**Tabla 3.1.:** Calibración.

Finalmente el valor seleccionado es  $\bar{d}_{threshold} = 0.05$ .

## 3.3. Código de actualización de la estructura

En el apartado anterior se obtiene información relativa a dos instantes temporales consecutivos. Es necesario acoplar todos estos pares en una estructura de datos (mediante *datatypes*) que contenga toda la información temporal desde el inicio. La información hasta ahora se trata de las características geométricas (Volumen, CDM, etc.) y de si tienen conexión directa o indirecta, y está recogida tanto en los archivos **.vor**, como en los vectores de **conexiones**. La información respecto al tipo de conexiones existentes se puede ampliar en función de otras propiedades como el orden de aparición de las estructuras coherentes para incluir la siguiente información

- **Nacimiento:** el origen de un vórtice puede ser espontáneo o surgir de una estructura de un paso temporal anterior a través de una separación.
- **Muerte:** la desaparición de un vórtice se puede deber a dos motivos, por un lado, disipación viscosa si en su último paso temporal no existe conexión con otra estructura, o la interacción con otros objetos (*children* o *partners*)
- **Evolución:** se asume que un objeto continúa la vida de otro si existe una conexión directa.
- **Divisiones:** un vórtice puede tener roturas que den lugar a otros vórtices *children*. Para ello un vórtice del primer instante temporal debe tener una conexión indirecta con otro de menor tamaño del siguiente instante.
- **Uniones:** El caso contrario al anterior se da cuando un vórtice se añade a otro mayor que no ha sido clasificado como conexión directa. Se denomina *partner*.

El funcionamiento de esta parte del código consta de múltiples subrutinas secuenciales cuyo fin es una estructura de datos con toda la información temporal guardada en un archivo **.time**. En primer lugar, es necesaria inicializar la estructura en el primer paso temporal. Básicamente, se trata en volcar la información de su **.vor** correspondiente hacia una estructura de datos más adecuada, introduciendo vórtice a vórtice.

Para llevar a cabo el siguiente paso es necesario la información contenida en el vector de **conexiones**. En primer lugar, se ha de determinar que estructuras coherentes continúan su vida, es decir, tienen una conexión directa con el siguiente instante temporal. Estos van a tener una dimensión o elemento más en la matriz o vector correspondiente. Se actualizan los datos relativos a estos vórtices en una nueva matriz. El resto de vórtices son considerados muertos, y se copian y se añade el tipo de muerte (muerte espontánea o por interacción).

El siguiente paso es añadir los vórtices del paso temporal siguiente que no han sido considerados como continuación del paso anterior. Pueden ser *children*, *partners*, o nuevas incorporaciones. La inclusión de estos objetos es independiente, sin embargo, el proceso es análogo. Primero se cuenta en número de elementos nuevos que se van a añadir. Se definen las dimensiones de las nuevas matrices en función del dato anterior y se añade toda la información relativa a las nuevas incorporaciones.

Se realiza este proceso de forma consecutiva con todos los instantes temporales hasta abarcar la simulación completa. La forma de guardar la información es en una estructura de datos compuestas de matrices y vectores, algunos de los cuales son índices que delimitan las características pertenecientes a cada vórtice (características que tienen un valor por cada instante temporal). De esta forma, se evita guardar una matriz con una dimensión por cada paso temporal que estaría prácticamente vacía, ya que los vórtices tienen una vida muy inferior al tiempo de simulación.

La información final que se guarda en el archivo **.time** incluye:

- **createstep:** Instante temporal en el que aparece por primera vez un vórtice.
- **split:** Indica si es *children* de otro vórtice, señalando el índice correspondiente.
- **endstep:** Instante temporal en el que desaparece un vórtice.
- **join:** Indica si un vórtice se ha unido a otro, señalando su índice.

- **nsteps**: Número de pasos que vive un vórtice.
- **nchildren**: Número de objetos que derivan de un vórtice a lo largo de su vida.
- **npartner**: Número de objetos que se han unido a un vórtice a lo largo de su vida.
- **timecreate**: Tiempo físico de creación de un vórtice desde el inicio de la simulación.
- **timeend**: Tiempo físico de muerte de un vórtice desde el inicio de la simulación.
- **nstepsacum**: Vector que delimita las filas de *V*, *CDM* y *strvorstep* que pertenecen a cada vórtice.
- **V**: Vector que contiene el volumen de todos los vórtices en todos los instantes temporales.
- **CDM**: Matriz que contiene el dentro de masas de todos los vórtices en todos los instantes temporales.
- **strvorstep**: Vector que contiene el índice de cada vórtice respecto a su archivo **.vor**.
- **nchildrenacum**: Vector que delimita las filas del vector *children* que pertenecen a cada vórtice.
- **children**: Vector con los índices (respecto al **.time**) de los *children* de todos los vórtices.
- **npartnernacum**: Vector que delimita las filas del vector *partner* que pertenecen a cada vórtice.
- **partner**: Vector con los índices (respecto al **.time**) de los *partner* de todos los vórtices.
- **border**: Matriz que contiene las dimensiones de la caja de todos los vórtices en todos sus instantes temporales.
- **type**: Vector indicando si un vórtice es un *sweep* o un *ejection* (para los uv cluster)

## 3.4. Memoria virtual

Esta parte del código sirve para acoplar el resto de módulos y subrutinas entre ellas y el LISO. La mayor parte del código está paralelizado para poder abordar en tiempos razonables el problema que nos ocupa. Se trata de un problema con un alto coste computacional y cuando el  $Re_\tau$  es considerable es necesario ejecutarlo empleando un gran número de procesadores o hilos. Por ello, el número de procesadores totales se dividen en 3 grupos que sólo resolverán una parte del código. Las principales herramientas para proceder son **MPI\_COMM\_SPLIT**, que genera los 3 grupos y les asigna un identificador y **MPI\_INTERCOMM\_CREATE**, que crea un intercomunicador para posibilitar los envíos y recibos entre distintos grupos.

- Primer grupo: es el encargado de resolver el LISO.
- Segundo grupo: se encarga tanto de realizar la agregación como la identificación temporal.
- Tercer grupo: se trata de la memoria virtual.

El objetivo principal de la memoria virtual es realizar de forma ordenada las comunicaciones entre los distintos grupos y almacenar matrices de datos hasta el momento de su utilización.

Se trata de una función crítica necesaria para que todo funcione correctamente. Es esencial, a su vez, que la repartición de procesadores sea adecuada para que una parte no vaya mucho más rápida que otra. Este problema supondría, además de que el código no funcionaría de forma óptima, que podría llegar un punto que muchas matrices se acumularían esperando a ser operadas por un grupo distinto de procesadores y se desbordaría la capacidad reservada de la memoria virtual.

Los envíos y recibos se controlan a través de *flags* (que indican la tarea a realizar por esta parte del código) y algunos parámetros que regulan el número de archivos almacenados. Entre ellos destaca: el parámetro que regula el número instantes temporales independientes calculados necesarios para dejar paso a la correlación de los mismos (identificación de la evolución temporal); y el contador que indica que matriz ha sido guardada y donde se empiezan a guardar los datos recibidos a continuación. Los envíos y recibos se realizan a través de herramientas recurrentes de MPI.

Se trata, en general, de un código extenso y complejo. Está diseñado para manejar matrices de gran tamaño de forma eficiente. Está preparado para abordar un problema de  $Re_{\tau} = 2000$  con caja de menor tamaño. Sin embargo, presenta problemas, que se describirán junto a posibles soluciones en un capítulo posterior.

# 4

## Estudio de la estática de las estructuras coherentes

### Índice

---

<b>4.1. Clasificación de los objetos identificados</b> . . . . .	<b>42</b>
<b>4.2. Caracterización geométrica y posición de las estructuras ligadas a la pared</b>	<b>44</b>
4.2.1. Tamaño de la caja . . . . .	44
4.2.2. Forma de los objetos individuales . . . . .	48
4.2.3. Posición de las estructuras coherentes . . . . .	50
<b>4.3. Relación entre los distintos tipos de objetos</b> . . . . .	<b>52</b>

---

En este capítulo se estudian los vórtices de forma independiente, sin correlacionar los distintos instantes temporales. Por lo tanto, mediante una gran base de datos de las propiedades geométricas de estas estructuras se analizan los resultados, apoyándose principalmente en funciones de densidad de probabilidad bidimensionales.

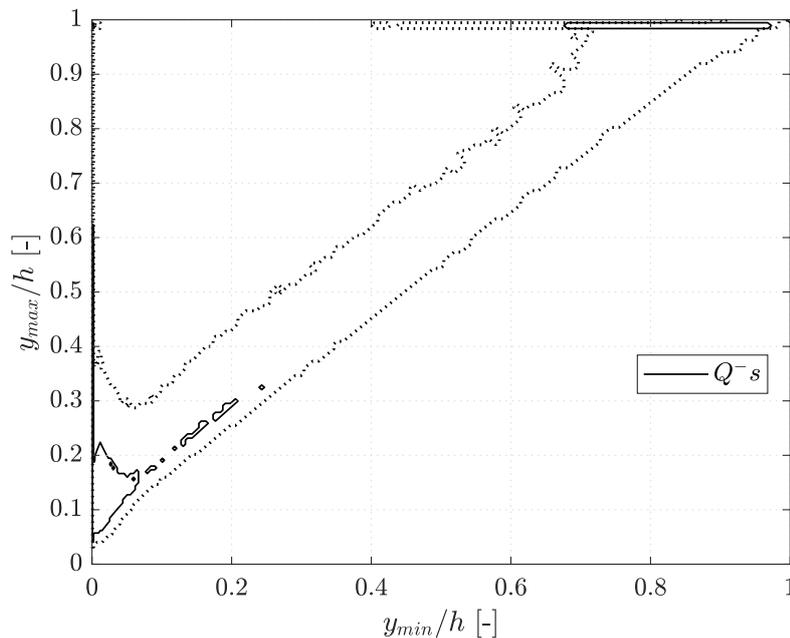
Hasta ahora se han definido los criterios empleados en la identificación de vórtices y los resultados energéticos. Por un lado se ha estudiado el criterio de Chong, cuyo resultado son los paquetes de *hairpins* o *vortex cluster*, y por otro lado, los eventos de cuadrantes  $Q_s$ , en concreto los de mayor relevancia energética: *sweeps*( $Q_4$ ) y *ejections*( $Q_2$ ).

La contribución energética de los objetos identificados ya ha sido analizada en 2.4. Ahora, el objetivo es determinar si se repiten ciertas características comunes en los objetos identificados, para concluir si aparece autosemejanza espacial. Por lo tanto, se va a determinar la forma de estas estructuras respecto a tamaño, posición y relación entre sus longitudes características, y si estos objetos de alguna manera se asemejan a los propuestos por otros autores como el modelo de torbellino ligado de Townsend ([11]), o su reelaboración propuesta por Perry y Chong (posteriormente este modelo ha sido refinado por Perry *et al.* [27]). Estos autores describen la turbulencia de pared como bosques de torbellinos autosemejantes ligados a la pared distribuidos de forma homogénea y aleatoria, y con forma de horquilla. Otros, optan por un estudio de los eventos de los cuadrantes, *sweeps* y *ejections*, caracterizados por objetos relacionados en pares de los cuales uno surge por un levantamiento de un *streak* de baja velocidad de corriente y el otro es consecuencia de la conservación del momento.

Las estructuras siguen los criterios de identificación ya comentados, en simulaciones que oscilan entre  $Re_\tau = 180 - 1000$ , realizadas mediante el código LISO. El dominio computacional es suficientemente amplio para que aparezcan estructuras grandes en la región logarítmica y exterior de la capa límite.

Antes de analizar los resultados obtenidos, cabe destacar que una parte de los vórtices se descartan. En concreto, aquellos objetos con un volumen menor de 30 unidades de pared se filtran para evitar problemas de resolución de la malla. Es decir, se consideran como ruido del criterio de identificación y no se reflejan en las estadísticas. Sin embargo, su aportación al volumen global es reducida. En el caso de los eventos  $Q^-$ s, empleando este filtro se descartan el 74% de los objetos encontrados, pero solo suponen un 1.2% del volumen total. En el caso de los *vortex clusters* para obtener un resultado similar se debe reducir el valor a  $V^+ < 20^3$ .

## 4.1. Clasificación de los objetos identificados

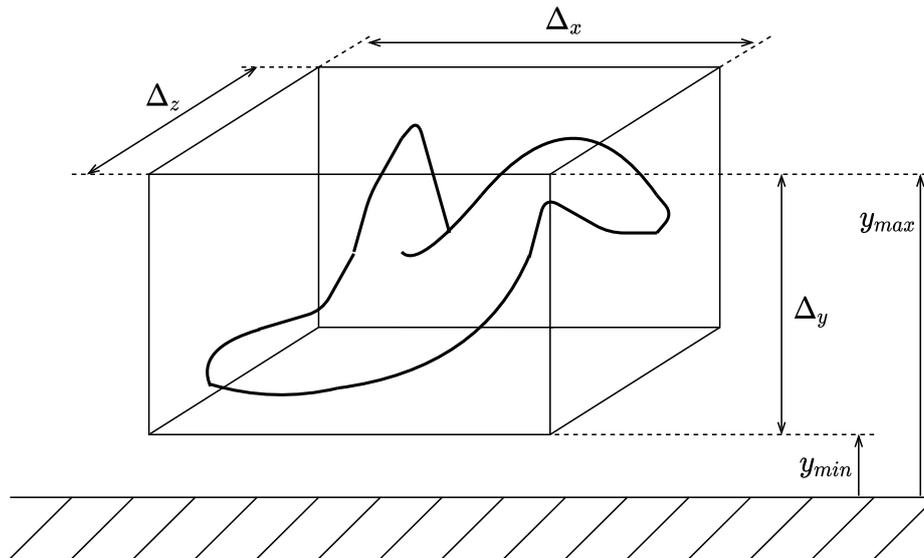


**Figura 4.1.:** Función de densidad de probabilidad de la distancia mínima y máxima a la pared de los objetos  $Q^-s$ ,  $J(y_{min}, y_{max})$ . Contornos mostrados 0.5 y 0.9.

La Figura 4.1 representa la función de densidad de probabilidad (p.d.f) de distancia mínima ( $y_{min}$ ) y máxima ( $y_{max}$ ) respecto a la pared de los vórtices encontrados (en concreto de los *sweeps* y *ejections*). Ambas medidas se toman según se indica en la Figura 4.2. Si las estructuras fueran completamente homogéneas la magnitud dependería solo de  $y_{max} - y_{min}$ , sin embargo se observa una acumulación cercana a la pared ( $y_{min}$  pequeña, próxima a la pared), que no se mantiene con  $y_{min}$  en zonas más exteriores. Por lo tanto, esta Figura concluye que deben dividirse en dos grupos o familias según su longitud y distancia mínima a la pared.

Esta distinción para los paquetes de *hairpins* fue referida por Del Álamo ([15]) con resultados análogos. Posteriormente Lozano-Durán obtuvo resultados similares para los eventos de cuadrantes, y estableció las mismas categorías. Estas categorías tratan de separar lo obtenido en la Figura 4.1, en dos partes según su valor de  $y_{min}$ .

El primer grupo, por tanto, está formado por una banda vertical con  $y_{min}^+ < 20$ , y se denominan vórtices ligados a la pared, ya que surgen en las zonas cercanas a la pared. La segunda



**Figura 4.2.:** Esquema de la caja que engloba un vórtice y de las distancias relativas a la pared.

banda abarca el resto del dominio y se denominan vórtices desligados. A diferencia de lo mostrado en la Figura 4.1, si se analizan estos grupos de objetos por separado, sus p.d.f.s no dependen de la distancia a la pared, sino de la longitud vertical que ocupan.

Según se comprobó en el apartado de energía, los Q2 y Q4, son los principales responsables del transporte de momento (65% del total del transporte de Reynolds  $|uv|$ ), con una ocupación del 8% del volumen del dominio, que concuerda con lo visto en la literatura. Lozano Durán ([16]) concluye que son los vórtices ligados los que contienen la mayor parte de esta energía, mientras que los desligados tienen un rol secundario, se caracterizan por una mayor disipación, asemejándose a los *vortex clusters* (también en tamaño).

Analizando los resultados de esta clasificación, se ha obtenido que los Q2 y Q4 pertenecientes a los vórtices ligados incluyen entre el 40% y el 50% de los eventos  $Q^-$ s, pero suponen un 75% del volumen total de estas estructuras. El resto del volumen prácticamente pertenece a los Q2 y Q4 desligados, mientras que los eventos Q1 y Q3 no tienen casi presencia.

En consecuencia, por un lado, tenemos unas estructuras pequeñas y homogéneas alejadas de la pared que no contienen gran parte de energía. Según algunos autores estos objetos se caracterizan por cajas cúbicas. Esto no significa que su forma sea homogénea, pero sí que estén homogéneamente orientados. Esta orientación isotrópica de los Qs desligados concuerda con el criterio de Corrsin, que afirma que los torbellinos están isotrópicamente orientados cuando sus gradientes son mayores que el esfuerzo tangencial medio. Los vórtices o torbellinos desligados han sido ampliamente estudiados (Jiménez *et al.* [28]), y generan fluctuaciones en todas las escalas de la región de la pared. Por su intenso estudio, y por su rol secundario, no serán objeto del siguiente análisis.

Por el otro lado aparecen estructuras ligadas a la pared debido a su distancia mínima a la misma. Se trata de estructuras que crecen desde la región de la pared y van aumentando su tamaño. Sin embargo, pese a nacer cerca de la pared, son estructuras grandes que contienen gran parte del volumen, atravesando gran parte del dominio. Además, son las responsables principalmente del 60% del esfuerzo de Reynolds para  $H = 1.75$ . Esta contribución puede ser mayor si se incrementa el valor del parámetro umbral  $H$ . Dentro de los eventos  $Q^-$ s,

los Q2 son predominantes. Esta asimetría apareció desde hace tiempo en diversos estudios (Nakagawa y Nezu [29]), y ha sido discutida ampliamente por ciertos autores, como Hoyas y Jiménez [20]), que dicen que se debe a la no homogeneidad presente en el perfil de velocidad medio.

Algunos autores, además, distinguen dos subgrupos dentro de esta categoría: los ligados bajos y los ligados altos. Para formar parte del segundo grupo estos deben alcanzar la capa logarítmica, es decir, tener un  $y_{max} > 100$ .

Debido a que son los responsables de la mayoría de la transferencia de momento y contienen la mayoría del volumen de los objetos encontrados en el siguiente apartado nos centraremos en analizar este tipo de estructuras. No se ha realizado distinción dentro de los vórtices ligados, sin embargo, al aplicar el filtro del volumen, se descartan la mayor parte de los vórtices pequeños cercanos a la pared. En el siguiente capítulo, si se tendrá en cuenta al analizar la evolución temporal.

## 4.2. Caracterización geométrica y posición de las estructuras ligadas a la pared

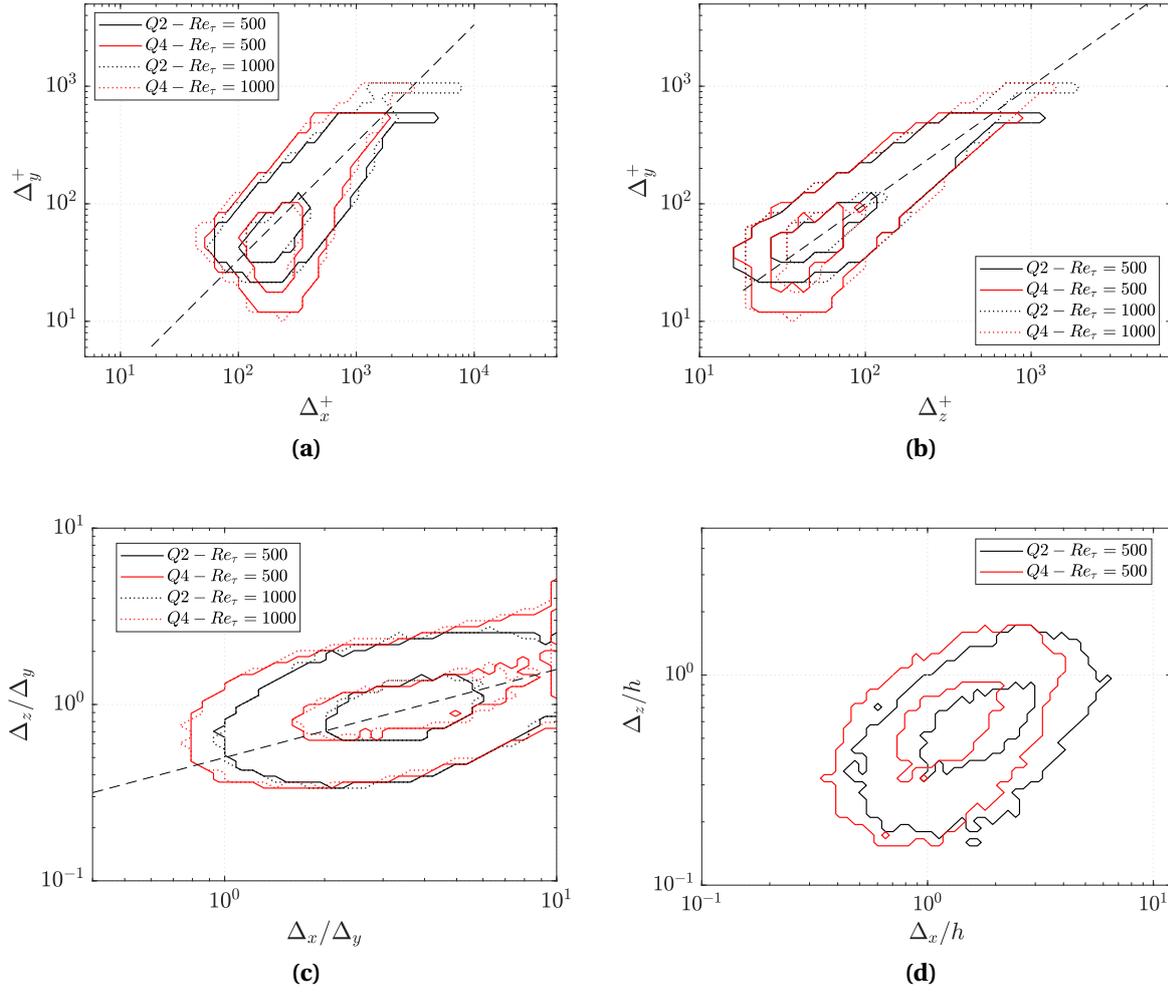
### 4.2.1. Tamaño de la caja

En este apartado se analizan los tamaños de las cajas que engloban cada vórtice ligado a la pared, que son los que tienen mayor interés desde el punto de vista de la energía del campo (y por lo tanto de la dinámica).

La Figura 4.2 muestra un esquema de lo que se considera caja de un vórtice, un paralelepípedo con sus tres lados alineados con la malla cartesiana. La caja está formada por las tres longitudes características de un vórtice, y relacionándolas mediante p.d.f.s se obtiene información de cómo son los vórtices que aparecen en el campo fluido debido a la turbulencia.

En primer lugar, en la Figura 4.3 se observan las distribuciones y relaciones de estas longitudes para los *uv clusters*, mediante p.d.f.s  $J(\Delta_x^+, \Delta_y^+)$ ,  $J(\Delta_z^+, \Delta_y^+)$ ,  $J(\Delta_x/\Delta_y, \Delta_z/\Delta_y)$  y  $J(\Delta_x/h, \Delta_z/h)$ . Los resultados se han representado tanto para  $Re_\tau = 500$  y  $Re_\tau = 1000$ , obteniendo resultados similares si se representan de forma adimensional. A su vez, se han diferenciado los eventos del segundo cuadrante de los del cuarto.

En primer lugar, la relación entre las longitudes que conforman la caja con la altura sigue una relación más o menos lineal, sin mucha dispersión en las p.d.f.s, tanto en X como en Z. En la Figura 4.3(a), se observa que los vórtices son más alargados en la dirección X que en la dirección Y. Los datos se concentran alrededor de  $\Delta_y^+ \approx 70$  y  $\Delta_x^+ \approx 200$ , mostrando el mayor alargamiento de la dirección X. Si se trazara una recta (mostrada en la Figura) por los puntos más probables de la p.d.f se obtendría la relación lineal 4.1. En la dirección Z se observa una tendencia similar en cuanto a la distribución de los datos concentradas alrededor de una recta. En este caso la relación de tamaños se define mediante la Ecuación 4.2. Las diferencias de alargamiento entre la dirección longitudinal y transversal se observan también de forma clara en la Figura 4.3(c), donde en la dirección X se concentran en valores de  $\Delta_x$  de 2 a 3 veces mayor que la longitud en Y, mientras que en la dirección Z se concentran en una franja menos ancha alrededor de  $\frac{\Delta_z}{\Delta_y} = 1$ .



**Figura 4.3.:** Conjunto de p.d.f.s logarítmicas de los tamaños característicos de las cajas que engloban los objetos identificados ligados a la pared ( $Q^-$ s) diferenciando entre *sweeps* ( $Q4$ ) y *ejections* ( $Q2$ ) y entre  $Re_\tau = 500$  y  $Re_\tau = 1000$  (excepto en la Figura (d) debido a que el colapso de curvas dificultaba su lectura). (a)  $J(\Delta_x^+, \Delta_y^+)$ , (b)  $J(\Delta_z^+, \Delta_y^+)$ , (c)  $J(\Delta_x^+/\Delta_y^+, \Delta_z^+/\Delta_y^+)$  para todo el canal. (d)  $J(\Delta_x^+/h, \Delta_z^+/h)$  para las estructuras con  $0.5h < \Delta_y < 0.95h$ . Contornos de 0.5 y 0.99 para todas las Figuras. Se han añadido líneas discontinuas que representan las siguientes relaciones : (a)  $\Delta_x^+ = 3\Delta_y^+$ ; (b)  $\Delta_z^+ = \Delta_y^+$ ; (c)  $\Delta_z^2 = 4\Delta_y\Delta_x$ .

$$\Delta_x \approx 2 - 3\Delta_y \quad (4.1)$$

$$\Delta_z \approx \Delta_y \quad (4.2)$$

Los diferentes tipos de estructuras presentan comportamientos similares y no hay una desviación notable entre *sweeps* y *ejections* respecto al tamaño. Las ligeras diferencias se pueden ver en la Figura 4.3(c), en la que si aparece un desplazamiento entre ambas. Los *ejections* son más estrechos y alargados que los *sweeps*. También se observa la existencia de más *sweeps* por debajo de  $\Delta_y^+ < 15$ . Esto puede ser debido a que su componente de velocidad normal media las aplana al desplazarse contra la pared. Así estas estructuras podrían coincidir con los *streaks* de alta velocidad referidos por Jiménez [28].

Asimismo, comparando los resultados para distintos número de Reynolds, se observa que las gráficas prácticamente colapsan. Sin embargo, en las Figuras 4.3(a) y (b), se puede apreciar como al aumentar el Reynolds de fricción también se incrementa el tamaño de las estructuras más grandes del dominio. Este resultado se evidencia para  $\Delta_y^+ > 600$ .

Pese a existir una relación lineal entre cada dimensión con la altura de la caja,  $\Delta_y$ , la Figura 4.3(c) evidencia que para un tamaño similar de esta, las distribuciones de  $\Delta_z$  y  $\Delta_x$  son no-lineales. En esta ocasión, los datos están más dispersos, y como se puede observar en la Figura, se concentran alrededor de la curva discontinua que presenta la siguiente relación:

$$\Delta_x \Delta_y \propto \Delta_z^2 \quad (4.3)$$

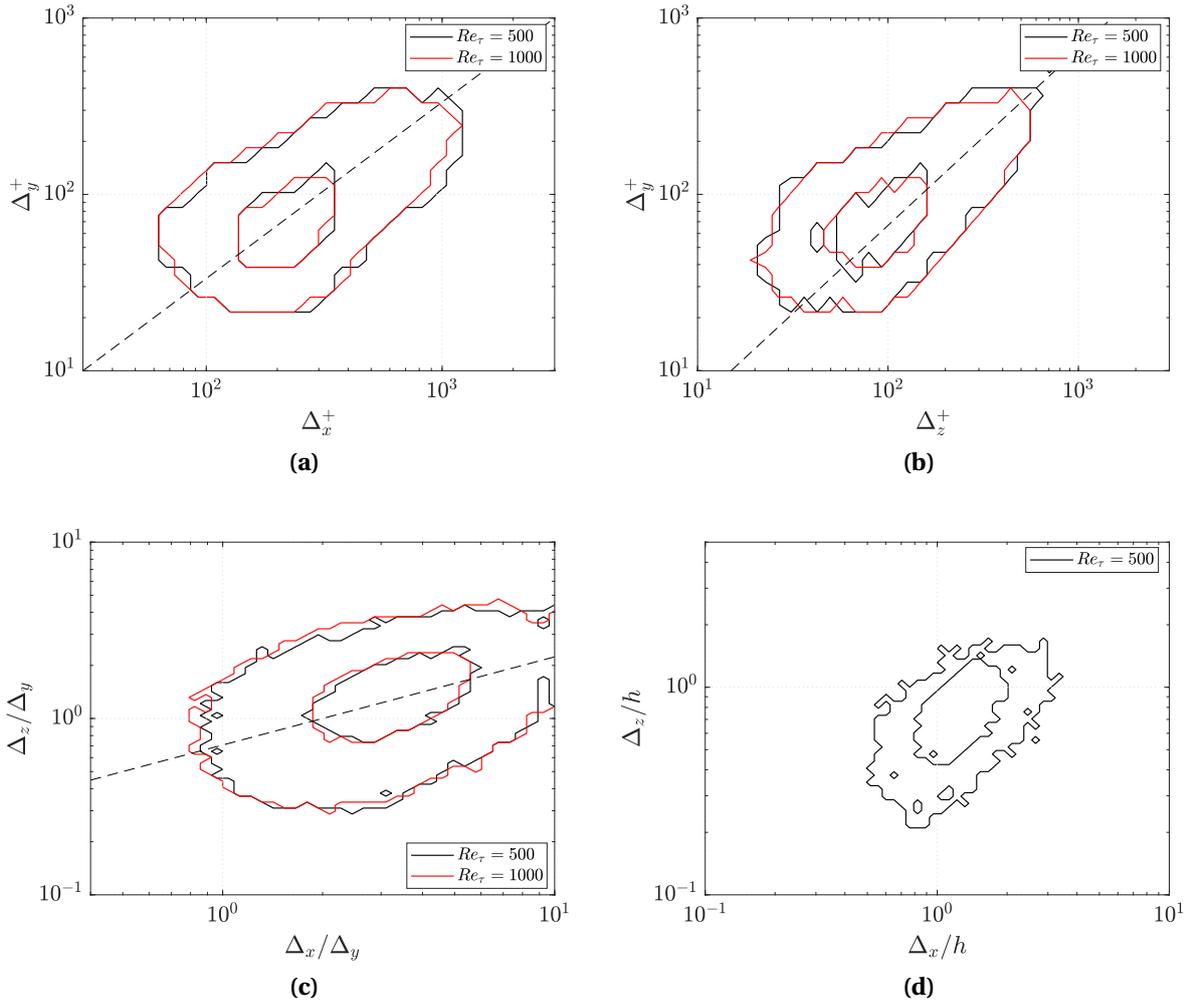
Este resultado indica que hay más variación en  $\Delta_x$  que en  $\Delta_z$  para una altura similar de vórtice. Esta mayor no homogeneidad en X se puede deber a que los mecanismos de deformación son distintos en los dos ejes. Flores y Jiménez [30] explican este efecto sugiriendo que la deformación en X es debido a los esfuerzos cortantes de la pared, mientras que en Z es debido a la turbulencia del dominio). Además no presenta dependencia(diferente comportamiento) con el  $Re_\tau$ .

En la Figura 4.3(d) se representa la p.d.f de los tamaños  $\Delta_x$  y  $\Delta_z$  adimensionalizados por la altura del canal  $h$ . Se han representado las estructuras cuya altura se encuentra entre  $0.5h < \Delta_y < 0.95h$ , es decir los objetos más grandes del dominio. Si se hubieran tomado todos los vórtices la gráfica se desplazaría a la izquierda con tamaños significativamente inferiores. Se puede observar que las estructuras más grandes de la simulación se corresponden con *ejections* que tienen tamaños de  $\frac{\Delta_{x_1}}{h} > 5$  (se corresponden con vórtices ligados altos principalmente), volviendo a reforzar la idea de la asimetría ente Q2 y Q4. Sin embargo, son ligeramente inferiores a los tamaños obtenidos por otros autores. Cabe destacar, que este resultado depende más del Reynolds de fricción. Lozano-Durán ([16]) describe algunas estructuras considerablemente más grandes que se dan para  $Re_\tau = 2000$ , en la región logarítmica, anticipadas anteriormente por otros autores. Sin embargo, en este estudio no se ha alcanzado tal número de Reynolds por lo que no se ha obtenido estructuras tan grandes (También hay que destacar, que el tamaño de las estructuras obtenidas depende del estudio de percolación llevado a cabo). De acuerdo con Jiménez [28], estas estructuras grandes son las principales responsables del transporte de esfuerzo de Reynolds.

En la Figura 4.4 se representan los resultados de los *vortex cluster* para las p.d.f.s correspondientes. Pese a seguir una tendencia similar, los resultados obtenidos se caracterizan por estar menos concentrados y, en general por ser estructuras más pequeñas. A lo largo del análisis han aparecido más objetos a pesar de que la matriz booleana de identificación de vórtices encontraba una cantidad similar de puntos que superaban el criterio. Las relaciones entre las dimensiones de la caja tampoco se mantienen, pero si la linealidad entre la longitud y anchura con la altura de los objetos (Figuras 4.4 (a) y (b)). Para estas estructuras se obtiene que son aproximadamente más anchos en proporción:

$$\Delta_x \approx 3\Delta_y \quad \Delta_x \approx 1.5\Delta_y \quad (4.4)$$

Asimismo, se encuentra que al aumentar el Reynolds el tamaño máximo de las estructuras grandes crece, alcanzando valores (Figura 4.4(d)) de  $\frac{\Delta_{x_1}}{h} > 3$  (que es menor que los obtenidos para los  $Q^-$ s). Por último, al igual que con los  $Q^-$ s, si se toma un valor constante de



**Figura 4.4.:** Conjunto de p.d.f.s logarítmicas de los tamaños característicos de las cajas que engloban los objetos identificados ligados a la pared (*vortex cluster*) diferenciando entre  $Re_\tau = 500$  y  $Re_\tau = 1000$ . (a)  $J(\Delta_x^+, \Delta_y^+)$ . (b)  $J(\Delta_z^+, \Delta_y^+)$ . (c)  $J(\Delta_x^+/\Delta_y^+, \Delta_z^+/\Delta_y^+)$  para todo el canal. (d)  $J(\Delta_x^+/h, \Delta_z^+/h)$  para las estructuras con  $0.5h < \Delta_y < 0.95h$ , para  $Re_\tau = 500$ . Contornos de 0.5 y 0.99 para todas las Figuras. Se han añadido líneas discontinuas que representan las siguientes relaciones : (a)  $\Delta_x^+ = 3\Delta_y^+$ ; (b)  $\Delta_z^+ = 1.5\Delta_y^+$ ; (c)  $\Delta_z^+ = 2\Delta_y\Delta_x$ .

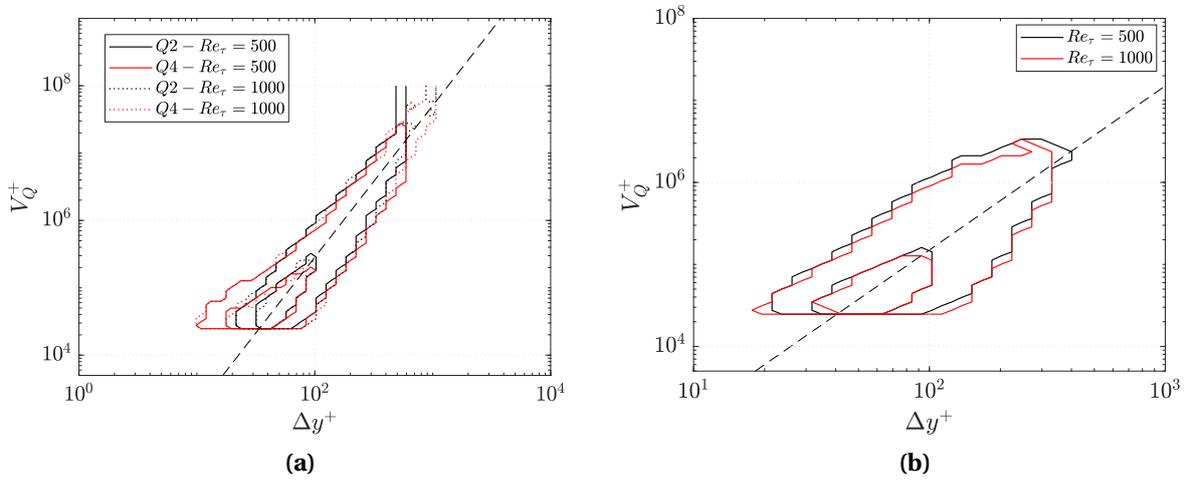
$\Delta_y$ , la relación entre la longitud y la anchura de la caja deja de ser lineal (Figura 4.4(c)). Viene definida también por la Ecuación 4.3.

Cabe destacar, (como se verá en el capítulo 5, dedicado a la dinámica) que conforme aumenta  $\Delta_y$ , el número de objetos encontrados disminuye. Este resultado aparecen en Lozano-Durán y coincide con nuestras observaciones.

Todos estos resultados concluyen que existe autosemejanza de las longitudes y anchura de la caja respecto a la altura  $\Delta_y$  en los vórtices ligados a la pared, en ambos tipos de objetos estudiados (pese a que estas relaciones de aspecto sean distintas).

## 4.2.2. Forma de los objetos individuales

En el apartado anterior se estudiaron los tamaños de la caja que engloba al vórtice y la relaciones que existían en función de  $\Delta_y$  de estos objetos autosimilares. En este se discute sobre la forma que tienen los mismos y su volumen. En la Figura 4.5 se representa la p.d.f del volumen en relación de la altura de los vórtices ligados a la pared. El límite superior indicaría el volumen de las estructuras más grandes, que se corresponde aproximadamente con  $V_{max}^+ = 3 \cdot 10^7$  (para  $Re_\tau = 500$ ) y  $V_{max}^+ = 10^8$  (para  $Re_\tau = 1000$ ), en unidades de pared, para el caso de los racimos de  $Q^-$ s. El límite inferior se corresponde al impuesto en el filtro  $V^+ > 30^3$ . Este volumen máximo supone un 0.03% de dominio global ( $8\pi h \times 3\pi h \times 2h$ ). En el caso de los *vortex cluster* las estructuras encontradas son menores que las obtenidas por el otro criterio. El límite superior estaría marcado por  $V_{max}^+ = 4 \cdot 10^6$  (tanto  $Re_\tau = 500$ ) como para  $Re_\tau = 1000$ ), en unidades de pared. Este valor supondría un orden de magnitud inferior respecto a los  $Q^-$ s.



**Figura 4.5.:** Función de densidad de probabilidad logarítmica del volumen  $V_q$  y la altura  $\Delta_y$  de los objetos ligados a la pared,  $J(V_q^+, \Delta_y^+)$ . (a) Eventos  $Q^-$ s (*sweeps* y *ejections*). (b) *vortex cluster*. Contornos de 0.5 y 0.99. Se han añadido líneas discontinuas que representan respectivamente : (a)  $V_q^+ = 9\Delta_y^{+2.25}$ ; (b)  $V_q^+ = 15\Delta_y^{+2}$ .

En la Figura 4.5 se observa además que ambas distribuciones se encuentran alineadas respecto a una línea (representada de forma discontinua). En (a) estos datos siguen aproximadamente la relación dada por la Ecuación 4.5. En el caso de los *vortex cluster* la tendencia viene dada por 4.6, siendo el coeficiente menor. El exponente de crecimiento de  $V(\Delta_y)$  (coeficiente que eleva el término de la derecha) puede interpretarse con la dimensión fractal de estas estructuras ligadas a la pared debido a la autosimilaridad que presentan.

$$V_q^+ \propto c \cdot \Delta_y^{+2.25} \quad (\text{uv}) \quad (4.5)$$

$$V_q^+ \propto c \cdot \Delta_y^{+2} \quad (\text{chong}) \quad (4.6)$$

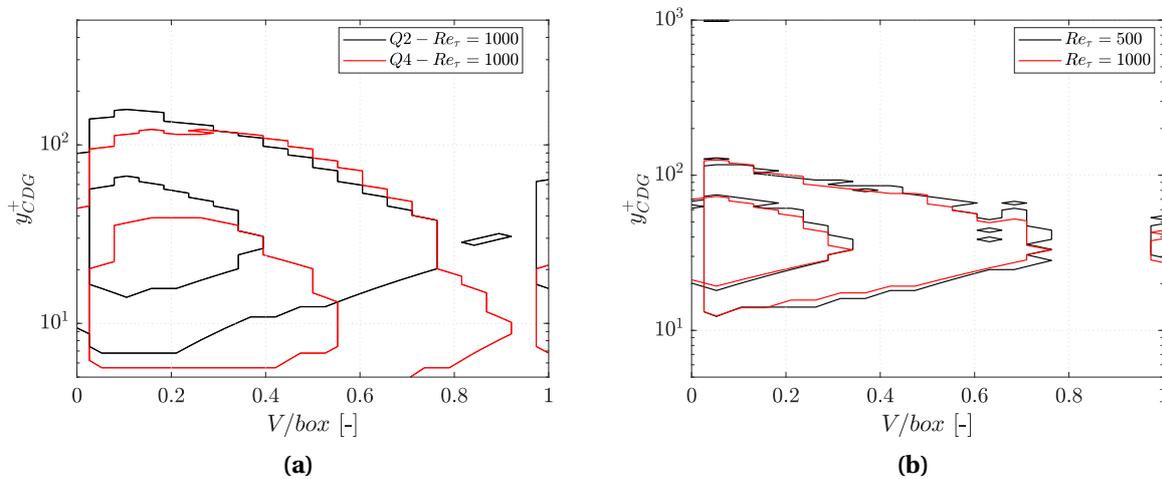
Si se representa ahora su volumen respecto a la caja de los vórtices (porcentaje de ocupación en la caja), se obtiene la Figura 4.6. Esta nos puede dar una idea de la forma de los mismos, y

si cambia con la altura del canal. Por ejemplo, una esfera tendría un porcentaje de ocupación dado por la Ecuación:

$$\% \text{ocupación} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{(2r)^3} = 0.53 \quad (4.7)$$

En la Figura 4.6, se ha observado que no hay evidencia clara de una variación con la distancia a la pared (para ninguno de los criterios de identificación), es decir, la ocupación de la caja es similar para todas las alturas. El porcentaje de ocupación varía aproximadamente entre el 0.2 y 0.4 (para los *uv cluster*) y entre el 0.2 y 0.3 para los *vortex cluster*. Si se reduce el contorno al 0.3 este valor se baja aproximadamente 0.1. Es decir, las cajas se encuentran principalmente vacías, sugiriendo formas disgregadas y alargadas (en concordancia con el apartado anterior) orientadas principalmente en X, relacionadas con las formas predichas en la bibliografía como los bosques de horquillas. Esta morfología hueca es más evidente en los *vortex clusters*, como se puede concluir a partir de estas Figuras (también concuerda con la mayor disminución de volumen que de tamaño de caja de los *vortex clusters* mostrados en resultados anteriores). Asimismo, se podría llegar a la misma conclusión teniendo en cuenta que hay más diferencia de volumen que de tamaño entre los dos tipos de objetos.

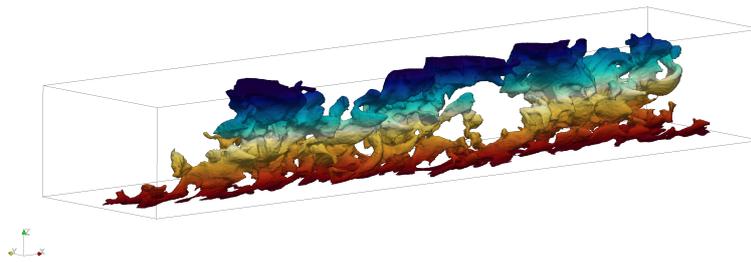
Además existe una diferencia entre los *sweeps* y los *ejections*. Los primeros presentan mayor porcentaje de ocupación a alturas,  $y_{CDM}$ , bajas. Este grupo de vórtices se corresponde a los objetos que se aplastan contra la pared al desplazarse hacia la misma, que obtienen formas más planas.



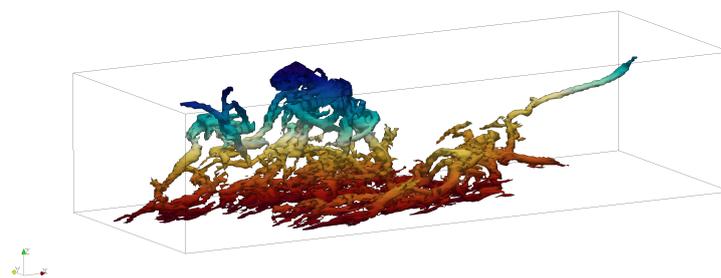
**Figura 4.6.:** Función de densidad de probabilidad de el porcentaje de volumen de un objeto respecto a su caja y su posición del centro de gravedad,  $J(\%V_{box}, y_{CDG})$  (a) Eventos  $Q^-$ s (*sweeps* y *ejections*). (b) *Vortex cluster*.

Estas conclusiones se pueden observar claramente en algunos ejemplos de los objetos obtenidos (Figura 4.7).

El objeto que aparece en la Figura 4.7(a) se trata de un *uv cluster*. Se caracteriza por ser una estructura con cavidades o huecos cuya longitud en la dirección en X mayor que el resto de las dimensiones. Se asemeja a un conjunto de estructuras menores enrolladas alrededor del eje longitudinal, donde la densidad parece mantenerse uniforme en toda la estructura. Asimismo se caracteriza por una ligera inclinación que representa su formación desde la pa-



(a)



(b)

**Figura 4.7.:** Visualización de una estructura encontrada en el dominio en un instante temporal aislado. a) Eventos  $Q^-$ s. b) *vortex cluster*.

red en sentido ascendente (se trata de un *ejection*). No se aprecia, sin embargo, la estructura típica de lazo u horquilla propuesta por algunos autores.

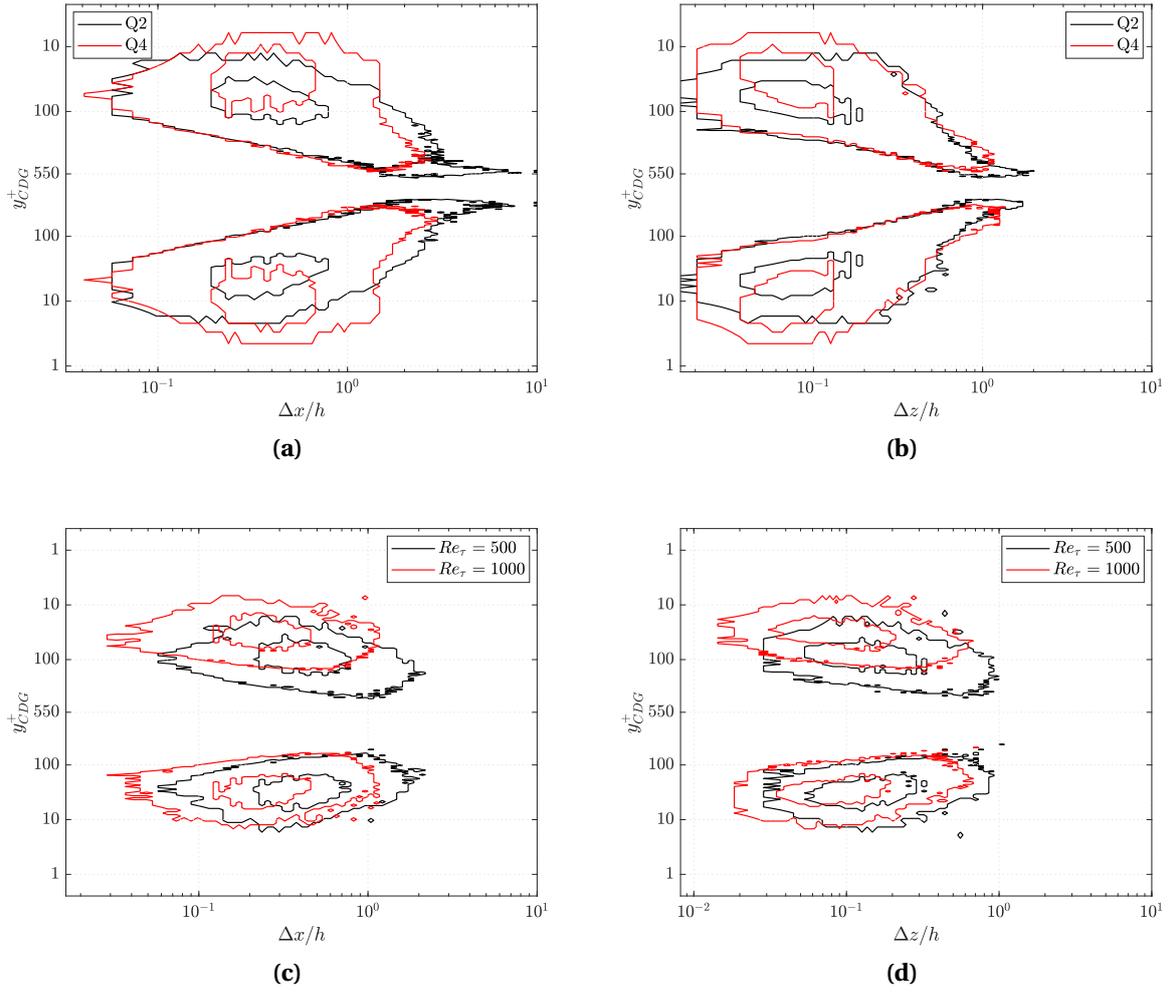
Por otro lado, el objeto que aparece en la Figura 4.7(b) se trata de un *vortex cluster*. Su apariencia se asemeja más a lo descrito por la bibliografía, como un conjunto de gusanos o filamentos enredados alrededor de un núcleo central con más densidad (en general es un vórtice más hueco). En algunas partes se puede intuir la forma de horquilla que forman ciertos filamentos.

Por último, cabe destacar que la presencia de estas estructuras afecta a su campo próximo y por ello dos estructuras cercanas van a interferirse mutuamente. Esto junto a los parámetros seleccionados del estudio de percolación puede generar que se acoplen dos vórtices como un sólo objeto (como se podría intuir en la Figura 4.7(a)), obteniendo un tamaño mayor. Este problema junto a posibles soluciones se abordará en un capítulo posterior.

### 4.2.3. Posición de las estructuras coherentes

En la Figura 4.8 se representan las funciones de densidad de probabilidad de la distribución de longitud y anchura en función de la altura del centro de masas,  $J(\Delta_x, y_{cdm})$  y  $J(\Delta_x, y_{cdm})$ , para los dos tipos de objetos estudiados.

Si se observa la parte concerniente a los eventos  $Q^-$ s, se observa una distribución de dimen-



**Figura 4.8.:** Conjunto de funciones de densidad de probabilidad de las dimensiones de la caja (longitud y anchura) y la posición del centro de masas del objeto  $J(\Delta_x/h, y_{CDM}^+)$ ,  $J(\Delta_z/h, y_{CDM}^+)$ . Las Figuras (a) y (b) se corresponden con eventos  $Q^-$ s y solo se representan para  $Re_\tau = 500$  por simplicidad en su visualización. Las Figuras (c) y (d) se corresponden con vórtices de Chong.

siones cuya variación con la altitud se aproxima a una recta (la forma no es clara y podría resultar una relación no-lineal). Si se supone lineal los resultados se alinean en la recta (desplazada cierto valor de  $\Delta_x$  y  $\Delta_z$  de Ecuación 4.8 (tanto para las direcciones X y Z).

$$\Delta_x \propto 2.5y_c \quad \Delta_z \propto y_c \quad (4.8)$$

Asimismo, se observa que la mayor parte de las estructuras tienen su centro de masas entre  $10 < y_{CDM}^+ < 100$ , cosa que concuerda con el hecho de que la  $y_{min}^+$  debe ser menor que 10 pero se tratan de estructuras con gran altura, donde la mayoría alcanzan la región logarítmica. También las estructuras generalmente aumentan su tamaño conforme más alejadas están de la pared. Esto es debido al crecimiento que sufren los *ejections* al ascender, que además se pueden ir uniendo junto a otros objetos. Los *sweeps*, en cambio, disminuyen las mismas por efectos de la disgregación o disipación de las estructuras junto al aplanamiento al alcanzar la pared.

Por último, se observa claramente una diferencia respecto a los *sweeps* y los *ejections*: los *sweeps* están desplazados respecto a su contrario acercándose más a la pared. Pese a que se originen más alejados de la misma, este es el resultado lógico, debido a que su velocidad normal a la pared media les desplaza hacia la pared hasta que disminuyen su altura asemejándose a los *streaks* de alta velocidad.

En la Figura 4.8(b) se observa la parte relativa a los paquetes de vórtices de Chong. Al igual que en caso anterior se puede apreciar una distribución de dimensiones cuya variación con la altitud se aproxima a una curva (difícil evaluar si se trata de un comportamiento lineal o no lineal). Si se supone comportamiento lineal los resultados se agrupan en la recta (desplazada cierto valor de  $\Delta_x$  y  $\Delta_z$  de Ecuación 4.8 tanto para las direcciones X y Z, pero de valor menor que el anterior).

$$\Delta_x \propto 5y_c \quad \Delta_z \propto 3y_c \quad (4.9)$$

Estos resultados concuerdan por los presentados por Del Álamo [15]. También se puede concluir que los objetos son más pequeños que los obtenidos por el otro criterio. La mayoría de estas estructuras se encuentran igualmente entre  $10 < y_{CDM}^+ < 100$ , con las estructuras de mayor tamaño más alejadas de la pared, conforme van creciendo los vórtices.

Esta Figura se ha representado para un  $Re_\tau = 500$  y  $Re_\tau = 1000$ . Conforme aumenta el número de Reynolds de fricción los objetos se acercan ligeramente más a la pared. Este efecto era menor en el caso de los eventos  $Q^-$ s.

Finalmente, se concluye que estas gráficas sugieren la autosemejanza de las longitudes y anchuras con respecto a la distancia a la pared de sus centros de masa. Este resultado coincide con la jerarquía de escalas propuesta por Perry y Chong [10].

### 4.3. Relación entre los distintos tipos de objetos

En este apartado se pretende discurrir sobre la relación existente entre los diferentes objetos estudiados, para ver si forman una unidad conjunta en el entendimiento de la turbulencia.

En primer lugar, la aparición de *sweeps* relacionados con los *ejections* está justificada físicamente por la conservación de la cantidad de movimiento, por lo tanto, es lógico pensar que estas estructuras estén relacionadas en pares de vórtices. El problema radica en la asimetría ya comentada respecto a los distintos eventos  $Q^-$ s. Esta ocasiona que aparezcan más *ejections* que *sweeps* en el campo fluido, por lo que no sería posible un emparejamiento total de las estructuras, o bien, las que cumplan los criterios planteados no sean tan similares en volumen.

Los criterios que determinan si hay una relación entre dos estructuras próximas han sido tomados de Lozano Durán [16]. Estos determinan la posibilidad de que dos objetos estén conectados en términos de tamaño y posicionamiento dentro del dominio. La presencia de un par  $Q2 - Q4$  se cumple si un vórtice tiene un vecino del cuadrante opuesto que cumple 3 relaciones según cada uno de los ejes cartesianos. Respecto a las dimensiones periódicas (longitudinal y trasversal) se debe satisfacer la siguiente relación:

$$|\delta_x| < 1.25 \quad |\delta_z| < 0.75 \quad (4.10)$$

Los parámetros que aparecen en la Ecuación 4.10, que analizan las posiciones relativas entre los objetos se obtienen teniendo en cuenta:

$$\delta_x = 2 \frac{x^{(j)} - x^{(i)}}{d^{(j)} + d^{(i)}} \quad (4.11)$$

$$\delta_z = 2 \frac{z^{(j)} - z^{(i)}}{d^{(j)} + d^{(i)}} \quad (4.12)$$

Donde  $x$  y  $z$  son las distancias entre centros de masas entre el vórtice estudiado, que se indica con el superíndice  $i$ , y el posible candidato a vórtice relacionado, indicado con el superíndice  $j$ . Por lo tanto, estos se usan para indicar  $Q2$ ,  $Q4$  o *vortex cluster*. Están normalizados por el parámetro  $d$ , que consiste en la diagonal paralela a la pared de la caja de los objetos:

$$d^{(i)} = \sqrt{\Delta_x^{(i)2} + \Delta_z^{(i)2}} \quad (4.13)$$

En el caso de encontrar varios objetos que cumplieran estos criterios se ha implementado un código para discernir cuál de ellos era mejor candidato en función de la distancia y la relación de volúmenes, de una forma similar a la presentada en el apartado de seguimiento temporal.

Respecto a la dirección normal a la pared, el criterio impuesto para determinar si hay conexión relaciona los tamaños de sus cajas en la dirección  $Y$  según la Ecuación 4.14.

$$1/2 \leq \Delta_y^{(i)} / \Delta_y^{(j)} \leq 2 \quad (4.14)$$

Aplicando estos criterios gran parte de los objetos encuentran relación. Sin embargo, es necesario determinar si esta relación no es más que una coincidencia estadística. En la Figura 4.9 se muestra un par de  $Q2$ - $Q4$  en un instante temporal. El problema real ha de tener en cuenta la evolución de los pares para determinar si existe relación coherente entre ambos objetos. Esto se discutirá en el apartado que analiza la evolución temporal. El código implementado relaciona estos pares instante a instante, por lo que, al tener en cuenta la vida completa de los vórtices la pareja seleccionada sería la que más instantes abarcase.

En los últimos estudios se discute si existe una relación entre un par  $Q2$ - $Q4$  y un vórtice por el criterio de Chong. Algunos autores declaran que la unidad coherente adecuada para el estudio de la turbulencia y el transporte del esfuerzo de Reynolds debe ser un bloque formado por una pareja unida a un *vortex cluster* embebido en un  $Q2$ . Lozano Duran ([16]) afirma que el 80% de los *vortex clusters* intersecan en altura 4.14 (y podrían tener relación) con alguna de las estructuras  $Q^-$ s. Se piensa que los *vortex cluster* pueden ser originados por eventos  $Q2$ , o por *streaks*, que a su vez son causa de los  $Q2$  (Del Álamo [15]).

A la hora de calcular esta posible conexión se ha resuelto la identificación de vórtices con la misma simulación, aplicando criterios de cercanía y tamaño poco restrictivos para encontrar un gran número de candidatos.

Sin embargo, la importancia de esta relación (y de los grandes bloques como unidad principal del transporte de Reynolds) debe ser discutida introduciendo en este estudio la variable temporal, y hacer un seguimiento en el tiempo, ya que puede ser ocasionada por la aparición de estructuras que cubren la mayor parte del dominio.



**Figura 4.9.:** Visualización de una pareja Q2-Q4 en un instante temporal aislado.

Al añadir esta nueva dimensión (cuyos resultados se discuten en el capítulo siguiente), los resultados obtenidos son igual de desesperanzadores que para un instante temporal. Para cada pareja se podían obtener varios candidatos, y se ha analizado su comportamiento individualmente, tanto desde un enfoque espacial (estático), como considerando la evolución a lo largo del tiempo de la pareja en relación con el *vortex cluster* considerado. Finalmente, con los resultados obtenidos, no se ha podido concluir que exista una relación global entre estructuras más allá de la pareja de *sweeps* y *ejections*.

# 5

## Evolución temporal de las estructuras coherentes

### Índice

---

<b>5.1. Introducción</b>	<b>55</b>
<b>5.2. Clasificación estructuras coherentes</b>	<b>57</b>
<b>5.3. Tamaño medio de los objetos identificados</b>	<b>59</b>
<b>5.4. Evolución temporal</b>	<b>62</b>
5.4.1. Tiempo de vida de los vórtices	62
5.4.2. Evolución posición de los objetos. Relación <i>sweeps-ejections</i>	65
<b>5.5. Velocidad de advección</b>	<b>69</b>
<b>5.6. Cascada turbulenta a partir de las estructuras coherentes</b>	<b>71</b>
5.6.1. Introducción	71
5.6.2. Cascadas directa e inversa de vórtices	72
5.6.3. Posición relativa de los vórtices secundarios	74

---

### 5.1. Introducción

Hasta ahora, las estructuras coherentes o vórtices han sido analizados considerando los resultados como instantes temporales independientes. Según este criterio se pueden obtener aspectos o conclusiones relativos a su morfología, volumen y distribución a lo largo del canal. Asimismo, se ha estudiado la energía correspondiente a estas agrupaciones dentro del dominio, obteniendo resultados satisfactorios para los eventos  $Q^-$ s. Estas estructuras suponen un 65% del esfuerzo de Reynolds pese a ocupar únicamente un 8% del volumen del dominio. Esto indica claramente su posible importancia dentro de la dinámica de la turbulencia. En cuanto a los *vortex clusters*, pese a no tener una contribución importante del esfuerzo de Reynolds, se tratan de estructuras muy disipativas.

En este capítulo, se correlacionan objetos de instantes temporales sucesivos dotando a las estructuras coherentes de información temporal completa. Así, se podrá analizar la evolución de distintas variables características ya estudiadas estáticamente como el volumen o el centro de masas. Además, se añaden otras nuevas relacionadas con el nacimiento, muerte o disgregación de los objetos identificados.

El procedimiento de identificación temporal ha sido explicado en el apartado 3.2, y básicamente consiste en dos bucles anidados (o conjunto de tareas) que realizan la identificación

en dos pasos principales: conexiones fáciles(3.2.1) y conexiones difíciles (3.2.2). Las primeras emplean como criterio la distancia entre los centros de masas de los objetos candidatos ponderada con ciertos parámetros característicos. El segundo busca solapamiento entre grupos de puntos cuando se introducen dos campos consecutivos en una misma matriz. Posteriormente conforme se van analizando instantes se guardan las características esenciales de los vórtices en una estructura de datos (3.3).



**Figura 5.1.:** Visualización de la evolución de un vórtice en distintos instantes temporales representado las distintas alturas por colores. Se puede apreciar un ascenso inicial y su posterior unión con otro objeto de acuerdo a los criterios establecidos.

El objetivo de este trabajo es discutir los modelos de la dinámica de la turbulencia basado en estructuras coherentes. En el capítulo anterior se había propuesto un modelo que explicaba el flujo turbulento en términos de *sweeps*, *ejections* y *vortex clusters*. Se busca encontrar un conjunto de vórtices que sean suficientemente representativos de la dinámica del flujo y para el entendimiento de los mecanismos de la turbulencia. Últimamente, se venía discutiendo que la unidad coherente predominante en el flujo se trataba de una estructura intrínsecamente turbulenta y compleja formada por una pareja de *sweeps* y *ejections* con un *hairpin* embebido en el *ejection*.

Sin embargo, de forma estática no se puede abordar íntegramente el problema, sino que para la completa comprensión del problema es necesario rastreo temporal. Es decir, se añade una dimensión más, lo que supone un incremento notable de la carga computacional. Este problema se puede resolver actualmente gracias al avance en computación que permite mayores operaciones por segundo y mayor almacenamiento en RAM y en disco necesario, ya que se está trabajando con matrices de puntos muy pesadas.

Este problema ha sido estudiado con anterioridad para números de Reynolds bajos (hasta  $Re_\tau = 180$ ) por Robinson [31], y Johansson *et al.* [32], que concluyeron la importancia de los *ejections* en la contribución  $uv$  y estudiaron el proceso de *bursting*. De forma experimental, para Reynolds similares, fue estudiado por Cadot *et al.* [33]. Para números de Reynolds más altos (turbulencia completamente desarrollada), centrándose principalmente en la capa logarítmica, ha sido estudiado de forma exhaustiva por Lozano-Durán y Jiménez [34]. De forma experimental, el problema ha sido abordado por LeHew *et al.* [35], usando PIV(*particle image velocimetry*) temporal para estudiar el movimiento de torbellinos de forma bidimensional, a  $Re_\tau = 410$ , obteniendo las velocidades de advección y el tiempo de vida. Describe estructuras que mantienen la topología mientras se desplazan por el canal turbulento a la velocidad de advección, que no tiene que coincidir con la media. Concluye que el tiempo de vida de un vórtice depende de la distancia de su centro de masas a la pared, y solo una pequeña porción alcanza una vida mayor de 5 veces el tiempo de rotación de un vórtice. Este parámetro se pueden definir según la Ecuación 5.1.

$$T_{turnover}(global) = h/u_{\tau} \quad T_{turnover}(local) = l_y/u_{\tau} \quad (5.1)$$

Representa la escala temporal típica durante la cual un vórtice está sometido a distorsión significativa, o durante la que se produce la transferencia de energía de unas escalas,  $l_y$ , a otras más pequeñas. El periodo de simulación del LISO es suficientemente extenso para captar la vida completa de las estructuras más grandes. Como mínimo se requiere estudiar un periodo *wash-out*, es decir, el tiempo que transcurriría desde que una partícula fluida entra en el dominio hasta que sale. Ningún vórtice estudiado vive durante tanto tiempo por lo tanto, es una medida adecuada. Si se incrementa se obtendrían mejores estadísticas al abarcar un mayor número de vórtices, sin embargo esto podría implicar problemas del almacenamiento.

Se abordarán todas las regiones de la capa límite para un Reynolds moderado, siguiendo algunos criterios estudiados por Lozano-Durán [16]. Las principales estructuras estudiadas son el resultado del análisis de cuadrantes propuesto por Wallace *et al.* [14], que consistía en estudiar regiones de esfuerzo tangencial de Reynolds intenso en flujos turbulentos de pared. Por otra lado, se han analizado los objetos obtenidos por el criterio de Chong recogido por Cucitore [36], que se corresponden a los *vortex clusters* o *hairpins*. Los siguientes análisis se centrarán principalmente en los *uv clusters*, debido a su importancia energética (las conclusiones mostradas se refieren a este tipo de estructuras, a no ser que se indique lo contrario), mientras que se compararan de forma puntual a los resultados obtenidos para los *vortex clusters*.

Este capítulo se organiza de la forma siguiente. En primer lugar, se clasificarán las estructuras estudiadas según un criterio análogo a la clasificación del estudio estático, más otros criterios intrínsecos a la evolución temporal. Posteriormente, se analizan los tamaños medios de los objetos comparándolos con los obtenidos anteriormente si se estudiaban de forma aislada. Tras esto, se determinará el tiempo de vida de las estructuras coherentes y la posición donde se originan (*birth*) o desaparecen (*death*). Finalmente, se relacionan todas estas conclusiones con el concepto de cascada energética introducida por Kolmogorov.

## 5.2. Clasificación estructuras coherentes

Una vez se obtienen los resultados mediante el código de identificación temporal se deben analizar para intentar obtener conclusiones acerca de la dinámica que controla el flujo turbulento. Sin embargo, la identificación temporal puede presentar problemas a la hora de determinar la relación entre objetos con un volumen excesivamente pequeño. Si un vórtice pequeño no es registrado en las *conexiones fáciles* (3.2.1), las *conexiones difíciles* (3.2.2), pese a ser más precisas, tendrán problemas por su tamaño reducido. Esto se debe a que estas estructuras se desplazan con una velocidad mayor a la de advección propuesta y el  $\Delta_t$  empleado es demasiado alto para que se produzcan solapamiento entre ambas estructuras de instantes temporales contiguos. El último filtro añadido intenta reducir al máximo este error. Sin embargo, siguen apareciendo estructuras muy pequeñas que dan lugar a errores o que simplemente nacen y mueren en instantes sucesivos. Todos estos casos se consideran como ruido de la identificación de vórtices debido a los parámetros de percolación tomados. Por esto, al igual que en estudio estático, se añade un filtro que elimina los vórtices que no superan cierto umbral de volumen  $V^+ > 30^3$ , en ninguno de sus instantes temporales. De-

bido a esta restricción, que incluye todos los volúmenes de un vórtice, se obtienen tamaños inferiores que en el caso estático.

El siguiente paso es clasificar estas estructuras coherentes filtradas según ciertos criterios que se describen a continuación. En primer lugar, hay una clasificación intrínseca a la agregación de vórtices para los objetos que resultan del análisis de cuadrantes, es decir, *sweeps* y *ejections*. Esta separación es introducida antes de la identificación temporal. Las siguientes se realizan en el postproceso y son esenciales para un mejor análisis de los resultados.

Para continuar con esta nueva clasificación es necesario introducir el concepto de rama primaria. Una rama primaria incluye un vórtice (su vida temporal) que se crea por la turbulencia del dominio y desaparece disipándose en el medio. Es decir, presentan una historia temporal completa en el periodo de tiempo simulado. Por este motivo la mayor parte del análisis siguiente se centra en este tipo de estructuras. En el caso contrario se tienen las ramas secundarias, que incluyen vórtices que nacen como separación de objetos mayores y mueren uniéndose junto con otros.

Asimismo, las ramas que comienzan en el primer instante temporal y que continúan existiendo al terminar la simulación han de ser excluidas de la categoría primaria ya que no conocemos la forma en la que se originan y desaparecen, ni el tiempo de vida total que experimentan, por lo que no se deben incluir en las estadísticas. Las ramas primarias suponen aproximadamente un 10% del total de ramas identificadas (datos concretos en la Tabla 5.1).

Por último, al igual que en el estudio estático, se realiza una clasificación de los vórtices en función de la posición relativa de los extremos que su caja dentro del dominio, que se corresponden a las distintas regiones de la capa límite. La primera distinción que se ha de hacer es entre vórtices ligados a la pared y vórtices desligados, que según lo concluido en el capítulo anterior tienen comportamientos sustancialmente distintos. Esta separación establece que las estructuras pertenecen al primer grupo si cumplen que  $y_{min} < 10^+$ . Como ya se había comentado, los vórtices desligados son estructuras más pequeñas y homogéneas que se encuentran en la región exterior de la capa límite. La segunda distinción incumbe a los vórtices ligados, que consiste en diferenciar entre los más próximos a la pared (región *buffer*) y los que alcanzan la capa logarítmica. Este límite se establece si su longitud vertical cumple  $\Delta_y^+ > 100$ .

A pesar de que en el capítulo de estática no se emplearon estas categorías para los vórtices ligados a la pared (su morfología no presenta excesivas diferencias más allá del tamaño), en este capítulo es esencial debido a que son los vórtices ligados altos los que presentan mayor tiempo de vida, y por lo tanto serán mayoritariamente objeto de estos análisis.

El número de objetos encontrados considerados altos es reducido en proporción y mayor conforme se incrementa el número de Reynolds, en parte debido a que para número de Reynolds bajo no siempre aparece una región logarítmica.

También cabe destacar, que la clasificación en vórtices ligados a la pared incluye dentro de esta categoría cualquier rama que cumple la condición para cualquier instante temporal de la misma. Lo mismo ocurre para considerar un vórtice ligado perteneciente a la región logarítmica.

Los datos relativos a la proporción de objetos de cada tipo encontrados durante la simulación completa se incluyen en la Tabla 5.1.

UV CLUSTERS				
	$Re_\tau = 500$		$Re_\tau = 1000$	
	Q2	Q4	Q2	Q4
Primarias	0.28	0.72	0.32	0.68
Desligadas	0.16	0.46	0.19	0.45
Ligadas	0.12	0.26	0.12	0.24
Ligadas altas	0.028	0.047	0.03	0.035
VORTEX CLUSTERS				
	$Re_\tau = 500$		$Re_\tau = 1000$	
Desligadas	0.86		0.89	
Ligadas	0.14		0.11	
Ligadas altas	0.047		0.043	

**Tabla 5.1.:** Ratio de estructuras coherentes clasificadas según su posición y tiempo de vida respecto al total ramas primarias una vez aplicado el filtro de volumen.

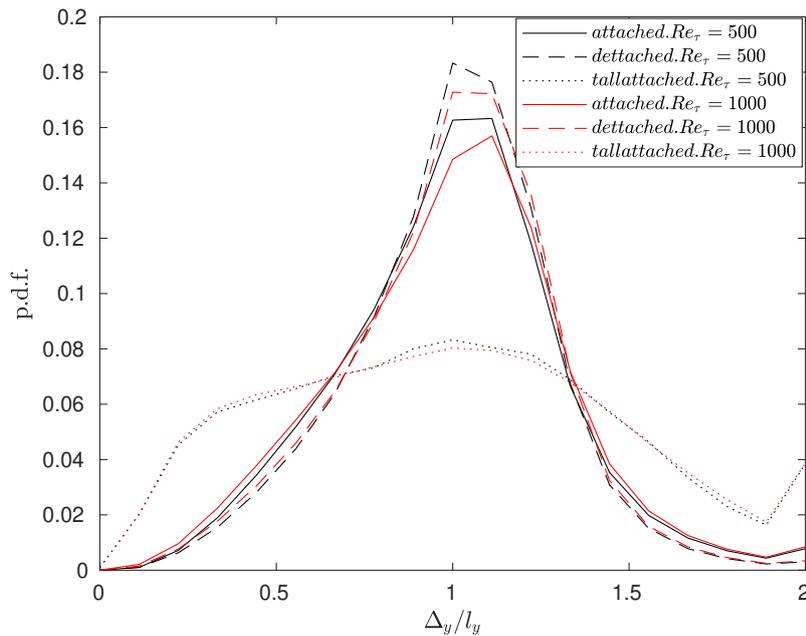
El número de ramas desligadas es mayor al total de ligadas (se reduce esta diferencia si no se aplica el filtro de volumen), y cada grupo se encuentra en una región del dominio. Si se representara el número de objetos por planos se obtendría que los ligados aparecen solo cerca de la pared, y los desligados en la región exterior principalmente. Sin embargo, todas las categorías coinciden en que el número de objetos disminuye conforme los planos se alejan de la pared.

### 5.3. Tamaño medio de los objetos identificados

En esta sección se estudian los tamaños medios de las diferentes ramas obtenidas. A pesar de que es una buena estimación del tamaño instantáneo, se obtienen estadísticamente tamaños inferiores, porque el umbral de volumen tiene en cuenta el volumen instantáneo menor y no el medio.

Asimismo, es importante conocer el tamaño medio de estas estructuras coherentes porque está íntimamente relacionado con el tiempo de vida de las mismas, como se discutirá en el siguiente apartado. Sin embargo, estas estructuras pueden modificar su tamaño de forma considerable a lo largo de su vida, siempre que la diferencia del volumen entre ambas no supere un umbral arbitrario de 50%. Este criterio, por lo tanto, tiene gran influencia en la variación de tamaño entre estructuras pertenecientes a una misma rama y también a la duración de las mismas. Si este parámetro se vuelve más restrictivo la duración se verá reducido puesto que una posible continuación se considera como un nuevo vórtice.

En la Figura 5.2 se puede observar la función de densidad de probabilidad de las alturas de las estructuras individuales de las ramas primarias, respecto a la altura media del conjunto. Para las ramas desligadas esta p.d.f concentra su valor alrededor de la unidad, sin mucha dispersión. Esto es debido a que se trata de estructuras pequeñas, por lo tanto, con corta duración que aparecen y desaparecen rápido sin sufrir muchos cambios en su tamaño. En cambio, las ramas ligadas altas, presentan valores con mucha dispersión en un amplio rango de valores (más uniforme en todo el dominio), ya que alcanzan tamaños más elevados teniendo la posibilidad durante su tiempo de vida mayor de crecer hasta alcanzar amplios



**Figura 5.2.:** Función de densidad de probabilidad de la altura (tamaño vertical) de los objetos de las ramas primarias  $\Delta_y$  adimensionalizada con la altura media de su rama  $l_y$ .

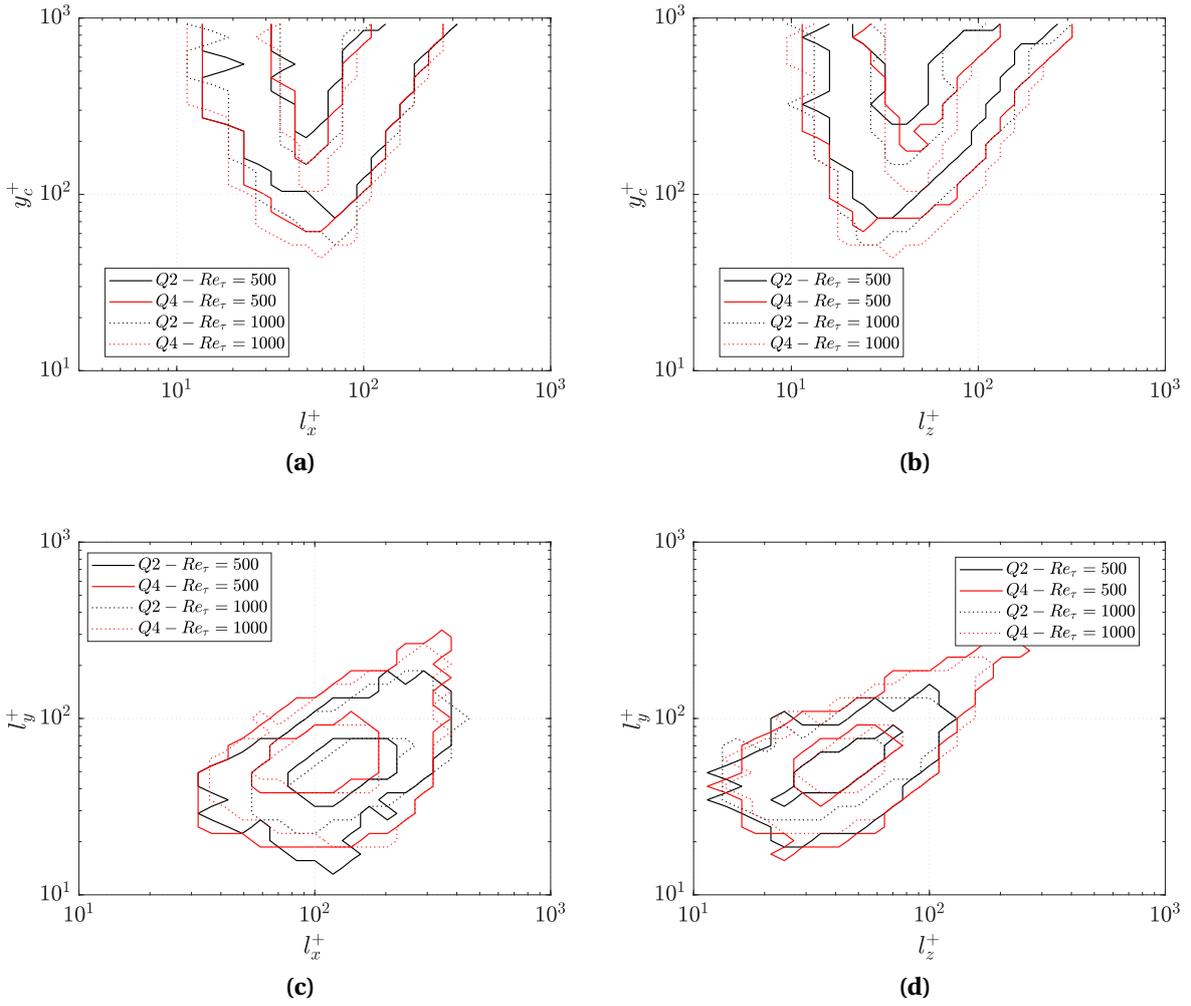
volúmenes y disminuir posteriormente gran parte de su tamaño al disiparse. Los vórtices ligados a la pared pertenecientes a la región *buffer* presentan un comportamiento a mitad de camino entre las otras dos categorías, más similar a los desligados.

También, se puede apreciar una clara simetría en la Figura anterior, asemejándose a una distribución normal de los datos, donde el valor medio es el punto de probabilidad mayor. Esto implica una variación del volumen suave donde los vórtices alcanzan un valor que mantienen durante la mayor parte de su vida. Los resultados son análogos si se estudian los *vortex clusters*.

Respecto a los tamaños globales de las estructuras (las longitudes características de la caja) y su relación de aspecto se obtienen los resultados presentados a continuación. En la Figura 5.3(a y b) se tiene la función de densidad de probabilidad de la longitud en la dirección de corriente y transversal para los grupos de vórtices desligados, en función de la distancia a la pared de su centro de masas  $y_c$ . Como se puede observar, estos se caracterizan por ser objetos muy pequeños y homogéneos, como habían adelantado otros autores.

Al igual que en el caso estático se aprecia un mayor alargamiento en la dirección X (no tan significativo como en las ramas ligadas a la pared). Su tamaño medio se encuentra alrededor de  $l_x^+ \approx 40\Delta_x^+ \approx 80\eta$ , mientras que en la dirección transversal solo alcanza  $l_z^+ \approx 30\Delta_z^+ \approx 60\eta$ . Los tamaños máximo pueden alcanzar valores de  $l_x^+ \sim l_z^+ \sim 200$ .

Los ramas ligadas a la pared (en este caso analizamos las que se encuentran en la capa logarítmica), son conjuntos de estructuras más grandes que pueden alcanzar tamaño máximos de  $l_x^+ \sim l_z^+ \sim 400$ . En este caso se estudia la relación del auto semejanza presente en el tamaño de los vórtices que relaciona la altura con el resto de dimensiones. Esto se muestra en la Figura 5.3(c y d) que representa la p.d.f de la altura respecto a su tamaño longitudinal y



**Figura 5.3.:** (a) y (b) Conjunto de p.d.f.s de las dimensiones de la caja (longitud y anchura) frente a la posición centro de masas medio de las ramas desligados primarias de estructuras  $Q^-$ ,  $J(l_x^+, y_c^+)$ ,  $J(l_z^+, y_c^+)$ . (c) y (d) Conjunto de p.d.f.s de las dimensiones de la caja frente a la altura de la caja media de las ramas ligadas a la pared primarias de estructuras  $Q^-$  que alcanzan la región logarítmica,  $J(l_x^+, l_y^+)$ ,  $J(l_z^+, l_y^+)$ . Los contornos representan el 0.5 y 0.98 del total de los datos.

trasversal, todas ellas en unidades de pared.

La mayor parte de los datos se alinean en una recta para cada dirección como ocurría en el caso estático. Esta vez la relación de aspecto de los objetos identificados difiere de los resultados ya presentados. Esta relación viene determinada por la Ecuación 5.2.

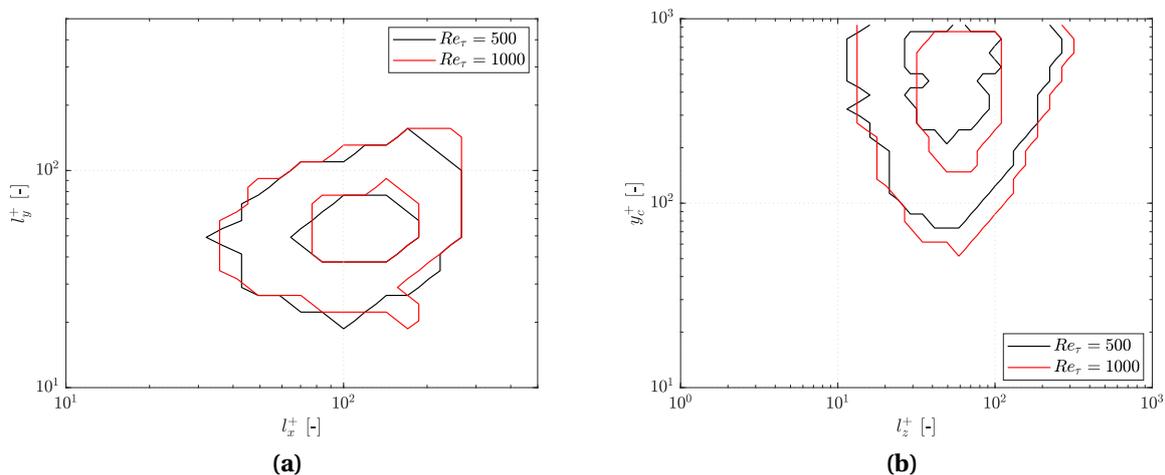
$$l_x \sim 2l_y \quad l_z \sim l_y \quad (5.2)$$

Los tamaños que se obtienen de media son aparentemente menores que los que se encontraban realizando el estudio de los vórtices en instantes temporales independientes. Como ya se había adelantado, esto es consecuencia de aplicar el filtro de volumen. Como un grupo de objetos identificados como el mismo vórtice supera el umbral mientras que una estructura de cualquiera de sus instantes lo haga, se incluyen objetos con menor volumen, y por lo

tanto menor tamaño en el cómputo de las estadísticas.

Otra consecuencia de estudiar el problema de forma dinámica (más evidenciado por el efecto del filtro y la inclusión de objetos de menor tamaño) es que la pendiente de la recta que relaciona las longitudes de corriente y la altura es menor, es decir, la relación de aspecto de la caja es menor en media teniendo en cuenta toda la vida temporal (antes se correspondía a  $\Delta_x^+ \sim 3\Delta_y^+$ ). Esto es debido a que las pequeñas estructuras que se dan al inicio y al final de la vida de los vórtices presentan mayor isotropía a diferencia de su aspecto más alargado que mantienen durante la mayor parte de su vida. Por lo tanto, aplicando la media se reduce esta relación. En la dirección transversal este efecto no se aprecia, y se mantiene la relación de aspecto vista en el capítulo de estática ( $\Delta_z^+ \sim \Delta_y^+$ ).

Si los resultados anteriores se analizan para los *vortex clusters* se obtiene la Figura 5.4. Se puede concluir que los vórtices desligados se comportan de una manera similar en cuanto a tamaño a los  $Q^-$ s. Respecto a los vórtices presentes en la capa logarítmica, se vuelven más isótropo (reducción de la relación de aspecto) al igual que los  $Q^-$ s, pero con tamaños de la caja menores.



**Figura 5.4.:** (a) P.d.f de la anchura de la caja frente a la posición de centro de masas medio para los *vortex clusters* desligados,  $J(l_x^+, l_y^+)$ . (b) P.d.f de la longitud de la caja respecto a la altura  $J(l_z^+, l_y^+)$  para los vórtices ligados altos.

## 5.4. Evolución temporal

### 5.4.1. Tiempo de vida de los vórtices

En este apartado se presentan los resultados relativos a la duración de la vida de las estructuras coherentes. El tiempo de vida abarca el periodo desde el que las estructuras aparecen (se originan de forma espontánea o se separan de un objeto ya existente) hasta que desaparecen (se disipan, se separan en diferentes objetos que no cumplen con el umbral de volumen o se unen a otro con tamaño mayor).

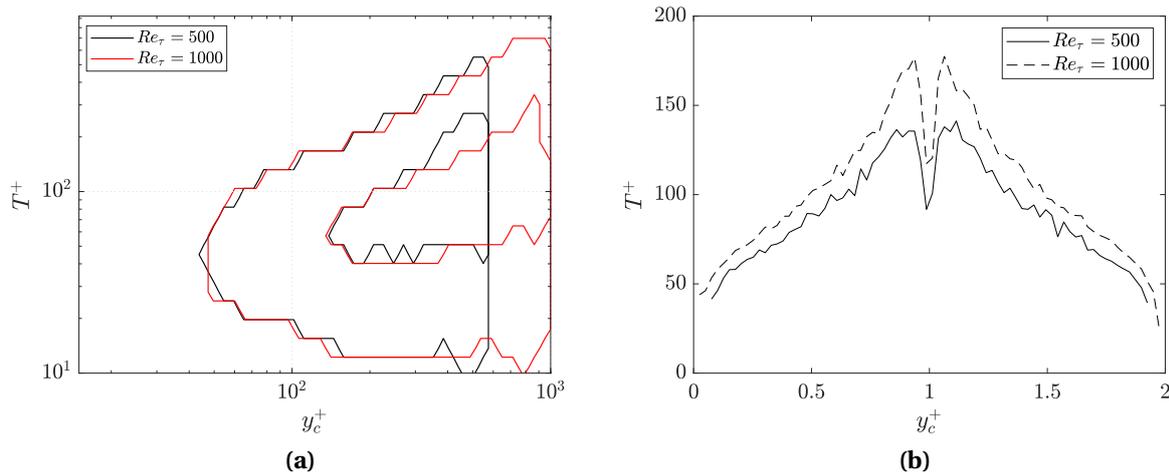
Por ello, estos tiempos dependen directamente de los criterios que se han establecido en el código que implementa la identificación temporal, por lo que su definición puede resultar

un tanto ambigua. En esta parte se analizan principalmente las ramas definidas como primarias, ya que su vida es parcialmente independiente del resto de estructuras del dominio, y se comparan los tiempos con los resultados dados por otros autores. El tiempo se presenta en unidades de pared mediante la siguiente transformación:

$$T^+ = T Re_\tau u_\tau \quad (5.3)$$

El tiempo de vida de las estructuras es proporcional a su altura o longitud vertical media de la caja,  $l_y$ , como se demostrará en las Figuras siguientes. En general, la mayoría de los  $Q^-$ s y los *vortex clusters* presentan vidas muy cortas y sus características morfológicas varían poco durante el total de su existencia.

En primer lugar, tenemos los vórtices desligados de la pared. Presentaban tamaños pequeños, por lo que sus vidas son significativamente cortas. Estos resultados se pueden observar en la Figura 5.5, que representa la relación entre el tiempo de vida en unidades de pared y la posición del centro de masas de los objetos. Por un lado, mediante una p.d.f bidimensional, y por otro lado, a partir de un curva que da un valor medio para cada posición  $y_c^+$ .



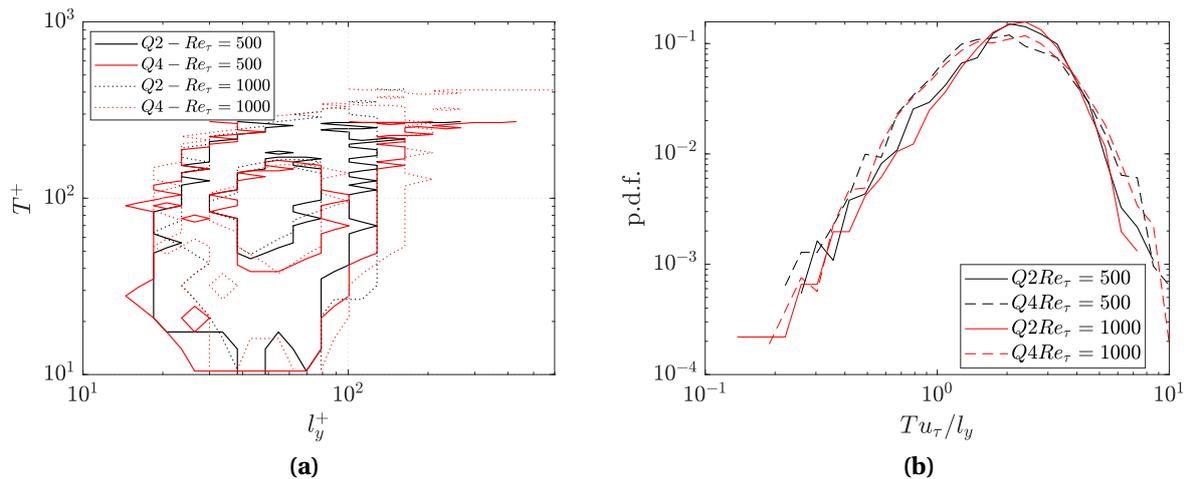
**Figura 5.5.:** Relación del tiempo de vida de los  $Q^-$ s desligados en relación de la distancia a la pared de su centro de masas. (a) Función de densidad de probabilidad bidimensional  $J(y_c^+, T^+)$ . (b) Curva  $T_{mean}^+ = f(y_c^+)$ . Los contornos de la p.d.f representan el 0.5 y 0.98 del total de los datos.

En la Figura 5.5(a) se puede apreciar su corta duración en general. Se trata de estructuras que se originan más alejadas de la pared, muy disipativas, con poco tiempo para desarrollarse en tamaños mayores y que pronto desaparecen. Observando la Figura 5.5(b) se puede concluir que las estructuras de mayor tamaño se encuentran estadísticamente cercanas a la mitad del canal (se obtiene una función creciente, proporcional a  $y_c$ ). Sin embargo, también cabe destacar la presencia de estructuras con mayor duración en todas las alturas, que alcanzan mayor coherencia.

También se puede apreciar que conforme se aumenta el número de Reynolds de fricción  $Re_\tau$ , aumenta el tiempo de vida en unidades de pared. Realmente se trata de periodos similares (con dimensiones de tiempo), o incluso mayores para el menor Reynolds. Esto puede ser motivado por la existencia de menos interacciones entre objetos con menor Reynolds de

fricción, siendo estas interacciones causantes de gran parte del truncamiento de vida según los criterios impuestos en el seguimiento temporal.

Respecto a los vórtices ligados a la pared, las diferencias de vida pueden ser importantes. Este periodo no suele ser muy grande para los que se encuentran en la región *buffer*, viviendo alrededor de  $T^+ \approx 80-100$ . Si bien, la mayoría se trata de vórtices que se disipan sin alcanzar una estructura de gran tamaño, algunos logran alcanzar dimensiones suficientes para presentar una vida prolongada sin haber alcanzado la capa logarítmica ( $y_{max}^+ > 100$ ) en ninguno de sus instantes temporales. Este hecho es más evidente conforme aumenta el  $Re_\tau$ .



**Figura 5.6.:** (a) P.d.f del tiempo de vida de los vórtices ligados a la pared altos en función de su altura  $J(T^+, l_y^+)$ . (b) P.d.f unidimensional de el tiempo de vida de los vórtices ligados alto adimensionalizando con el tiempo de rotación local. Ambas gráficas incluyen  $Qs$  primarios. Los contornos representan el 0.5 y 0.98 del total.

La Figura 5.6(a) muestra la relación lineal existente entre el periodo de vida de las ramas ligadas altas y su dimensión perpendicular a la pared media. Los datos se alinean alrededor de la recta  $T^+ \sim l_y^+$ . Por lo tanto tenemos estructuras coherentes autosimilares no solo en espacio, sino también en tiempo (esto también se puede concluir de la Figura 5.6(b) de forma más clara, como se expondrá más adelante).

Se puede observar que para valores de alturas elevados se alcanzan tiempos de vida considerables llegando a alcanzar algunas estructuras  $T^+ > 400$ . No obstante, debido a que influye intrínsecamente el análisis y los criterios utilizados, solo es relevante el orden de magnitud alcanzado. Lozano-Durán y Jiménez [34] obtienen valores para el periodo de vida de los vórtices ligados altos mayores que los presentados en este trabajo. En cambio, nuestros resultados son similares a los obtenidos por del Álamo [23] mediante el espectro de  $v^2$ . En general, todos coinciden en una relación creciente con la altura,  $l_y$  y la distancia a la pared  $y_c$ .

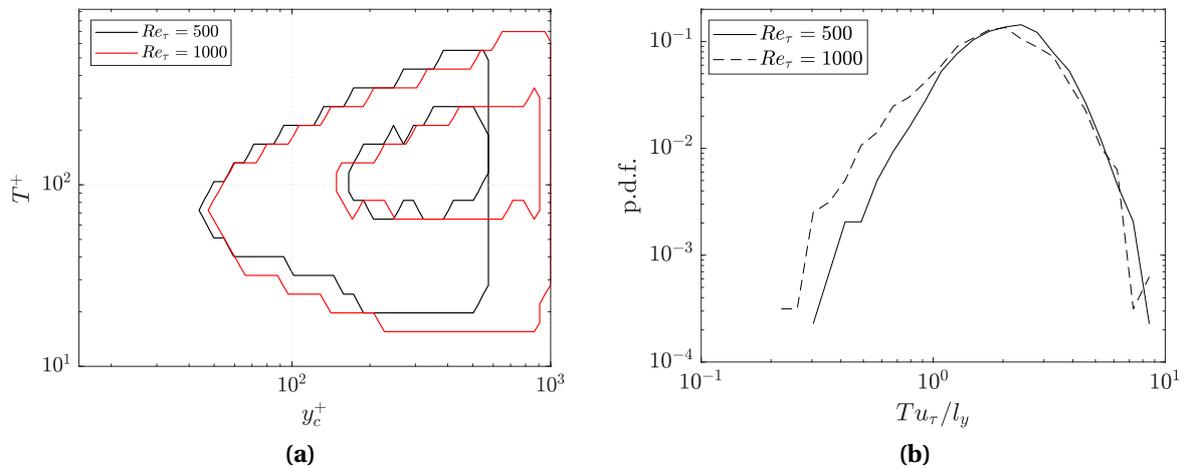
La Figura 5.6(b) representa el periodo de estas estructuras normalizadas con el tiempo de rotación de un torbellino local. Se obtiene una distribución que se puede aproximar a una normal con media  $Tu_\tau/l_y = 2.5$  (aunque elevada dispersión). Esta recta indica que la mayoría de los objetos presentan un periodo de vida equivalente a la duración de 2.5 veces esta cantidad representativa, y algunos alcanzan 10 veces este periodo. Por lo tanto, se vuelve a concluir que el tiempo de vida es proporcional al tamaño del vórtice, existiendo autosemejanza temporal. Asimismo, esto refuerza el tiempo total escogido en la simulación para

abarcar la vida completa de los vórtices.

El número de Reynolds no parece influir de forma significativa en la vida de estos objetos. Sin embargo, el tipo de evento  $Q^-$  sí parece tener influencia. En la Figura 5.6(b) se puede apreciar que la p.d.f para los *sweeps* pueden alcanzar menores tiempos de vida (este hecho se evidencia más si no se realiza el filtro de volumen -Figura no mostrada-). Esto puede ser debido a la dinámica de los mismos. Mientras que los *ejections* parten de la pared y se alejan de ella hasta que se disipan por la turbulencia del dominio, los *sweeps* tienden a acercarse a la pared, lo que suponen mayor disipación y por lo tanto menor duración de sus vidas.

Sin embargo, para elevadas alturas, la influencia en este tipo de vórtices es menor, y se ven más influenciados por los esfuerzos tangenciales medios, reforzando esa concepción de pares de  $Q2 - Q4$  cuya nacimiento y muerte están relacionados.

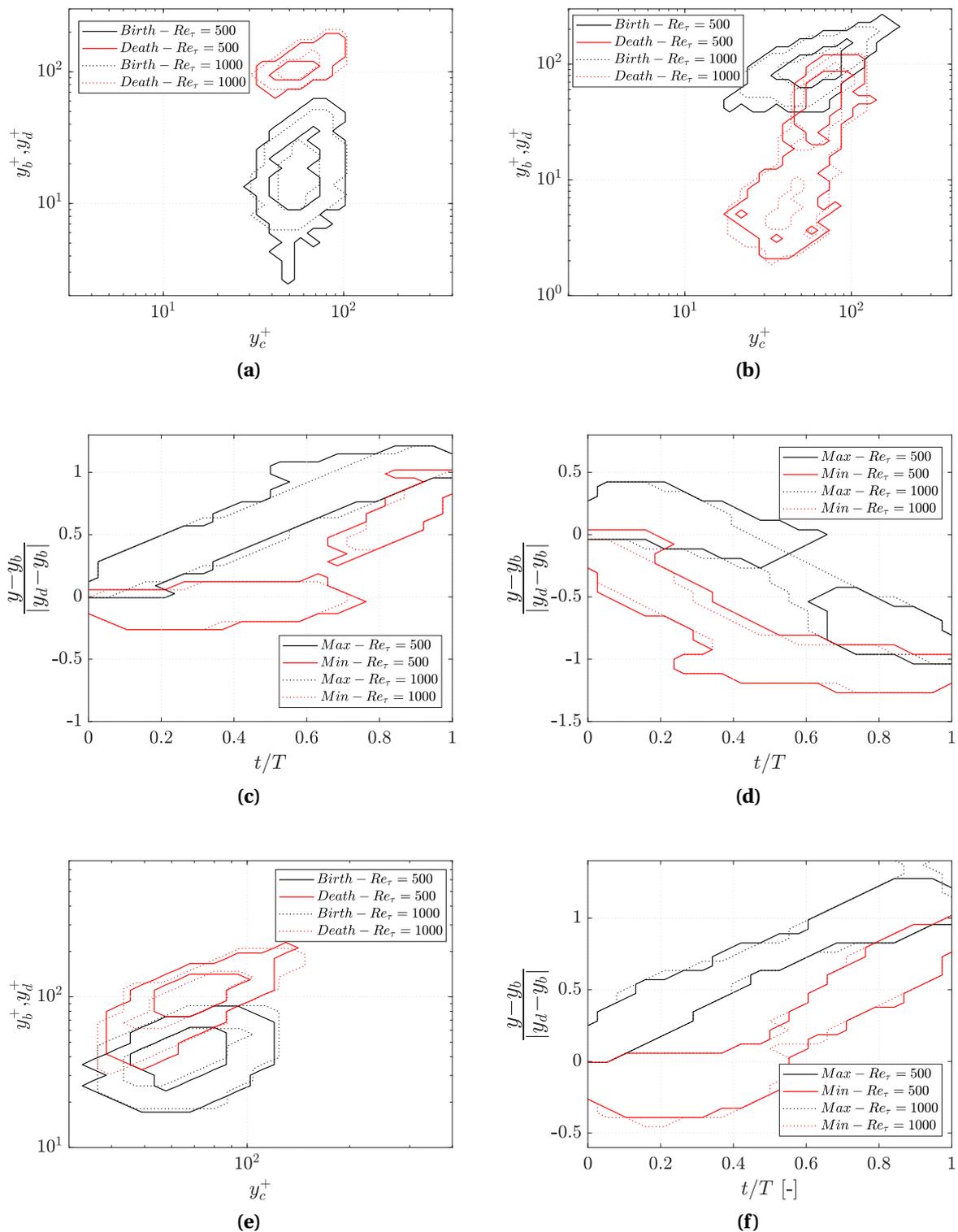
En la Figura 5.7 se muestra los resultados del tiempo de vida de los *vortex clusters*. Los vórtices desligados presentan tiempos de vida similares, siendo en algunos puntos incluso mayores (y los tiempos máximos alcanzados). En la Figura 5.7(b) se presenta el tiempo de vida adimensional para las estructuras que llegan a la capa logarítmica (ligados altos). Examinando los resultados se puede concluir que son periodos muy similares. La media, situada en  $Tu_\tau/l_y = 2$ , es ligeramente inferior (el tiempo de vida es inferior, ya que el tamaño también es menor). También existe por tanto, una autosemejanza temporal en estos objetos que relaciona el tiempo de vida y el tamaño, aunque distinta que para los *uv clusters*.



**Figura 5.7.:** (a) P.d.f del tiempo de vida de los vórtices desligados en función de la altura de su centro de masas  $J(T^+, y_c^+)$ . (b) P.d.f del tiempo de vida de los vórtices ligados altos adimensionalizando con el tiempo de rotación local. Ambas gráficas incluyen *vortex clusters* primarios. Los contornos representan el 0.5 y 0.98 del total.

### 5.4.2. Evolución posición de los objetos. Relación *sweeps-ejections*

Las diferentes estructuras se han clasificado de acuerdo a posiciones relativas en instantes temporales cualesquiera de sus vidas. Estas categorías (en especial los *sweeps* y los *ejections*) presentan diferencias importantes en dos momentos clave: el nacimiento y la muerte. Resulta interesante este estudio y determinar si concuerda con lo obtenido hasta ahora y visto en la literatura.



**Figura 5.8.:** (a,b,e) Conjunto de p.d.f.s de la posición (dirección normal a la pared) del nacimiento y muerte de los  $Q^-$ s ligados altos respecto a la altura de su centro de masas medio,  $J(y_b^+, y_c^+), J(y_d^+, y_c^+)$ . (c,d,f). P.d.f.s de las alturas máximas y mínimas de los los  $Q$ s ligados altos respecto al tiempo transcurrido desde su nacimiento adimensionalizado por el tiempo total de vida  $J((y^+ - y_b^+)/ (y_d^+ - y_b^+), t/T)$ . (a) y (c) Ejections. (b) y (d) Sweeps. (e) y (d) *vortex clusters*. Los contornos de la p.d.f en (a), (b) y (e) representan el 0.3 y 0.7 del total de los datos, mientras que en (c),(d) y (f) se ha optado por 0.6.

En esta sección se emplean únicamente las ramas primarias, para estudiar así la posición de nacimientos espontáneos y desapariciones debidas a la disipación del flujo. En el caso de nacer de otro vórtice o perecer por unión, el mecanismo físico no es el mismo e incluirlos en las estadísticas nos alejaría de los resultados buscados.

La mayoría de los vórtices presentaban vidas cortas, sin tiempo suficiente para desarrollarse y modificar su forma y posición, por lo que la diferencia entre el punto del nacimiento y la muerte no es suficientemente ilustrativa. Se analizarán principalmente las ramas ligadas a la pared altas, ya que la diferencia de posición entre nacimiento y muerte pueden resultar más relevantes. También se discutirán los mecanismos de formación de estas ramas altas, si son debido principalmente a la presencia de la pared, o por el contrario, pueden originarse en cualquier altura debida a la viscosidad del fluido.

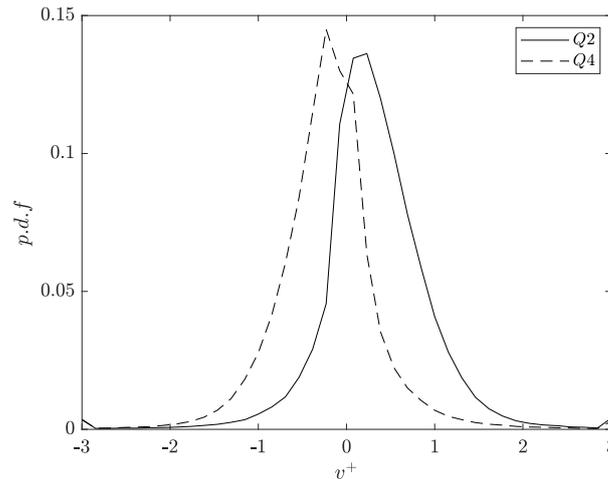
La Figura 5.8 presenta los resultados de las p.d.f.s que relacionan la posición de nacimiento y muerte de los distintos objetos con la distancia normal a la pared de su centro de masas medio.

En la Figura 5.8(a) se muestran estos instantes fundamentales de los *ejections*. Se puede observar que la inmensa mayoría crecen en la región *buffer*, muy cerca de la pared, y desaparecen una vez han alcanzado la región logarítmica. En la Figura 5.8(c) se representa de forma adimensional las alturas máximas y mínimas de los mismos respecto a la vida adimensional y sirve para complementar esta información. Analizándola se puede concluir que tras un periodo en el que están ligados a la pared, que ocupa la mayor parte de la vida del vórtice, ascienden hasta alcanzar la capa logarítmica donde desaparecen por viscosidad. Si bajamos el porcentaje del contorno, en lugar de dos zonas continuas aparecerían dos zonas diferenciadas, una cerca de la pared, y otra para las  $y^+$  más elevadas, lo que acentúa la idea del rápido ascenso que sufren estas estructuras que se corresponde con el fenómeno del *burst* típico de los *streaks* de baja velocidad ( $u < 0$ ).

El proceso contrario ocurre con los *sweeps* (Figura 5.8(b)). Estas estructuras nacen principalmente en la capa logarítmica y posteriormente van descendiendo. Algunas, sin embargo, aparecen (su centro de masas) en la región *buffer*. Finalmente se van disipando conforme se acercan a la pared y se ligan a la misma (para  $Re_\tau$  más bajos se observa que la posición donde ocurre la muerte está más alejada de la pared de media). En la Figura 5.8(d) se complementa esta información al igual que ocurría con los *ejections*. La distribución de alturas máximas y mínimas durante su periodo de vida sugiere que tras su nacimiento se produce un rápido descenso constante hasta que se quedan ligadas a la pared durante la mayor parte de su tiempo de vida.

Por su parte, los *vortex clusters*, no presentan posiciones tan marcadas de muerte y nacimiento, aunque estos últimos se producen más cerca de la pared (posiblemente motivados por la mayor disipación ocasionada en esta zona). En la Figura 5.8(f) se representan sus alturas máximas y mínimas durante todos sus instantes temporales. Este resultado, junto a la posición de nacimiento y desaparición sugiere que estos objetos tienen un comportamiento similar al de los *ejections*, ya que también se van alejando de la pared. Sin embargo el régimen de ascenso parecer ser distinto, y no se caracteriza por estar ligado a la pared durante tanta parte de su tiempo de vida (ascenso más continuado)

En la Figura 5.9 se muestra la p.d.f de la velocidad normal a la pared de las estructuras primarias, diferenciando entre eventos  $Q^-$ s. Claramente sigue una tendencia que concuerda con la definición de estos objetos, *sweeps* media negativa y *ejections* positiva. Sin embargo,



**Figura 5.9.:** Velocidad de normal a la pared normalizada para todos los  $Q^-$  s primarios.

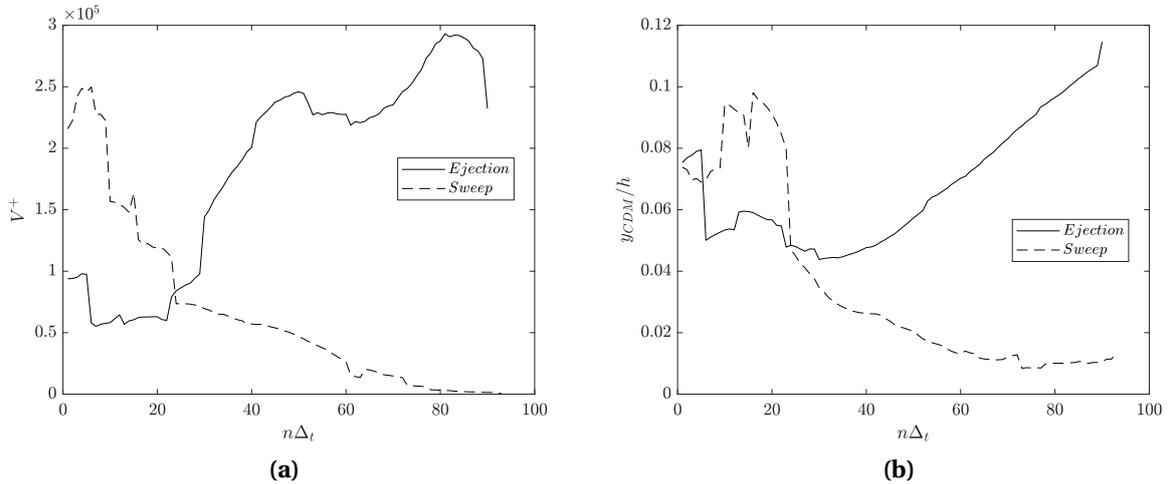
el valor medio es muy cercano a cero, a diferencia de lo obtenido por otros autores como Lozano-Durán [16]. Para determinar esta velocidad se ha tenido en cuenta el desplazamiento del centro de masas perpendicular a la pared. Por lo tanto, no solo influye la propia velocidad vertical, sino también el crecimiento y pérdida de volumen de los mismos. Por este motivo, coincidiendo con los resultados anteriores que mostraban que los *sweeps* y *ejections* se mantenían ligados a la pared durante el mayor tiempo de su vida, la variación del volumen de las mismas puede tener más influencia que la velocidad vertical en la variación de este parámetro (y bajar en consecuencia el valor medio) e incluso se pueden obtener valores que no coinciden con la definición de los cuadrantes. Si se graficaran únicamente las estructuras más grandes del dominio como los vórtices ligados altos, la media de las velocidades verticales se acercaría más a  $\pm u_\tau$ .

Por lo tanto, se ha visto que estas grandes estructuras pueden crecer a cualquier altura, por lo que, principalmente, el esfuerzo cortante es el mecanismo de creación de las mismas. Sin embargo, también es cierto, que la pared se puede considerar con una de las principales fuentes de cizallamiento del flujo y que las estructuras se adhieren a esta por esa intensidad cerca de la misma. Es en la pared donde nacen gran parte de las estructuras, pero las grandes estructuras se espera que surjan más lejos (Del Álamo *et al.* [23] y Lozano Durán *et al.* [34]).

El hecho de concluir esta concepción de que las estructuras coherentes surgen a cualquier altura por el esfuerzo cortante refuerza la idea de los pares de *sweeps* y *ejections* (de lo contrario tendrían mayor relevancia los que nacen en la pared). Por ello, en este trabajo inferimos los pares de  $Q^-$  s como la unidad coherente básica de la turbulencia de pared. Estos pares se determinan en base a los criterios presentados en 4.3. En la Figura 5.10 se muestra la evolución conjunta de un par  $Q2 - Q4$ . Por un lado, se presenta el volumen de los mismos (ambos tienen un volumen del mismo orden de magnitud), y por otro lado la evolución típica de los centros de masas de estas estructuras. En la primera se puede apreciar como se van transfiriendo volumen entre los elementos del par, mientras que en la segunda se puede apreciar el movimiento respecto a la pared típico de estas estructuras.

A diferencia de otros autores que incluyen en el conjunto los *vortex cluster*, con nuestros resultados no se han encontrado evidencias de la relación entre ambos tipos de vórtices.

Pese a que algunas estructuras si superaban ciertos criterios, estos se caracterizaban por ser poco restrictivos, permitiendo que varios *vortex cluster* se pudieran relacionar con un mismo par. Al representar su evolución temporal de los posibles candidatos con el par principal (no mostrados) la idea de una posible relación perdía fuerza. Este hecho ya se concluyó en el resultado el capítulo del análisis estático, pero es incluyendo todos los pasos temporales cuando los resultados son más esclarecedores.



**Figura 5.10.:** (a) Evolución temporal del volumen (adimensionalizado en unidades de pared) de un par de Q2-Q4. (b) Evolución temporal del centro de masas (adimensionalizado por anchura del canal  $h$ ) de un par Q2-Q4.

## 5.5. Velocidad de advección

En el código de identificación temporal de vórtices empleado se desplazaba uno de los dos campos según la velocidad de advección de los objetos del mismo para aumentar el solapamiento obtenido de las estructuras, obteniendo así un mayor número de conexiones. El problema radica en que no se dispone de este valor antes de ejecutar esa parte del código, por lo que se debe usar otra velocidad sustituta. La opción más directa es emplear la velocidad media en la dirección del flujo, es decir, estamos considerando estructuras coherentes “inertes” que se desplazan con  $U_m$ . Esta consideración implica una velocidad distinta para cada plano de altura constante, disminuyendo al acercarse a la pared para cumplir la condición de no deslizamiento. En un primer momento choca la idea de que las estructuras encontradas en el primer plano prácticamente no se desplacen.

El estudio de la velocidad de advección está ligado a las estructuras coherentes y ya ha sido investigado por varios autores. Entre ellos, Kim y Hussain [37] que determinaron la velocidad de propagación de las fluctuaciones de presión y velocidad numéricamente en un canal y concluyeron que está es aproximadamente igual a la velocidad local media, exceptuando las zonas más próximas a la pared. Posteriormente, Del Álamo y Jiménez [38] encontraron que las pequeñas escalas próxima a la pared se desplazan a una velocidad local media no nula, mientras que las grandes escalas viajan a una velocidad uniforme aproximadamente igual a la del flujo.

Por este razonamiento, se empleó la velocidad media en sustitución a la de advección de

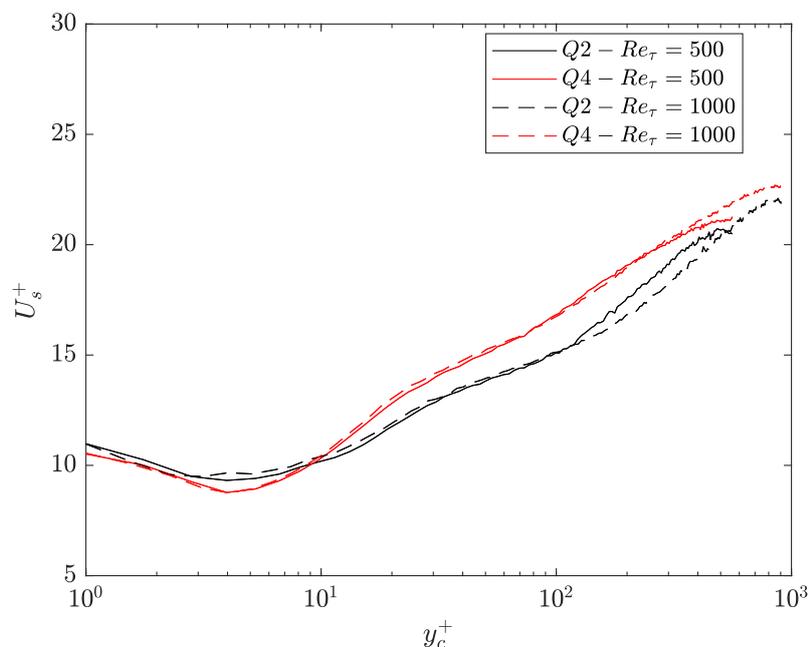
las estructuras, ya que es adecuada para la mayor parte del dominio. Sin embargo, cerca de la pared los vórtices se desplazan más rápido que lo predicho y por ello el bucle de “conexiones rápidas” podía presentar más errores en esa zona. Esta inexactitud se intenta paliar empleando el último filtro, cuyo objetivo son estas pequeñas estructuras que debido a un desplazamiento mayor al esperado no tienen solapamiento con su objeto homólogo del instante temporal anterior.

Cada punto de un objeto tiene una velocidad de advección diferente que determina cómo se deforma dicha estructura. Aplicar este gradiente de velocidad a cada objeto en la identificación temporal no es posible. Sin embargo, el código presentado si se puede mejorar con la velocidad de advección media medida en el centro de masas (esta mejora se propone como futuros trabajos, pero no ha sido implementada finalmente). En el postproceso se ha determinado esta magnitud mediante la evolución de los centros de masas en cada uno de los instantes temporales.

$$u_{adv} = \frac{y_{CDM}^{k+1} - y_{CDM}^k}{\Delta_t} \quad (5.4)$$

Esta forma de calcular la velocidad por instantes temporales consecutivos presenta el problema de que el centro de masas en la dirección de corriente puede variar no solo por desplazamiento, sino también por desprendimiento o unión de otros vórtices que modifican su centro de masas. Para acotar este error se analizan únicamente las ramas primarias. Aun así, es necesario descartar los pasos temporales donde se producen estas modificaciones de la posición del vórtice ajena a la velocidad de advección.

Los resultados obtenidos para las ramas primarias se muestran en la Figura 5.11.



**Figura 5.11.:** Velocidad de advección en unidades de pared de las  $Q^-$ s primarias en función de su distancia media (centro de masas) a la pared.

Se puede observar que la velocidad de advección crece conforme el centro de masas de la

estructura se acerca a la mitad del canal, de forma suave y homogénea. Todas las estructuras se desplazan aproximadamente a la velocidad del perfil medio  $U(y)$ , por encima de la capa *buffer*. Cuando alcanza las posiciones finales su valor es aproximadamente igual a la velocidad media del flujo en el centro del canal, que viene dada por la Ecuación 5.5.

$$U_s^+ = \frac{1}{u_\tau} \sim 20 \quad (5.5)$$

Sin embargo, a diferencia de la velocidad media del flujo, cuando se aproxima a la pared no disminuye hasta hacerse nula. Si no que converge a un valor constante aproximadamente de  $u_s^+ \approx 10$ .

Es interesante distinguir la velocidad de advección que presenta cada estructura estudiada. En general, las distintas categorías no difieren de los resultados obtenidos en la Figura anterior. Las ramas ligadas altas siguen la misma tendencia, pero sus resultados presentaban mayor dispersión (Figura no mostrada).

Sí que se pueden encontrar más diferencias de velocidad entre los *sweeps* y *ejections* (hay un pequeño desplazamiento en las gráficas) Para una misma posición de  $y_c$ , los *ejections* se desplazan más lentamente que los *sweeps*. Este desplazamiento es aproximadamente de  $u_\tau = 2$ . Esto concuerda con la definición de ambos eventos (*ejections* se frenan y ascienden y *sweeps* aceleran) y con la idea de que los *ejections* parten de los *streak* de baja velocidad, mientras que los *sweeps* desembocan en los de alta velocidad.

## 5.6. Cascada turbulenta a partir de las estructuras coherentes

### 5.6.1. Introducción

En este capítulo se estudian las interacciones entre las diferentes estructuras coherentes halladas en el campo fluido desde el punto de vista de la escala de energía. Este fenómeno fue introducido cuando comenzó el estudio de la turbulencia. Kolmogorov planteó que las grandes escalas de energía alimentan a las escalas más pequeñas sucesivamente hasta que el tamaño es suficientemente pequeño para disiparse. Los objetos estudiados se pueden corresponder a estas escalas, y, sobre todo, a los torbellinos de diferentes tamaños que describía Richardson en su famoso poema.

Esta interpretación ha sido estudiada por diversos autores desde que apareció el concepto de estructuras coherentes, entre ellos por Jiménez (2012) en su cascada de momento. El modelo clásico de la cascada se basa en que las diferentes variables del flujo que se conservan se transfieren a través de una jerarquía de escala mediante eventos de cascada consistentes en vórtices que se separan o unen con otros.

Asimismo, se expondrá la existencia de una cascada inversa a la vez que la directa presentada por Kolmogorov, que depende del tipo de flujo y de la cantidad transferida. Es decir, nos alejamos de la concepción de la cascada de energía como un proceso unidireccional hacia uno mucho más complejo. La cascada directa se compone de objetos que sufren o bien fragmentación inercial y van disminuyendo su tamaño generando los ya comentados

*children*, mientras que otros de tamaño menor, se disipan por la viscosidad. La cascada inversa consiste en objetos que se van uniendo a otros del campo fluido para generar mayores estructuras.

Por lo tanto, es evidente que más allá de los vórtices catalogados como primarios se necesita estudiar aquellos objetos que nacen o mueren en ellos, es decir, las ramas secundarias. Se estudiarán siempre relacionándolos con un vórtice primario del cual nacen o al que se unen finalmente. En este apartado, nos centramos principalmente en los vórtices desligados altos. En el estudio dinámico se observó que su porcentaje en número de objetos era muy pequeño respecto al total de ramas primarias, no así en volumen. La mayoría de los vórtices altos pertenecen a los secundarios debido a que se trata de estructuras grandes que por su influencia en el campo que los rodea suelen interaccionar con la mayoría de estructuras cercanas.

Estas estructuras grandes pueden alcanzar tiempos de vida 3 veces mayores a los resultados mostrados en el apartado anterior referidos a la media. Si se consideran estas estructuras, tanto primarias como secundarias, analizando el tiempo de vida de las mismas y sus continuaciones (dando una idea general del tiempo de disipación de estructuras grandes) se pueden alcanzar tiempos adimensionales de  $T^+ > 1000$  (tiempos elevados pero aún más bajos que el periodo total de simulación).

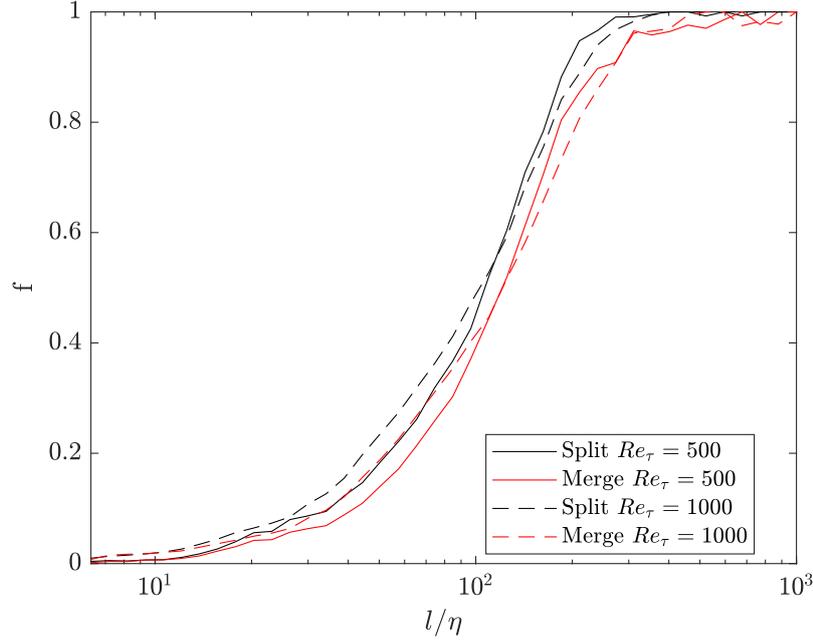
### 5.6.2. Cascadas directa e inversa de vórtices

La cascada de energía se compone de interacciones básicas entre las estructuras coherentes, entre la que destacan que un vórtice grande se separe en más pequeños (pudiendo uno de estos hijos ser su continuación si la diferencia de volumen cumple el criterio correspondiente), o que una estructura se una a otra mayor. En función de si esta interacción supone un decremento de volumen (equivalente a energía en este estudio) se cataloga como evento de cascada directa. En caso contrario, como cascada inversa.

Si se analizan los vórtices primarios, se observa que no todos tienen la misma disposición para perder o ganar volumen interaccionando con los objetos vecinos. En la Figura 5.12 se representa la fracción de vórtices primarios que modifican su volumen mediante una rotura o una unión, en función de su tamaño. El tamaño está indicado con el parámetro  $l$ , que representa la diagonal del paralelepípedo que conforma la caja. Se encuentra adimensionalizado por la escala de Kolmogorov  $\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4} = l_0(Re_\tau)^{-3/4}$ .

Se puede observar que conforme aumenta el tamaño de las estructuras la posibilidad de sufrir mezclas o uniones se incrementa, alcanzando prácticamente la unidad para los tamaños mayores, es decir, los grandes objetos siempre van a sufrir al menos una interacción de cascada durante su tiempo de vida. También se puede concluir observando los valores mínimos, que a partir de cierto valor prácticamente no se produce ninguna de estas interacciones. Este valor se corresponde a  $l = 30\eta$ , vórtices pequeños dominados principalmente por la viscosidad que se disipan sin uniones o segmentación inercial. Para un tamaño más bajo, solo existiría cascada directa motivada por esta viscosidad.

Asimismo, la Figura anterior daba información sobre la predominancia de la cascada directa sobre la inversa. La curva correspondiente a los eventos directos está desplazada hacia arriba respecto la inversa. Esto significa que algunas estructuras sufren separaciones, pero no uniones. Esta conclusión se puede analizar de forma numérica hallando el porcentaje de



**Figura 5.12.:** Fracción del número de ramas primarias  $Q^-$  que sufren una separación o unión en algún momento durante su tiempo de vida.

volumen ganado y perdido debido a uniones y separaciones del total de las estructuras coherentes, que se puede interpretar con una medida de la contribución de las cascadas directas e inversas de la evolución temporal de los vórtices.

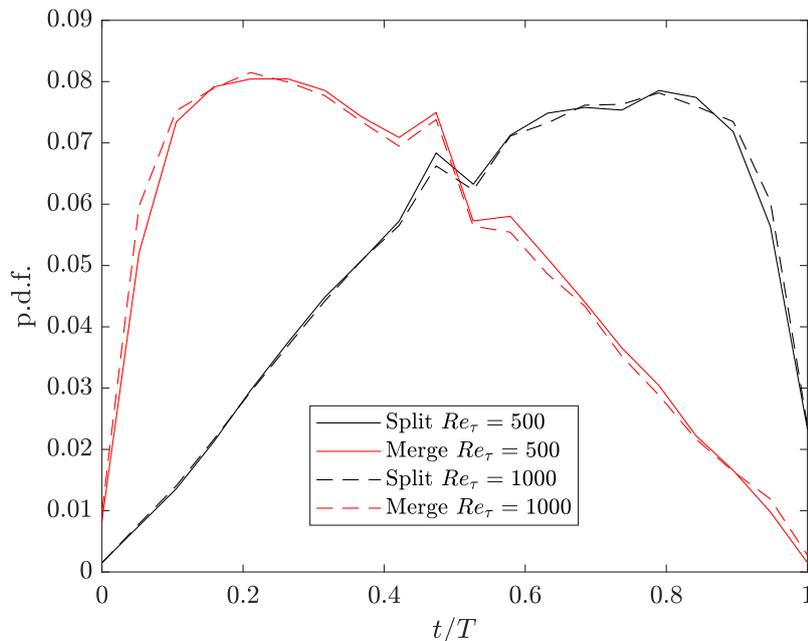
En definitiva, se trata de comparar el volumen ganado por las ramas primarias en sus interacciones de cascadas con el volumen medio de todos los instantes temporales,  $V_b$ . El volumen total perdido (cascada directa)  $\sum_B V_{sd}$  se define como la suma del volumen de todos los fragmentos perdidos durante su tiempo de vida, es decir la suma de todos los *children* de la rama principal. El volumen total ganado (cascada inversa)  $\sum_B V_{si}$  se define por su parte, como la suma de todos los elementos ganados o *partners* de las ramas principales. Los resultados obtenidos para todas las ramas principales son:

$$\frac{V_{sd}}{V_b} = 0.494 (Re_\tau = 500) \quad \frac{V_{sd}}{V_b} = 0.441 (Re_\tau = 1000) \quad (5.6)$$

$$\frac{V_{si}}{V_b} = 0.417 (Re_\tau = 500) \quad \frac{V_{si}}{V_b} = 0.359 (Re_\tau = 1000) \quad (5.7)$$

La relación entre ambas magnitudes resulta  $r_B = \frac{V_{sd}}{V_{si}} = 1.2$  (media para ambos Reynolds), es decir, va a favor de la cascada directa de energía, y esta predominancia se hace más importante conforme aumenta el número de Reynolds. Además, las uniones y mezclas suponen un mecanismo fundamental implicado en el crecimiento y decrecimiento de los vórtices. Lozano–Durán [16], obtiene valores algo mayores de  $V_{sd}/V_b$  y  $V_{si}/V_b$ , en parte debido a un aumento del  $Re_\tau$ , y a un filtrado de estructuras pequeñas y las pertenecientes a la capa *buffer*. Si se analizan los *vortex cluster* (no mostrados) esta relación  $r_B$  es ligeramente mayor, siendo mayor el desequilibrio entre las dos cascadas presentes.

Si se introduce en este estudio la componente temporal, se puede observar que existe una distribución asimétrica entre la aparición de interacciones directas e inversas según el instante temporal en que se encuentra el vórtice dentro de su tiempo de vida. En la Figura 5.13 se representa este efecto para los  $Q^-$ s (resultados análogos para los *vortex clusters*), y se puede concluir que la mayoría de las uniones se producen en los instantes iniciales de vida y contribuyen al crecimiento de las estructuras, mientras que la separación tienden a surgir al final contribuyendo a disgregar los objetos para disiparlos.



**Figura 5.13.:** Función de densidad de probabilidad del tiempo en el que aparece un evento de cascada en un vórtice adimensionalizado con la vida total del mismo.

### 5.6.3. Posición relativa de los vórtices secundarios

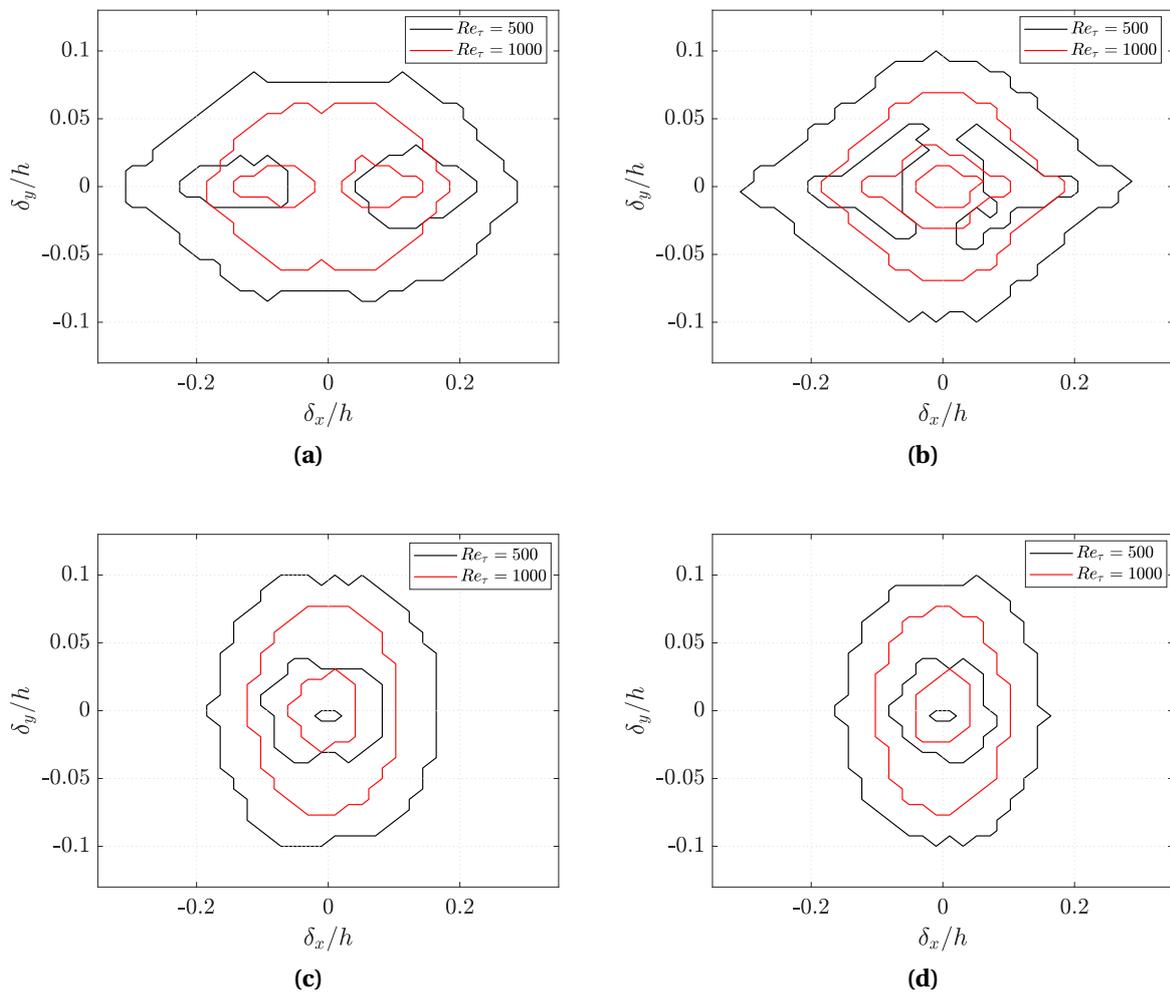
Por último, se estudia la distribución espacial de los *children* y *partners* (centros de masas) respecto a los vórtices primarios con los que están relacionados. Se calcula la distancia que presenta el objeto antes o después de su unión al centro de masas de la estructura en el instante temporal donde se produce la interacción.

Observando los resultados lo primero que se puede concluir es que la mayoría de estas interacciones tienen lugar en la dirección de corriente. Esto se deduce por que la distancia en  $X$  siempre es mayor que en  $Y$  (3 veces mayor de media). En la Figura 5.14(a) se observa que las separaciones en los eventos  $Q^-$ s se realizan en los extremos de la estructura (tanto en la cola como en el frente), y puede ser debido a que la viscosidad tiende a deformar e inclinar las estructuras y tiende a romper estas partes.

En la Figura 5.14(b) se muestran los resultados para las uniones. Se caracterizan, a diferencia de la parte anterior, por aparecer mayor desplazamiento vertical, es decir, estas uniones se pueden dar (además de los extremos) abajo o arriba de las estructuras. Puede ser motivado por la distinta velocidad de advección de los objetos en función de su distancia a la pared

que hace que las grandes estructuras alcancen otras más pequeñas y las engloben en su volumen.

Los *vortex clusters* ofrecen menos información que los anteriores. En las Figuras 5.14 (c) y (d) la distancia entre centros de masas se concentra en el cero. Ocurre al igual que los *uv clusters* que la mayoría ocurren en la dirección longitudinal, sin embargo se obtiene que las separaciones y uniones se encuentran muy próximas al núcleo de la estructura principal. Esto es debido a que este tipo de vórtices están formados por filamentos y están casi huecos, y las separaciones se producen dentro del vórtice. También hay que tener en cuenta que los *uv cluster* presentaban tamaños mayores de  $\Delta_x$ , por lo que una interacción es más notoria (por ejemplo, una misma separación en la cola supondría una menor magnitud en los *vortex clusters*).



**Figura 5.14.:** Conjunto de p.d.f.s de la distancia vertical y longitudinal de los centros de masas de los *children* y *partners* respecto a los centros de masas de los vórtices principales con los que interactúan. (a) Separaciones  $Q^-$  s. (b) Uniones  $Q^-$  s. (c) Separaciones *vortex clusters*. (d) Uniones *vortex cluster*.



# 6

## Conclusiones y trabajos futuros

### Índice

---

6.1. Conclusiones del proyecto . . . . .	77
6.2. Trabajos futuros . . . . .	79

---

### 6.1. Conclusiones del proyecto

Las principales conclusiones de este Trabajo de Fin de Máster se concentran en los resultados obtenidos en las 3 ramas del análisis: energética, estática y dinámica. Los aspectos del código se discutirán levemente en la sección de trabajos futuros.

- Para discriminar qué puntos del dominio pertenecen a vórtices se han empleado criterios que dependen de las variables energéticas del problema. Todos estos criterios dependen de un umbral que se calibra mediante un estudio de percolación, y que dependiendo de cuánto de restrictivo sea, las regiones vorticales ocuparán más volumen del dominio. Este porcentaje de ocupación no está definitivamente claro en la literatura, pero actualmente los autores tienden a dar valores al umbral para que la cantidad de vórtices no sea elevada, y pequeñas regiones puedan dar información útil. En nuestro problema se han estudiado dos criterios obteniendo resultados satisfactorios. Por un lado, se han obtenido estructuras altamente energéticas, que con un 8% de ocupación suponían el 65% del esfuerzo de Reynolds. Son llamadas *uv cluster* y a su vez se dividen en *sweeps* y *ejections*, existiendo un predominio de estos últimos. Por otro lado, otro criterio daba como resultado los *vortex clusters*, estructuras poco energéticas pero con una importante disipación turbulenta. Con un 4% de ocupación en volumen suponen el 27% de la disipación turbulenta total.
- Una vez obtenidos estas regiones de puntos era necesario agregarlas en 3 dimensiones y examinar las características geométricas resultantes. Analizando la función de densidad de probabilidad entre la  $y_{max}$  y la  $y_{min}$  se concluye que es adecuado separar los resultados en dos tipos de estructuras: vórtices desligados y ligados a la pared. Además, ambos tipos de vórtices presentan autosemejanza espacial.
- Los desligados se caracterizan por ser estructuras pequeñas, isotrópicas y homogéneas, con cajas envolventes cúbicas, que se originan alejadas a la pared, para cualquiera de los dos criterios. Su importancia en la dinámica de la turbulencia es menor.
- Los vórtices ligados a la pared están formados por estructuras más grandes que las anteriores que crecen en la pared y pueden llegar y desarrollarse ampliamente alcan-

zando la capa logarítmica (conociéndose así como vórtices ligados altos). En general, son más largos en la dirección longitudinal, teniendo una relación de aspecto  $l_x \sim 3l_y$  y  $l_z \sim l_y$ . En la dirección transversal los *vortex cluster* son más anchos en proporción  $l_z \sim 1.5l_y$ .

- Respecto al volumen (se ha aplicado un filtro para descartar los objetos más pequeños considerados ruido numérico), los *vortex cluster* son más pequeños que los obtenidos con el criterio de Chong. El volumen de los mismos se puede relacionar con su dimensión vertical a través de un coeficiente  $V_q \sim \Delta_y^f$ . El coeficiente anterior se corresponde con la dimensión fractal y es  $f = 2.25$  para los *uv clusters* y  $f = 2$  para los *vortex clusters*.
- La forma obtenida para los vórtices derivados del análisis de cuadrantes se caracteriza por una estructura con cavidades o huecos muy alargada en la dirección X, con la masa repartida uniformemente en todo el volumen. La forma de los obtenidos por Chong, se caracteriza por estar formada por gusanos o filamentos, siendo una estructura más hueca, con algunas zonas con la particular forma de horquilla.
- La mayoría de los objetos identificados tienen su centro de masas localizado en una región entre  $10 < y_c^+ < 100$ , y aumentan su tamaño al alejarse de la pared. Dentro de los eventos  $Q^-$  s existen diferencias de posición entre los *sweeps* y *ejections* derivadas de la dinámica de estas estructuras. Los *sweeps* se acercan más a la pared debido a su velocidad normal negativa que los aplasta contra la misma, mientras que los *ejections* experimentan el proceso de *bursting*.
- En cuanto al estudio temporal, se pueden concluir que estas estructuras, además de coherencia espacial, presentan autosemejanza temporal. Su tiempo de vida es proporcional a altura media  $l_y$ . En general, todos los tipos de objetos presentan vidas muy cortas por disipación en el dominio o interacción con vórtices vecinos.
- Dentro de todos los objetos, los vórtices que más viven son los clasificados como ligados a la pared altos, es decir, que cumplen  $y_{max}^+ > 100$ . Debido a que su vida es más larga tienen tiempo de desarrollarse y cambiar de tamaño y forma durante su vida. El resto de estructuras con menor tiempo de vida se mantienen con un tamaño de vida muy uniforme durante su presencia en el campo fluido.
- Analizando la evolución temporal de los Q2 y Q4 se pueden extraer conclusiones de su crecimiento y desarrollo a lo largo de su vida. Los *ejections* nacen cerca de la pared y permanecen ligados a ella durante la mayor parte de su tiempo de vida. Posteriormente ascienden de forma rápida alejándose de la pared. Derivan de los *streaks* de baja velocidad  $u$  que sufren un proceso de *bursting*. Por su parte, los *sweeps* se originan más lejos de la pared y descienden quedándose ligados a ella. La velocidad vertical negativa los aplasta contra la pared relacionándose así con los *streaks* de alta velocidad  $u$ . Ambas estructuras se encuentran relacionadas a pares que pueden interaccionar entre sí y forman la unidad básica de la turbulencia de pared. Algunos autores añaden a ese grupo un *vortex cluster* embebido en el *ejection*, pero en este trabajo no se han encontrado evidencias de tal vínculo.
- La velocidad de advección es creciente conforme los vórtices se alejan de la pared, siendo similar a la velocidad del perfil medio para las regiones alejadas de la pared. Según nos acercamos a la misma se alcanza una velocidad de advección con un valor constante distinto de 0.

- Las roturas y uniones que se dan entre los distintos vórtices durante su evolución se pueden corresponder a una cascada de energía similar a la propuesta por Kolmogorov, explicada con estructuras coherentes. Las ramas principales sufren divisiones normalmente en el final de su tiempo de vida (periodo de disipación o desaparición), mientras que las uniones se suelen dar al comienzo de la misma (periodo de crecimiento del vórtice). Estas se dan prácticamente a todas las alturas del dominio, exceptuando muy cerca de la pared, donde los vórtices están dominados por la viscosidad. Es decir, existe una cascada directa formada por las disgregaciones inerciales de los vórtices, y una cascada inversa debida a las uniones de objetos con otros mayores. Sin embargo, siempre aparecen más separaciones que uniones ocasionando un desequilibrio hacia la escala directa.

## 6.2. Trabajos futuros

Este trabajo deja diferentes frentes abiertos, tanto para añadir como para mejorar su implementación. En primer lugar, sería interesante alcanzar un mayor número de Reynolds en los análisis puesto que proporcionarían mayor información sobre las estructuras coherentes presentes en la capa logarítmica. Sin embargo, aumentar el número de Reynolds incrementa considerablemente la carga computacional y la memoria necesaria. Para abordar tal trabajo, sería necesario mejorar algunos aspectos del código en lo referente a la paralelización y a la memoria virtual.

- Durante todo el código se emplean matrices de tamaños demasiado elevados, que pueden suponer un desbordamiento de la RAM en ciertos puntos del código. Una lectura (compresión-descompresión) parcial de la matriz booleana en el código de agregación mientras se envían partes al resto de las soluciones sería interesante. También reducir el tamaño de los punto `.vor`, evitando realizar el solapamiento descrito en las *conexiones rápidas* que supone tener que guardar todos los puntos pertenecientes a un vórtice. Se podría intentar sustituir esta información por la caja de los vórtices juntos a parámetros adicionales de forma. Otra opción sería implementar algún tipo de compresión para estos archivos tan pesados.
- En cuanto a la identificación temporal, presentaba algunos errores que podían derivar en conexiones espurias. Como se ha descrito en 5.5, la velocidad de advección que experimentan las estructuras no es equivalente en todo el dominio a la velocidad del perfil medio. Este hecho es más significativo cerca de la pared, donde no tiende a cero (lo que sería lógico para cumplir la condición de no deslizamiento). Para evitar este problema, una vez realizado este primer análisis, resultaría de gran utilidad añadir la velocidad de advección real al código de identificación temporal, diferenciando el valor por planos y por el tipo de evento  $Q^-s$  (se había llegado a la conclusión que los *sweeps* y los *ejections* presentaban diferentes velocidades de advección).
- Otro problema de la identificación temporal es la interacción entre vórtices independientes. En algunas ocasiones hay vórtices que se tocan con otros sin llegar a unirse. El código presentado los considera como una unión y dependiendo de la relación de volumen entre los vórtices que están en contacto puede truncar la vida de una rama principal (al considerarlo como *children o partner*). Para resolver este problema se propone realizar la mejora según los criterios de identificación de vórtices. Por un lado, se pueden implementar criterios de identificación que den más información de los

vórtices como puede ser la posición de los núcleos de los mismos. Cuanto mayor es la información más fácil es el correcto seguimiento temporal de los mismos (hecho que ya se evidenciaba al añadir el análisis de cuadrantes). Un criterio de estas características es el de Jeong *et al.* [39], que supone un incremento computacional importante.

- Otra forma de solucionar este error es utilizar uno de los criterios simples ya empleados de forma recursiva para distintos valores del umbral. La idea es aplicarlos mínimo dos veces, una de ellas con el valor establecido por el estudio de percolación, que nos dará el volumen de las estructuras coherentes, y la siguiente con un valor muy restrictivo que solo deje pasar los núcleos de los vórtices grandes (que son los que principalmente ocasionan este problema). Si una masa de puntos tiene dos núcleos habría que dividirlo en dos estructuras en función de la distribución de los mismos respecto al total de los puntos (tarea no trivial que requeriría calibración).
- Una posible mejora es analizar energéticamente los tipos de objetos. Las contribuciones energéticas han sido estudiadas en el capítulo 2.4. En el momento que se realiza el criterio de discriminación y se completa la matriz booleana se discrimina la cantidad de energía que transportan los vórtices. Sin embargo, no se puede discriminar entre diferentes estructuras (ramas desligadas y ligadas). Para esto, sería necesario guardar una matriz adicional con valores de magnitudes relevantes como puede ser el esfuerzo de Reynolds. Cada elemento de la matriz se guardaría como un número real de 8 bytes, lo que supondría que ocuparía demasiada memoria para la matriz completa. Sería abordable para dominios computacionales y periodos de simulación más pequeños que los elegidos en este trabajo.
- Por último, se pueden añadir otras variables con información relevante tanto estática como dinámicamente. En el apartado estático se podría indagar más en la forma que tienen los objetos analizados. Un dato fundamental para entender más la morfología de las mismas puede ser el género, que suele definirse como el número de agujeros que tiene una superficie. Por otro lado, desde el punto de vista de la dinámica sería interesante profundizar más en las relaciones entre *sweeps* y *ejections* y en la forma y relación entre las estructuras calificadas como secundarias.

## **Parte II.**

# **Pliego de condiciones y presupuesto**



# 7

## Pliego de condiciones

### 7.1. General

Mientras se lleva a cabo cualquier proyecto de este tipo, el trabajador está sometido a una serie de condiciones que pueden influir negativamente tanto en su rendimiento como en su salud. Por lo tanto, con el fin de minimizar los posibles riesgos laborales derivados del mismo es necesario regular estas condiciones.

En concreto, en la realización de cualquier proyecto en el que se incluye el uso de pantallas de visualización de datos (PVD) existen riesgos que puedan afectar a la salud tanto mental como física del trabajador. Entre los problemas que pueden acarrear destacan: reducción de la salud ocular, lesiones en articulaciones, jaquecas y estrés. Un puesto de trabajo con PVD es *“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”*.

En consideración de este tipo de problemas, es necesario regular las condiciones de trabajo inherentes al mismo. 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 de datos, donde se aplican las disposiciones de Ley 31/1995, de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales, se reúne toda la normativa relacionada con este tipo de actividad.

De entre las variables que afectan al trabajador sobresalen:

- El esfuerzo físico necesario, debido a posiciones inestables, y en general riesgos dorso-lumbares.
- Las características del medio de trabajo, incluyendo el espacio de trabajo, condiciones del suelo, puntos de apoyo inestables.
- Exigencias de la actividad, debidas a un ritmo impuesto por un proceso que el trabajador no pueda modular y una duración que se exceda a las condiciones normales.
- Factores individuales de riesgo, siendo principalmente inadecuación de la vestimenta, o insuficiencia de los conocimientos necesarios a aplicar durante la realización del trabajo (formación).

Se pueden clasificar los posibles riesgos a los que se somete el usuario de este tipo de actividades en:

- **Seguridad:** debido a contactos eléctricos, caídas o golpes en el puesto de trabajo.

- **Higiene industrial:** comprende las condiciones de trabajo ruidosas, termo-higrométricas como temperatura, humedad así como la presencia de bacterias nocivas y/o transmisión de virus.
- **Ergonomía:** daños ocasionados por la fatiga física y/o mental como ansiedad, percepción borrosa, picores o irritabilidad.

## 7.2. Lugar de trabajo

El ambiente donde se realiza la actividad debe figurar según lo establecido en el Real Decreto 486/1997 del 14 de abril, sobre condiciones mínimas de seguridad y salud aplicables a los lugares de trabajo, además de a lo especificado en el Real Decreto 488/1997 ya reseñado sobre puestos de trabajo con PVD's.

### **Espacio**

El lugar de trabajo deberá estar dimensionado de tal forma que disponga de espacio adecuado para el trabajador y le permita los cambios de postura y movimientos de trabajo.

### **Vías y salidas de evacuación**

La empresa debe adoptar medidas de emergencia en las que se incluyan las vías y salidas de evacuación conocidas por los trabajadores. Existe una gran cantidad de normativas relativas a este aspecto, estando la mayoría de ellas enfocadas a la fase constructiva de la instalación. En este pliego de condiciones se asume que estas medidas fueron debidamente cumplidas en la construcción de la instalación.

### **Protección contra incendios**

Las instalaciones contra incendios deben ser instauradas y mantenidas por empresas previamente autorizadas por el organismo competente.

### **Instalación eléctrica**

La instalación eléctrica debe estar proyectada, puesta en funcionamiento y mantenida por una empresa debidamente autorizada por el Ministerio de Industria o la Consejería de Industria u organismo similar de la comunidad autónoma correspondiente.

Esta instalación debe evitar originar contactos con las personas, incendios y explosiones, ateniéndose para ello a lo establecido sobre tensiones y seguridad en los Reglamentos de Baja y Alta Tensión en vigor. Según lo establecido para actividades con equipos que incluyen pantallas de visualización, se debe: cumplir los requerimientos de la Directiva sobre emisiones electromagnéticas (niveles mínimos de radiaciones), garantizar el adecuado mantenimiento de los cables y proporcionar longitud suficiente de los mismos.

### **Condiciones termo-higrométricas**

El Real Decreto 488/1997 establece :

- La temperatura operativa de confort debe mantenerse en el rango de 23 a 26°C en verano y de 20 a 24°C en invierno. Además, los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.

- La humedad relativa del aire debe mantenerse siempre entre el 45 % y el 65 %, con el objetivo de prevenir la sequedad de ojos y mucosas

### **Iluminación y deslumbramiento**

La iluminación puede ser natural o artificial, siendo preferible natural, complementada de forma artificial cuando las condiciones ambientales lo requieran. Esta suele ser general, debiendo complementarse con iluminación localizada.

Los niveles de iluminación serán suficientes para garantizar el desarrollo de las tareas que se realicen en el puesto de trabajo. Asimismo, se deben evitar reflejos y deslumbramientos molestos en la pantalla u otras partes del equipo, basándose en la ubicación y orientación del mismo.

La norma da indicaciones sobre la colocación más adecuada del puesto de trabajo (y la pantalla) para evitar reflejos y deslumbramientos. Como recomendación, la pantalla se debe colocar perpendicularmente a las ventanas, y nunca frente a ellas o de espaldas a ellas, para evitar deslumbramientos y/o reflejos. Estas medidas pueden ser complementadas con el uso de cortinas, persianas o mamparas locales.

### **Ergonomía**

El diseño del puesto de trabajo está directamente relacionado con los problemas de postura. El principal motivo es que debido al uso de PVD's aparecen posturas estáticas prolongadas cuyos efectos se agravan cuando el diseño del puesto de trabajo es incorrecto. Debido a esto, es esencial que el diseño se adapte a las características anatómicas y fisiológicas de las personas. A continuación se enumerarán los principales elementos del puesto de trabajo relacionados con la correcta postura.

- Asiento: El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y dotando al usuario de una postura cómoda. La altura del mismo deberá ser regulable y el respaldo reclinable.
- Mesa: La superficie de la mesa de trabajo debe ser poco reflectante y de dimensiones suficientes como para permitir movimientos de trabajo y cambiar de postura. Además, debe permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.
- Pantalla: La distancia entre la pantalla y los ojos del usuario no debe ser inferior a 40 cm, siendo la distancia óptima de 45 a 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 de un ángulo de 120°, dentro del campo de visión del usuario.

La imagen de la pantalla debe ser estable, sin fenómenos de destellos. La luminosidad y el contraste debe ser fácilmente regulable por el usuario. Asimismo, la pantalla debe ser orientable e inclinable a voluntad.

- Teclado: El teclado debe estar inclinado y ser independiente de la pantalla, de modo que permita al trabajador adoptar una postura cómoda, que no provoque cansancio en brazos y manos. Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos. Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

- **Equipos de protección individual:** Es recomendable el uso de protectores de pantalla. Estos consisten en un cristal polarizado, sostenido por un marco, que se superpone al cristal de la pantalla. De este modo se consigue proteger la vista de los usuarios, además de mejorar las prestaciones ofrecidas por la pantalla, relacionadas con el contraste y la claridad.

### **Ruido**

El Real Decreto 1316/1989 del 27 de octubre establece que el empresario debe evaluar la exposición de los trabajadores al ruido, con el objeto de determinar si se superan los límites establecidos en esta norma y en su caso aplicar las medidas procedentes.

Normalmente, en este tipo de trabajos no existen altos niveles sonoros, no obstante, pueden existir niveles medios que pueden molestar y perturbar la atención de los trabajadores, como el ruido del ventilador del ordenador. Por lo tanto, el nivel sonoro en estos puestos de trabajo debe de ser tan bajo como sea posible. Para conseguirlo, se deben utilizar equipos con una emisión sonora mínima y optimizar la acústica del local.

La directiva establece que para tareas difíciles y complejas que requieren una especial concentración, el nivel sonoro equivalente no debe exceder 55dB(A).

### **Interconexión ordenador/persona**

Para la elaboración, la elección, la compra y la modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:

- El programa habrá de estar adaptado a la tarea que deba realizarse.
- El programa habrá de ser fácil de utilizar y deberá, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados y previa consulta con sus representantes.
- Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.
- Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptados a los operadores.
- Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.

# 8

## Especificaciones técnicas

Debido a que este trabajo está basado en simulaciones numéricas en programas de software y no presenta parte experimental, no son necesarios instrumentos específicos complejos o puestos de trabajo demasiado grandes. Únicamente se necesita hardware informático, software, conexión de red, conocimientos ingenieriles relacionados con la mecánica de fluidos y los métodos numéricos, experiencia con equipos informáticos y programación, bibliografía relacionada y personal cualificado para la supervisión del proyecto. A continuación se expondrán los requisitos establecidos.

### 8.1. Hardware

La mayor parte del trabajo se ha realizado sobre un clúster de cálculo o supercomputador al cual se accedía de forma remota mediante un ordenador portátil de menores prestaciones. Debido a las exigencias de los cálculos a realizar, el supercomputador requería gran potencia de cálculo y memoria. En algunas ocasiones, la carga de trabajo excedía la capacidad del clúster, y era necesario lanzar cálculos en Marenostrom. Se trata de estaciones de trabajo conectadas en red que permiten acceder a ellas de forma remota y trabajar de forma ininterrumpida, sin saturar el terminal de acceso.

El equipo portátil, además, se ha empleado para realizar tareas que no requiriesen altas prestaciones. La interconexión de los equipos se ha llevado a cabo mediante una red Ethernet de alta velocidad.

#### **Equipo portátil: ASUS X550 LD**

- Procesador Intel Core i5-4210U 1.70 GHz 2.40 GHz, 4 cores
- Número de procesadores: 1
- RAM: 12GB
- Tarjeta gráfica: NVidia GeForce 820 M
- Unidad de almacenamiento: Disco duro HDD 500 GB
- Monitor : LED 15"
- Sistema operativo: Windows 8.1
- Arquitectura: 64 bits

### Estación de trabajo (Supermic)

- Procesador 2xAMD Epyc 7281 con 32 cores y 68 hilos de procesamiento
- RAM: 128 GB
- Unidad de almacenamiento: Disco duro SSD 512 GB más otro adicional HDD 1 TB
- Sistema operativo: GNU-LINUX
- Arquitectura: 64 bits

### MareNostrum (Barcelona)

- Procesador 2xIntel Xenon Platinum por nodo, con 24 nodos (48 cores cada uno)
- 3240 nodos 12x8 GB DDR4-2667 DIMMS (2GB por core y 96 GB por nodo)
- 216 nodos de alta memoria 12x32 GB DDR4-2667 DIMMS (8GB por core y 384 GB por nodo)
- Memoria principal total de 390 TB
- 100 *Gbit/s* en la red de comunicaciones Intel Omni-Path.
- 10 *Gbit/s* en la red Ethernet

## 8.2. Software

A lo largo del proyecto se han empleado numeroso programas (intentando siempre optar por software libre). Se enumeran a continuación:

### Comerciales

- **ifort**: es el compilador de Intel Fortran. Incluye las librerías necesarias para la paralelización OpenMP (memoria compartida). El coste de la licencia a nivel profesional es de 1500\$ (equivalencia: 1276 €).
- **MATLAB** : utilizado para empezar códigos complejos y como herramienta principal para post-procesar los resultados obtenidos de Fortran. Se ha empleado una licencia educacional valorada en 500 \$ (equivalencia: 422 €).

### Libres

- **HDF5**: estándar que nos permite manejar grandes cantidades de datos de forma eficiente y de forma paralela.
- **FFTW3**: empleado en el código LISO para poder resolver las transformada de Fourier de forma eficiente computacionalmente.
- **Vscode**: editor de código fuente que facilita la programación. También se han empleado otros editores de texto como el **Kate**.
- **MPI**: estándar que posibilita la programación en paralelo empleada en nuestro código (memoria distribuida).
- **Paraview**: aplicación *open-source* y multiplataforma que nos permite obtener imágenes renderizadas de las estructuras coherentes con gran calidad.

# 9

## Presupuesto

### 9.1. Introducción

En este apartado se recoge la estimación de los costes generados en la realización del trabajo "Estudio de las estructuras coherentes y su evolución temporal en canales turbulentos". El presupuesto total necesario para abordar el presente trabajo puede desglosarse en tres partidas principales:

- Costes referidos a los recursos humanos: incluyen la participación de un alumno en calidad de ingeniero, autor de este informe y la ayuda de un tutor y un co-tutor, pertenecientes al departamento de Matemática aplicada de la UPV, con conocimientos extensos de cálculo computacional.
- Costes relativos al software y a los equipos: incluyen la estación de cálculo proporcionado por el departamento, el ordenador portátil del alumno, los programas utilizados para el proyecto y la licencia del Supercomputador MareNostrum.
- Costes generales: permiten incluir otras partidas a imprevistos, gestión y medios auxiliares. Estos se contabilizarán directamente en el apartado de gastos totales.

Estos costes se presentan en primer lugar de forma parcial (excepto los generales) y finalmente se engloban para determinar el coste total del proyecto. La mayoría de estos se basan en estimaciones de trabajos anteriores y se fijan de forma arbitraria.

### 9.2. Costes parciales

#### 9.2.1. Recursos humanos

En el desarrollo del presente trabajo, tal y como se comentó previamente, se va a tener en consideración la participación en el mismo de un ingeniero, un profesor ayudante doctor y de un doctorando.

La parte de simulación y redacción del proyecto ha sido realizada en su mayor parte por el alumno o ingeniero. El doctor se ha encargado de la gestión del proyecto (organización, licencias, etc.), supervisión del mismo y corrección de la memoria. El ayudante doctorando ha realizado la supervisión del proyecto, corrección y guiado del mismo.

En este apartado se desglosan las horas dedicadas a cada actividad que se han tenido que realizar a lo largo del proyecto:

- **Tarea 1: Familiarización con las herramientas empleadas.** En primer lugar se ha tenido que aprender el lenguaje Fortran (mayor parte del código implementado) y herra-

mientas de programación paralela de memoria compartida (OpenMP) y memoria distribuida (MPI). Asimismo, era necesario el entendimiento del código del que se partía, LISO, y una extensa revisión bibliográfica para la adecuada introducción al problema.

- **Tarea 2: Algoritmo de agregado de vórtices.** Desarrollo conceptual e implementación en Fortran del algoritmo en paralelo que agrupa puntos o regiones identificadas como vórtices en estructuras tridimensionales.
- **Tarea 3: Algoritmo de seguimiento temporal.** Desarrollo conceptual e implementación de un algoritmo que con paralelización híbrida que correlaciona estructuras coherentes de instantes temporales sucesivos.
- **Tarea 4: Post-proceso de los resultados.** Análisis y discusión de los resultados obtenidos mediante el uso de MATLAB, que facilita el manejo de herramientas gráficas. Se ha dividido en una parte estática, que se centra en la morfología y tamaño de los vórtices; y otra dinámica, centrada en el tiempo de vida y velocidad de advección.
- **Tarea 5: Redacción de la memoria.**

El número de horas destinadas a cada tarea viene dado en la Tabla 9.1. Se ha fijado el coste de doctor en 36€/hora, y el de ingeniero en 12€/hora.

Tarea	Concepto	Horas	Total (€)
Tarea 1	Ingeniero	50	600
	Doctor	10	360
Tarea 2	Ingeniero	300	3600
	Doctor	20	720
Tarea 3	Ingeniero	300	3600
	Doctor	25	900
Tarea 4	Ingeniero	150	1800
	Doctor	15	540
Tarea 5	Ingeniero	100	1200
	Doctor	10	360
Total	Ingeniero	900	10800
	Doctor	80	2880
		TOTAL	13680

**Tabla 9.1.:** Costes parciales asociados al personal.

### 9.2.2. Costes de equipos y software

A continuación se desglosará el coste del uso de equipos informáticos y el coste de las licencias de software utilizadas.

Para tener en cuenta los equipos informáticos hay que tener en cuenta la devaluación de los mismos. Para ello, se ha hecho una estimación en función del uso que se le ha dado y la vida media que suelen presentar este tipo de productos. En el caso de la estación de cálculo, se estima que su vida media alcanza los 60 meses útiles. El coste de la misma ha sido 6000€, por lo que la tasa queda de 100€ al mes. Para el ordenador personal se estima una duración similar, y el precio es el de compra (550€, más las mejoras realizadas (disco duro

SSD y memoria RAM adicional), suponiendo un gasto total de (690€). La tasa quedaría 11.5€ al mes. Estos gastos se recogen en la Tabla 9.2.

Categoría	Concepto	Tiempo (meses)	Tasa (€/mes)	Total (€)
Hardware	Estación de Trabajo	7	100	700
	Ordenador personal	7	11.5	80.5
			TOTAL	780.5

**Tabla 9.2.:** Costes parciales asociados al hardware.

A estos gastos hay que añadirle el uso de supercomputador MareNostrum. El precio se evalúa en base a las horas de cálculo por procesador, siendo la tasa 0.01€/hora. El total se presenta en la Tabla 9.3.

Categoría	Concepto	Tiempo (horas)	Tasa (€/h)	Total (€)
Hardware	MareNostrum	20000	0.01	2000
			TOTAL	2000

**Tabla 9.3.:** Costes parciales asociados al uso del MareNostrum.

Asimismo, durante el desarrollo del trabajo se han empleado las licencias de MATLAB e Intel Fortran cubiertas por la Universidad Politécnica de Valencia, que se presentan en la Tabla 9.4

Categoría	Concepto	Tasa (€/licencia)	Total (€)
Software	Intel Fortran	1267	1267
	MATLAB	422	422
		TOTAL	1689

**Tabla 9.4.:** Costes parciales asociados al software.

### 9.2.3. Presupuesto total del proyecto

El presupuesto total queda definido como la suma de los costes de recursos humanos, costes de software y equipos y costes generales, aplicándoles el IVA correspondiente. Los costes generales o indirectos incluyen gastos relacionados con el lugar de trabajo y el material de oficina empleado. Además se añade gastos de imprevistos que no se han tenido en cuenta con anterioridad. Se estiman como un 20% del total. Por otro lado, se incluye un beneficio industrial del 6%. Pueden verse en la Tabla 9.5:

Concepto	Coste (€)
Coste personal	13680
Coste de equipos	4470
Costes generales	3630
Beneficio industrial	1307
Subtotal	23087
IVA (21%)	4848
TOTAL	27935

**Tabla 9.5.:** Costes totales del proyecto.

Por lo tanto, el presupuesto total estimado para la realización del Trabajo Final de Máster es de 27935€.

# Bibliografía

- [1] Javier Jiménez. Near-wall turbulence. *Physics of Fluids*, 25(10):101302, 2013.
- [2] Stephen B Pope. Turbulent flows, 2001.
- [3] Andrey Nikolaevich Kolmogorov. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds numbers. *Cr Acad. Sci. URSS*, 30:301–305, 1941.
- [4] George Keith Batchelor and Albert Alan Townsend. The nature of turbulent motion at large wave-numbers. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 199(1057):238–255, 1949.
- [5] Uriel Frisch, Pierre-Louis Sulem, and Mark Nelkin. A simple dynamical model of intermittent fully developed turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 87(4):719–736, 1978.
- [6] Stephen J Kline, William C Reynolds, FA Schraub, and PW Runstadler. The structure of turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 30(4):741–773, 1967.
- [7] SJ Kline and SK Robinson. Quasi-coherent structures in the turbulent boundary layer. i-status report on a community-wide summary of the data. *nrw*, pages 200–217, 1990.
- [8] Sergio Hoyas, Martin Oberlack, Stefanie Kraheberger, and Francisco Alcantara-Avila. Turbulent channel flow at  $re \tau = 10000$ . *APS*, pages H19–001, 2019.
- [9] Javier Jiménez. Computers and turbulence. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 79:1–11, 2020.
- [10] AE Perry and MS Chong. On the mechanism of wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 119:173–217, 1982.
- [11] AAR Townsend. *The structure of turbulent shear flow*. Cambridge university press, 1980.
- [12] MR Head and P Bandyopadhyay. New aspects of turbulent boundary-layer structure. *Journal of fluid mechanics*, 107:297–338, 1981.
- [13] Ronald J Adrian, Carl D Meinhart, and Christopher D Tomkins. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. *Journal of fluid Mechanics*, 422:1–54, 2000.
- [14] James M Wallace, Helmut Eckelmann, and Robert S Brodkey. The wall region in turbulent shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 54(1):39–48, 1972.
- [15] Juan Carlos del Álamo de Pedro. *La organización a gran escala de canales turbulentos*. PhD thesis, Aeronauticos, 2005.
- [16] Adrián Lozano Durán. *Time-resolved evolution of coherent structures in turbulent channels*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [17] José Javier Aguilar Fuertes. Desarrollo e implementación de un algoritmo paralelo de identificación de vórtices en simulaciones dns. 2019.
- [18] Sanjiva K Lele. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution. *Journal of computational physics*, 103(1):16–42, 1992.

- [19] Sergio Hoyas and Javier Jiménez. Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to  $re \tau = 2003$ . *Physics of fluids*, 18(1):011702, 2006.
- [20] Sergio Hoyas and Javier Jiménez. Reynolds number effects on the reynolds-stress budgets in turbulent channels. *Physics of Fluids*, 20(10):101511, 2008.
- [21] John Kim, Parviz Moin, and Robert Moser. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low reynolds number. *Journal of fluid mechanics*, 177:133–166, 1987.
- [22] Philippe R Spalart, Robert D Moser, and Michael M Rogers. Spectral methods for the navier-stokes equations with one infinite and two periodic directions. *Journal of Computational Physics*, 96(2):297–324, 1991.
- [23] Juan C Del Álamo, Javier Jimenez, Paulo Zandonade, and ROBERT D MOSER. Self-similar vortex clusters in the turbulent logarithmic region. *Journal of Fluid Mechanics*, 561:329, 2006.
- [24] HoT Kim, SJ Kline, and WC Reynolds. The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 50(1):133–160, 1971.
- [25] M Tanahashi, S-J Kang, T Miyamoto, S Shiokawa, and T Miyauchi. Scaling law of fine scale eddies in turbulent channel flows up to  $re\tau = 800$ . *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25(3):331–340, 2004.
- [26] Javier Jiménez. Coherent structures in wall-bounded turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 842, 2018.
- [27] AE Perry, S Henbest, and MS Chong. A theoretical and experimental study of wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 165:163–199, 1986.
- [28] Javier Jiménez, Juan C Del Alamo, and Oscar Flores. The large-scale dynamics of near-wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 505:179, 2004.
- [29] Hiroji Nakagawa and Iehisa Nezu. Prediction of the contributions to the reynolds stress from bursting events in open-channel flows. *Journal of fluid mechanics*, 80(1):99–128, 1977.
- [30] Oscar Flores and Javier Jiménez. Log-layer dynamics in smooth and artificially-rough turbulent channels. In *IUTAM Symposium on The Physics of Wall-Bounded Turbulent Flows on Rough Walls*, pages 93–98. Springer, 2010.
- [31] Stephen K Robinson. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1):601–639, 1991.
- [32] Arne V Johansson, P Henrik Alfredsson, and John Kim. Evolution and dynamics of shear-layer structures in near-wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 224:579–599, 1991.
- [33] O Cadot, S Douady, and Y Couder. Characterization of the low-pressure filaments in a three-dimensional turbulent shear flow. *Physics of Fluids*, 7(3):630–646, 1995.
- [34] Adrián Lozano-Durán and Javier Jiménez. Time-resolved evolution of coherent structures in turbulent channels: characterization of eddies and cascades. *Journal of Fluid Mechanics*, 759:432, 2014.

- [35] JA LeHew, M Guala, and BJ McKeon. Time-resolved measurements of coherent structures in the turbulent boundary layer. *Experiments in fluids*, 54(4):1508, 2013.
- [36] R Cucitore, Maurizio Quadrio, and Arturo Baron. On the effectiveness and limitations of local criteria for the identification of a vortex. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 18(2):261–282, 1999.
- [37] John Kim and Fazle Hussain. Propagation velocity of perturbations in turbulent channel flow. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 5(3):695–706, 1993.
- [38] Juan C Del Álamo and Javier Jiménez. Estimation of turbulent convection velocities and corrections to Taylor's approximation. *Journal of Fluid Mechanics*, 640:5–26, 2009.
- [39] Jinhee Jeong and Fazle Hussain. On the identification of a vortex. *Journal of fluid mechanics*, 285:69–94, 1995.