

Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos

Introducción a la dinámica de fluidos
computacional (CFD) por el método
de volúmenes finitos

Jesús Manuel Fernández Oro



EDITORIAL REVERTÉ

Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos

Introducción a la dinámica de fluidos
computacional (CFD) por el método
de volúmenes finitos

Jesús Manuel Fernández Oro

Profesor Titular de la Universidad de Oviedo
Departamento de Energía – Área de Mecánica de Fluidos



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos.

Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD)
por el método de volúmenes finitos

Copyright © Jesús Manuel Fernández Oro

Edición en papel

© Editorial Reverté. S.A., 2012
ISBN: 978-84-291-2602-0

Edición en e-book

© Editorial Reverté. S.A., 2012
ISBN: 978-84-291-9277-3

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

1372

Para Ana, Daniel y Ángela

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PRÓLOGO XIII

AGRADECIMIENTOS XVII

NOMENCLATURA XIX

1. INTRODUCCIÓN AL CFD 1

1.1 ¿Qué es el CFD? 3

1.2 Reseña histórica sobre el CFD 3

1.3 Campos de aplicación 12

1.4 Ventajas e inconvenientes 15

1.5 Desarrollo y empleo de códigos: usuario frente a programador 16

1.5.1 Códigos CFD: secuencia y estructura 17

1.5.2 Códigos CFD: estrategias a seguir 20

1.6 Objetivos de este libro 23

1.7 Estructura del libro 24

2. ALGUNAS IDEAS FUNDAMENTALES 27

2.1 CFD: estrategia de utilización 29

2.2 Discretización espacial: sistema algebraico de ecuaciones 30

2.2.1 Método de diferencias finitas 30

2.2.2 Método de elementos finitos 31

2.2.3 Método de volúmenes finitos 32

2.3	Solución del sistema algebraico de ecuaciones	33
2.3.1	Aplicación de condiciones de contorno	34
2.3.2	Dependencia de la malla	35
2.4	El problema de la no linealidad de las ecuaciones	36
2.5	Método iterativo de resolución	38
2.6	Criterio de convergencia para la solución iterativa	40
2.7	Estabilidad numérica	42
2.8	Precisión, consistencia, estabilidad y convergencia	44
2.9	El problema del cierre turbulento	46
3.	ECUACIONES DIFERENCIALES DE CONSERVACIÓN	51
3.1	Ecuación general de conservación	53
3.2	Ecuaciones de gobierno para el flujo y la transferencia de calor	57
3.2.1	Ecuación de conservación de masa	57
3.2.2	Ecuación de conservación de momento	58
3.2.3	Ecuación de conservación de la energía	58
3.2.4	Ecuación de conservación de las especies	59
3.3	Forma integral de la ecuación general	60
3.4	Ecuaciones simplificadas para la resolución del flujo: técnicas numéricas	61
3.4.1	Flujo potencial y flujo ideal	62
3.4.2	Flujo incompresible en la capa límite	63
3.4.3	Flujo viscoso incompresible	64
3.4.4	Flujo compresible	65
3.5	Clasificación matemática de las ecuaciones en derivadas parciales	65
3.5.1	Consideraciones físicas	66
3.5.2	Consideraciones matemáticas	67
3.5.3	Clasificación para las ecuaciones de flujo	71
3.6	Condiciones iniciales y de contorno	72
4.	MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS (MVF)	75
4.1	Conceptos generales	77
4.2	Características y tipos de mallado	78
4.2.1	Mallados estructurados	80
4.2.2	Mallados no estructurados	83
4.2.3	Calidad de la malla y buenas prácticas	85
4.3	Discretización numérica por el método de volúmenes finitos	86
4.3.1	Definiciones generales de la metodología numérica	86
4.3.2	Fundamentos del método de volúmenes finitos	88
4.4	Implementación del método de volúmenes finitos	91
4.4.1	Mallados decalados	91
4.4.2	Discretización del término temporal	94
4.4.3	Discretización del término fuente	94
4.4.4	Discretización del término difusivo	94

4.4.5	Discretización del término convectivo	95
4.4.6	Ecuación algebraica por volúmenes finitos	97
4.5	Métodos de discretización espacial	98
4.6	Métodos de discretización temporal	100
5.	MVF EN PROBLEMAS DIFUSIVOS PUROS	103
5.1	Difusión 1-D estacionaria	105
5.1.1	Discretización	105
5.1.2	Discusión	107
5.2	Difusión 2-D estacionaria	107
5.2.1	Discretización	107
5.2.2	Discusión	109
5.3	Implementación de condiciones de contorno	110
5.3.1	Condición de contorno de Dirichlet (valor)	111
5.3.2	Condición de contorno de Neumann (flujo)	112
5.3.3	Condición de contorno de Robin (mixta)	113
5.4	Difusión 2-D no estacionaria	114
5.4.1	Esquema explícito	116
5.4.2	Esquema implícito	117
5.4.3	Esquema Crank-Nicholson	118
5.5	Difusión 2-D en coordenadas cilíndricas	119
5.6	Difusión 2-D en dominios axisimétricos	121
5.7	Difusión 3-D no estacionaria	123
5.8	Consideraciones adicionales	125
5.8.1	Interpolación del coeficiente de difusión	125
5.8.2	Linealización del término fuente	126
5.8.3	Subrelajación	127
5.8.4	Análisis de estabilidad de Von Neumann	129
5.8.5	Discretización en mallados no estructurados	132
6.	MVF EN PROBLEMAS DIFUSIVOS-CONVECTIVOS	137
6.1	Difusión-convección 1-D estacionaria	139
6.2	Difusión-convección 2-D estacionaria	142
6.2.1	Esquema en diferencias centradas (CDS)	142
6.2.2	Esquema upwind	144
6.2.3	Generalización a mallas no estructuradas	145
6.3	Esquemas de primer orden con soluciones exactas	147
6.3.1	Esquema exponencial	147
6.3.2	Esquema híbrido	149
6.3.3	Esquema potencial	150
6.4	Esquemas de orden superior	151
6.4.1	Difusión y dispersión numéricas	151
6.4.2	Esquemas de segundo orden	153
6.4.3	Esquemas de tercer orden	154
6.4.4	Generalización a mallas no estructuradas	156

- 6.5 Difusión-convección no estacionaria 158**
 - 6.5.1 Formulación general 158
 - 6.5.2 Condición de Courant para esquemas explícitos 159
 - 6.5.3 Caso particular: difusión-convección no estacionaria 3-D con esquema híbrido y discretización implícita 162
 - 6.5.4 Extensión no estacionaria a otros esquemas de primer orden 162
- 6.6 Condiciones de contorno 164**
 - 6.6.1 Condiciones de entrada 164
 - 6.6.2 Condiciones de salida 165
 - 6.6.3 Condiciones geométricas 166
- 7. RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DE FLUJO 167**
 - 7.1 Introducción 169
 - 7.2 Mallado decalado 171
 - 7.3 Discretización de la ecuación de momento 173
 - 7.4 Discretización de la ecuación de continuidad 177
 - 7.5 Algoritmo SIMPLE de resolución 177
 - 7.5.1 Ecuación de corrección para la presión 180
 - 7.5.2 Subrelajación 181
 - 7.5.3 Algoritmo completo 184
 - 7.6 Otros algoritmos de acoplamiento presión-velocidad 186
 - 7.6.1 Algoritmo SIMPLER 186
 - 7.6.2 Algoritmo SIMPLEC 190
 - 7.6.3 Algoritmo PISO 191
 - 7.7 Conclusiones y reflexiones finales 194
- 8. CONDICIONES DE CONTORNO Y TÉRMINOS FUENTE 197**
 - 8.1 Introducción 199
 - 8.2 Linealización 200
 - 8.2.1 Especificación de valores 201
 - 8.2.2 Especificación de flujos 202
 - 8.3 Condiciones de contorno típicas 202
 - 8.3.1 Condición de flujo entrante 202
 - 8.3.2 Condición de flujo saliente 204
 - 8.3.3 Contornos sólidos 206
 - 8.3.4 Condición de perfil de presión constante 211
 - 8.3.5 Condición de simetría 212
 - 8.3.6 Condiciones periódicas y cíclicas 212
 - 8.4 Otras fuentes 214
 - 8.5 Reflexiones finales y conclusiones 214
- 9. MÉTODOS ITERATIVOS DE RESOLUCIÓN 219**
 - 9.1 Introducción 221
 - 9.1.1 Métodos iterativos frente a métodos directos 222
 - 9.1.2 Almacenamiento de variables 223

9.2	Algoritmo para matrices tridiagonales (TDMA)	227
9.2.1	Método punto-a-punto (TDMA 1-D)	227
9.2.2	Método línea-a-línea (TDMA 2-D)	228
9.2.3	Método plano-a-plano (TDMA 3-D)	230
9.3	Métodos iterativos Jacobi y Gauss-Seidel	231
9.3.1	Métodos iterativos generales	232
9.3.2	Convergencia de los métodos iterativos	234
9.3.3	Análisis de los métodos iterativos	238
9.4	Métodos multigrad	239
9.4.1	Corrección mediante malla basta	240
9.4.2	Multigrad geométrico (GMG)	241
9.4.3	Multigrad algebraico (AMG)	244
9.4.4	Estrategias cíclicas	246
9.5	Reflexiones finales y conclusiones	248
10.	MODELIZACIÓN DE LA TURBULENCIA	251
10.1	¿Qué es la turbulencia?	253
10.1.1	La naturaleza de la turbulencia	253
10.1.2	La ubicuidad de la turbulencia	256
10.1.3	El origen de la turbulencia: inestabilidades	256
10.2	Escalas de la turbulencia: la cascada de energía	259
10.3	El problema del cierre de la turbulencia	264
10.4	Aproximaciones numéricas para el tratamiento de la turbulencia	265
10.4.1	Simulaciones directas (DNS)	265
10.4.2	Promediados de las ecuaciones (técnicas LES y modelos RANS)	268
10.5	Large Eddy Simulation (LES)	270
10.5.1	Filtrado espacial. Tipos de filtro	271
10.5.2	Tratamiento de las subescalas de malla	279
10.5.3	El problema de la pared: técnicas híbridas	280
10.6	Modelos de turbulencia para las ecuaciones RANS	284
10.6.1	Filtrado temporal. Propiedades	284
10.6.2	Modelo de longitud de mezcla de 0 ecuaciones	289
10.6.3	Modelos de viscosidad artificial (Eddy Viscosity Models, EVM)	291
10.6.4	Modelos de transporte para las tensiones de Reynolds (RSM)	299
10.6.5	El problema de la pared: tratamiento de la capa límite	304
10.7	Estrategias y buenas prácticas para la utilización de los modelos de turbulencia	307
11.	APLICACIÓN DEL CFD A FLUJOS INDUSTRIALES (I-CFD)	311
11.1	Introducción	313
11.2	Transferencia de calor	313
11.2.1	Introducción	314
11.2.2	Convección natural. Fenómenos de flotabilidad	315
11.2.3	Radiación	319

11.3	Flujos multiespecie	322
11.3.1	Transporte sin reacción química	323
11.3.2	Transporte con reacción química	325
11.3.3	Combustión	330
11.4	Flujos multifásicos	336
11.4.1	Elección del modelo multifase apropiado	338
11.4.2	Modelo de fase dispersa (DPM)	340
11.4.3	Modelo euleriano	341
11.4.4	Modelo de mezcla	344
11.4.5	Modelo de volumen de fluido (VOF)	347
11.5	Modelos de solidificación	352
11.6	Transporte de escalares como trazadores	353
11.7	Modelización del flujo en máquinas de fluidos	356
11.7.1	Flujo no estacionario en máquinas de fluidos: mallas dinámicas	356
11.7.2	Flujo en máquinas volumétricas: mallados deformables	357
11.7.3	Flujo en turbomáquinas: mallados deslizantes	360
11.7.4	Ejemplos de análisis del flujo en turbomáquinas	364
11.8	Reflexiones finales y conclusiones	370

REFERENCIAS 371

ÍNDICE ALFABÉTICO 379

PRÓLOGO

Las técnicas numéricas en Ingeniería han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas y, en particular, la Mecánica de Fluidos ha sido una de las disciplinas científicas donde este auge ha tenido una mayor repercusión. Para el estudio de las ecuaciones generales de comportamiento de los flujos se han desarrollado diversas técnicas y aproximaciones, siendo el Método de los Volúmenes Finitos (MVF) el más utilizado hoy día gracias a su flexibilidad y particular adecuación para describir ecuaciones de conservación. En este libro, se presentan las bases de este método como herramienta para el estudio computacional de la Mecánica de Fluidos. Se aborda el desarrollo de esta metodología mostrando cómo se implementan y se resuelven las ecuaciones de conservación (masa, momento, energía y especies) desde los casos más sencillos y simplificados hasta su formulación más general. Finalmente, se complementa el método con la inclusión de modelos de turbulencia y de otros modelos de propósito industrial que permiten extender la simulación de los flujos al ámbito de la Ingeniería de Fluidos.

Aunque las obras publicadas en castellano sobre esta disciplina son escasas, sí existe una amplia bibliografía en inglés dedicada a esta temática. Sin embargo, la mayoría de esas referencias son textos avanzados, muy específicos, que no han sido concebidos como una breve introducción a las técnicas numéricas sino más bien como vastos tratados en la materia. A pesar de ello, sí que hay un reducido número de textos en inglés que abordan estas técnicas desde un punto de vista más aplicado, centrándose en lo esencial y ofreciendo una mejor didáctica. Cabe citar específicamente en este prólogo dos contribuciones que han inspirado al autor para desarrollar su trabajo, y que destacan por lo acertada de su estructura

y por la claridad expositiva de sus contenidos. Se trata del texto de los profesores H.K. Versteeg y W. Malalasekera, "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*" (Ed. Pearson, 2007, 2ª edición), y de las notas de los profesores S. Mathur y J. Y. Murthy, "*The Finite Volume Method, class notes for Numerical Methods in Heat, Mass and Momentum Transfer*" (2001-2011), en los que se ha basado la estructura adoptada aquí y de los cuales se han considerado un buen número de contenidos y de figuras, adaptándolos al contexto de esta obra. En particular, del primero se han adaptado parcialmente contenidos de los temas dedicados a los algoritmos de resolución de las ecuaciones de flujo y a la definición de las condiciones de contorno (capítulos 7 y 8), mientras que del segundo se han recogido los contenidos relacionados con las discretizaciones difusivas y convectivas para mallas no estructuradas (capítulos 5 y 6), así como los conceptos básicos de los métodos iterativos de resolución (capítulo 9).

Además de acudir a estas referencias básicas, se han adaptado contenidos de otra serie de fuentes para equilibrar los temas abordados aquí y poder presentar una obra lo más completa y adecuada posible. Así, para elaborar un tema inicial sobre ideas fundamentales acerca del CFD, se adaptó diverso material on-line de los profesores R. Bhaskaran y L. Collins, expertos en la docencia sobre simulación numérica para la Ingeniería. Del mismo modo, para la descripción general del Método de Volúmenes Finitos se han adaptado algunas notas del profesor C. Hirsch, basadas en su libro "*Numerical Computation of Internal and External Flows. The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*" (Ed. Elsevier-Butterworth-Heinemann, 2007). Análogamente, para la descripción de las técnicas LES y DNS en el capítulo sobre modelización de la turbulencia, se ha acudido a los apuntes del profesor U. Piomelli, resultado de varias de sus ponencias en el *Von Kármán Institute for Fluid Dynamics* (Bélgica). Finalmente, para el repaso de los distintos modelos de turbulencia disponibles en los softwares comerciales, así como de otros modelos de carácter industrial (multifase y multiespecie) se ha utilizado la ayuda al usuario del programa ANSYS® FLUENT®. Como podrá comprobar el lector, en cada capítulo se ha añadido una breve reseña donde se indica la bibliografía de referencia consultada para la elaboración de cada tema del libro.

El texto se compone de once capítulos que proporcionan una visión global y muy detallada, no sólo de las bases del método, sino también de las posibles aplicaciones industriales. En particular, el texto ha sido desarrollado con vocación de dar respuesta a las necesidades de modelización que aparecen en los diversos ámbitos de la Ingeniería. De esta forma, se han incluido temas específicos que analizan las implicaciones prácticas del método, así como otros que contemplan modelos específicamente desarrollados para procesos industriales tan comunes como son los flujos de calor y masa en hornos, coladas continuas, motores y turbi-

nas, sistemas de ventilación y precipitadores o reactores de mezcla. Los temas desarrollados son:

- o Capítulo 1. Introducción al CFD.
- o Capítulo 2. Algunas ideas fundamentales.
- o Capítulo 3. Ecuaciones diferenciales de conservación.
- o Capítulo 4. Método de Volúmenes Finitos (MVF).
- o Capítulo 5. MVF en problemas difusivos puros.
- o Capítulo 6. MVF en problemas difusivos-convectivos.
- o Capítulo 7. Resolución de las ecuaciones de flujo.
- o Capítulo 8. Condiciones de contorno y términos fuente.
- o Capítulo 9. Métodos iterativos de resolución.
- o Capítulo 10. Modelización de la turbulencia.
- o Capítulo 11. Aplicación del CFD a flujos industriales (I-CFD).

En el desarrollo del texto se ha tratado de mantener un enfoque práctico, orientando a aquellos lectores que buscan comprender los puntos clave de cualquier simulación numérica. Se ha prestado especial atención en mostrar las ideas básicas relacionadas con las aplicaciones en la Ingeniería de Fluidos pensando en quienes realizan modelizaciones CFD con software comercial, con el objetivo de que puedan desarrollar toda la potencialidad de este tipo de herramientas. Además, se ha buscado una exposición pedagógica de las bases y aplicaciones del método, tratando de evitar planteamientos excesivamente formales y académicos.

Todos los temas han sido estructurados de forma homogénea, intentando que fuesen equilibrados en extensión y contenidos. Sin embargo, dada la particular importancia de la modelización de la turbulencia, se ha hecho una revisión muy concisa de los distintos enfoques que existen en la literatura en cuanto al tratamiento específico de flujos turbulentos. Además, se ha introducido un capítulo con ideas fundamentales acerca de todo el proceso de modelización, que ha de ser de especial utilidad como punto de partida para entender el alcance de las técnicas CFD. Finalmente, para aquellos lectores interesados en profundizar en algún aspecto concreto, se proporciona una bibliografía complementaria especializada donde pueden ampliar sus conocimientos.

Esta publicación resume toda la experiencia acumulada por el autor durante la última década en la simulación de flujos industriales, período en el que además ha firmado ya una veintena de artículos de investigación en diversas revistas internacionales de reconocido prestigio, entre las que cabe destacar el *“IMechE Journal of*

Power and Energy”, el “*International Journal for Numerical Methods in Fluids*”, el “*ASME Journal of Fluids Engineering*”, el “*Internacional Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*”, o el “*Journal of Turbulence*”. Además, esta amplia experiencia y conocimiento en la simulación de flujos industriales es actualmente desarrollada por el autor en la asignatura sobre Técnicas Numéricas de Ingeniería Térmica y de Fluidos del nuevo Máster de Investigación en Ingeniería Energética de la Universidad de Oviedo de acuerdo con los nuevos programas de doctorado en el marco del Espacio Europeo de Educación Superior.

Finalmente, es preciso destacar que el ambicioso objetivo de este libro no es simplemente el de proporcionar una visión integral de las técnicas CFD para que el lector las comprenda y sepa qué ofrecen los paquetes comerciales, tanto desde el punto de vista del usuario como del programador avanzado; también se ha perseguido dotar de las herramientas y metodologías necesarias para que pueda adquirir los conocimientos y habilidades suficientes que le permitan desarrollar sus propios códigos.

Jesús Manuel Fernández Oro

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todos mis compañeros del Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Oviedo por su apoyo y colaboración en mi trayectoria docente e investigadora durante estos últimos años. Ellos han contribuido, con su ambiente de trabajo, la sensibilidad por las cosas bien hechas y el espíritu crítico, a que esta publicación haya podido ver la luz. En especial, quiero citar al Profesor Rafael Ballesteros, con quien me inicié en el uso de las técnicas CFD y cuyos enfoques impregnan muchas partes de este libro, y al Profesor Eduardo Blanco, por sus acertadas intuiciones e innumerables enseñanzas sobre modelización numérica.

También quiero agradecer a la propia Universidad de Oviedo, como institución, todos los medios y posibilidades que brinda a sus profesores e investigadores, entre los que me incluyo, para desarrollar las diversas actividades docentes e investigadoras. Mi reconocimiento es también para todos los organismos y empresas financiadoras, tanto públicos como privados, que han participado en el desarrollo de muchas de las investigaciones que se recogen en este libro. Todos ellos, al apostar por el desarrollo y la innovación, y por entender la necesidad de investigar en el ámbito de la Ingeniería, me han permitido adquirir los conocimientos suficientes para llevar a cabo una obra de estas características.

Respecto a los contenidos del libro, el autor quiere agradecer expresamente a la profesora Jayathi Y. Murthy y al profesor Sanjay Mathur, de la Purdue University (Indiana, EEUU), por su colaboración y permiso para adaptar parte de algunos capítulos de sus notas de clase para este volumen en castellano. También quiere agradecer a los profesores Rajesh Bhaskaran y Lance Collins, así como al "Swanson Engineering Simulation Program" de la Cornell University en Ithaca (New York, EEUU) dedicado a la integración de la simulación por CFD en el ámbito de la educación en Ingeniería, por permitir adaptar diversos contenidos de su página web

xviii Agradecimientos

para la elaboración del capítulo 2 de este libro. Y, finalmente, reconocer a los profesores Charles Hirsch, de la Universidad Libre de Bruselas, y Ugo Piomelli, actualmente en la Queen's University (Ontario, Canadá), por ver con buenos ojos la adaptación hecha aquí al castellano de diversos materiales suyos, recopilados de entre sus conferencias y publicaciones más relevantes.

En lo personal, no puedo olvidar el apoyo de toda mi familia durante estos últimos años, muy intensos de trabajo y repletos de sacrificios. En especial, a mis padres, por confiar siempre en mí, y por supuesto, a mi esposa Ana, por su paciencia y ánimo durante la preparación de esta obra.

Por último, quiero agradecer al personal de Editorial Reverté su confianza, desde el principio, en esta publicación y el tiempo y esfuerzo dedicado para mejorar el contenido de la misma. A todos ellos mi reconocimiento por su contribución para que este libro sea una realidad.

NOMENCLATURA

Símbolos

a	Coefficiente de la ecuación algebraica de transporte.
A	Área. Matriz de coeficientes. Factor pre-exponencial.
b	Matriz de términos independientes. Término fuente.
B	Número total de coeficientes. Término de flotabilidad.
Br	Número de Brinkman.
c	Velocidad de onda. Constante de proporcionalidad modelo de mezcla.
c'_k, c''_k	Constante estequiométrica de reactantes y reactivos.
c_p	Calor específico a presión constante.
c_ξ	Constante de escala turbulenta en reacciones químicas.
C	Factor de curvatura (discretización QUICK). Constante de Kolmogorov.
C_l	Constante del modelo RSM.
C_p, C_1'	Constante del modelo RSM.
C_2, C_2'	Constante del modelo RSM.
C_{b2}	Constante del modelo Spalart-Allmaras
C_{v1}	Constante del modelo Spalart-Allmaras
$C_{\epsilon1}$	Constante del modelo k-epsilon.
$C_{\epsilon2}$	Constante del modelo k-epsilon.
C_μ	Constante del modelo k-epsilon.
C_f	Coefficiente de fricción.
C_s	Constante del modelo Smagorinsky-Lilly. Constante en el término de difusión del modelo RMS.

C_p	Término convectivo.
C_D	Contante del modelo ASM.
d, \tilde{d}	Distancia a la pared. Distancia a la pared en técnicas DES.
d_p	Coefficiente de corrección de presión
D	Intensidad de difusión. Matriz diagonal. Diámetro.
D_i	Difusividad másica.
D_{ij}	Término de difusión en el modelo RMS.
$D_{T,ij}$	Término de difusión turbulenta en el modelo RMS.
$D_{L,ij}$	Término de difusión molecular en el modelo RMS.
D_p	Término difusivo.
e	Energía por unidad de masa.
e_{ij}	Gradiente de deformación.
\vec{e}_r	Vector unitario en la dirección radial.
\vec{e}_θ	Vector unitario en la dirección tangencial.
\vec{e}_ξ	Vector unitario en la dirección intrínseca 1.
\vec{e}_η	Vector unitario en la dirección intrínseca 2.
E	Energía. Constante de pared. Energía de activación.
f	Factor de discretización temporal. Fracción de vapor.
f_{v1}	Función del modelo Spallart-Almaras.
f_β, f_{β^*}	Funciones del modelo k-omega.
\vec{f}	Campo másico.
F	Intensidad de convección. Función no lineal.
\vec{F}, \vec{F}_V	Fuerza. Fuerza volumétrica.
F_{tg}	Fuerza de cizalladura en la pared.
g, \vec{g}	Aceleración gravitatoria. Función genérica.
G	Matriz de iteración. Núcleo (kernel) de convolución.
Gr	Número de Grashof.
G_k	Producción de energía cinética turbulenta.
G_v	Producción viscosidad turbulenta.
h	Entalpía por unidad de masa.
h_{cc}	Coefficiente de película en condición de contorno.
H	Entalpía. Poder calorífico.
H_L	Calor latente de solidificación.
\vec{i}	Vector unitario en la dirección x.
I	Nodo i-ésimo. Intensidad de radiación.
I, \bar{I}	Tensor identidad. Operador de refinamiento.
J	Determinante del jacobiano de la transformación.
J	Nodo j-ésimo.
\vec{J}	Flujo.
\vec{j}	Vector unitario en la dirección y.

k	Coeficiente de conductividad térmica.
k, k_r	Energía cinética turbulenta. Energía cinética turbulenta residual.
\vec{k}	Vector unitario en la dirección z .
Kb	Constante de deformación en reacción química.
Kf	Constante de formación en reacción química.
l	Nivel de refinado.
ℓ	Escala espacial característica.
L	Longitud característica. Matriz inferior. Escala de longitud integral.
Le	Número de Lewis.
m	Masa. Modo de Fourier.
m_i	Fracción másica i -ésima.
\dot{m}	Caudal másico.
M	Matriz de descomposición.
M_k	Peso molecular de la especie k -ésima.
Ma	Número de Mach.
Ma_t	Número de Mach turbulento.
n	Instante n -ésimo. Número de celda.
N	Número de puntos. Matriz de descomposición.
\vec{n}	Vector normal a la superficie.
$O()$	Orden de truncamiento.
p	Presión.
$p()$	Función de probabilidad.
p_v	Presión de vapor.
\bar{p}	Presión promediada.
P_{ij}	Término de producción de tensiones de Reynolds en el modelo RMS.
Pe	Número de Peclet.
Pr	Número de Prandtl.
q	Flujo de calor por unidad de masa.
\vec{q}	Vector flujo de calor por unidad de área.
q_{cc}	Flujo por condición de contorno.
q_H	Calor intercambiado por un sistema por unidad de masa.
Q	Fuente volumétrica.
\dot{Q}	Potencia calorífica.
r	Coordenada radial. Matriz de residuos.
\vec{r}	Vector desplazamiento.
R	Residuo.
R_k	Tasa molar de Arrhenius.
Ra	Número de Rayleigh.
Re	Número de Reynolds.

xxii Nomenclatura

R_{ij}	Tensiones de Reynolds algebraicas.
R_c	Coefficiente de creación de burbujas (cavitación).
R_e	Coefficiente de destrucción de burbujas (cavitación).
s'_{ij}	Tensor fluctuante de deformaciones.
\vec{s}	Vector de dirección de radiación.
\vec{s}'	Vector de dispersión de radiación.
S	Término fuente. Superficie.
Sc	Número de Schmidt.
Stk	Número de Stokes.
S_{ij}	Tensor de deformaciones.
S_C	Coefficiente independiente de linealización del término fuente.
S_P	Coefficiente de linealización del término fuente.
S_g	Gradiente secundario.
t	Tiempo.
T	Temperatura. Período.
T_P	Término temporal.
Tu	Intensidad de la turbulencia.
u	Componente de la velocidad en la dirección x .
u^+	Velocidad adimensional de pared.
u_r, u_θ, u_z	Vectores unitarios en coordenadas cilíndricas.
u_0	Velocidad característica.
\hat{u}	Energía interna específica.
u_τ	Velocidad cortante en la pared.
U	Módulo de la velocidad de un flujo uniforme. Cantidad escalar. Matriz superior.
v	Componente de la velocidad en la dirección y . Módulo de velocidad.
\vec{v}, \vec{v}_g	Vector velocidad. Velocidad de malla.
v_i	Base de vectores.
V	Volumen.
w	Componente de la velocidad en la dirección z .
\vec{w}	Velocidad relativa.
\dot{W}	Potencia.
x	Coordenada cartesiana.
x_j	Fracción molar de la especie j .
\vec{x}	Vector de posición.
y	Coordenada cartesiana. Profundidad.
y^+	Distancia adimensional a la pared.
Y_v	Destrucción de viscosidad turbulenta.
Y_M	Disipación por dilatación.
z	Coordenada cartesiana. Cota geométrica.

Símbolos griegos

α	Difusividad térmica. Factor de subrelajación. Coeficiente de sustitución. Constante de Kolmogorov y del modelo k-omega. Fracción de volumen.
α^*	Constante del modelo k-omega.
α_m	Coeficiente de variación autoespacial.
β	Amplitud de los modos de variación espaciales. Coeficiente de sustitución. Constante del modelo k-omega. Coeficiente de dilatación térmica. Exponente de temperatura. Fracción de líquido.
γ	Coeficiente de sustitución. Coeficiente de intercambio.
Γ	Coeficiente de transporte.
Γ_t	Difusividad turbulenta.
Δ	Tamaño de celdas. Tamaño de filtro.
δ	Distancia entre centroides.
δ	Espesor de la capa límite.
δ^*	Espesor de desplazamiento de la capa límite.
ε	Tasa de disipación turbulenta. Error. Valor infinitesimal.
ε_{ijk}	Operador de signo.
ζ	Coordenada intrínseca o curvilínea 3.
θ	Coordenada tangencial.
θ	Operador booleano.
η	Coordenada intrínseca o curvilínea 2. Escala de Kolmogorov de longitud.
η', η''	Exponentes de las especies.
ϑ	Volumen. Escala característica de velocidad.
κ	Parámetro de discretización. Constante de pared de Von Karman. Número de onda.
κ_c	Filtro de corte.
λ_m	Modo de variación espacial.
μ	Viscosidad (dinámica).
μ_t	Viscosidad artificial (turbulenta).
ν	Viscosidad cinemática.
$\tilde{\nu}$	Turbulencia viscosa modificada.
ν_t	Viscosidad cinemática turbulenta.
ξ	Vorticidad. Coordenada intrínseca o curvilínea 1.
ξ^*	Escala de longitud turbulenta en reacciones químicas.
π	Pi.
Π	Tasa de transferencia de energía.
Π_{ij}	Esfuerzos de presión en el modelo RSM. Reflejo sobre pared.
$\Pi_{ij,r}$	Término rápido en los esfuerzos de presión en el modelo RSM.
$\Pi_{ij,s}$	Término lento en los esfuerzos de presión en el modelo RSM.

xxiv Nomenclatura

$\Pi_{ij,w}$	Término de reflexión de pared en los esfuerzos de presión en el modelo RSM.
ρ	Densidad.
σ	Constante de Stefan-Boltzmann.
σ	Tensión superficial.
$\bar{\bar{\sigma}}$	Tensor de tensiones.
σ_ε	Constante del modelo k-épsilon.
σ_k	Constante del modelo k-épsilon.
σ_m	Modo de variación temporal.
σ_s	Coefficiente de dispersión de radiación.
σ_t	Coefficiente de difusividad turbulenta.
$\sigma_{\bar{v}}$	Constante del modelo Spallart-Almaras.
τ	Escala temporal de Kolmogorov. Tiempo de inestabilidad térmica.
$\bar{\bar{\tau}}$	Tensor de tensiones viscosas.
τ_{ij}	Tensiones de Reynolds. Tensiones de subescala SGS.
τ_{pared}	Tensión cortante en la pared.
Υ	Efecto de reacciones indirectas.
ϕ	Variable genérica.
Φ	Función potencial de velocidad. Solución exacta de variable genérica. Función desfase
Φ_L	Energía específica disipada.
ψ	Función de corriente.
χ	Disipación molecular.
ω	Velocidad de Onda. Velocidad de giro.
Ω	Volumen.
Ω_{ij}	Tensor vorticidad.
Ω_k	Vector rotación.
ω_m	Autovector de variación espacial.

Operadores matemáticos

\propto	Proporcional.
\int	Operador integral.
∇	Operador gradiente. Operador divergencia.
∂	Operador derivada parcial.
Δ	Variación de una variable. Operador Laplaciana.
Σ	Sumatorio.
d	Operador derivada.
$\langle \rangle$	Operador estadístico. Promedio temporal.

Subíndices y superíndices

<i>b</i>	Abajo.
<i>B</i>	Abajo.
comb	Combustible.
<i>cc</i>	Condición de contorno.
ch	Característico.
<i>c.v.</i>	Celdas vecinas.
dato	Valor conocido.
des	Deslizamiento.
<i>e</i>	Este, exterior.
externa	Subcapa límite exterior.
<i>E</i>	Este.
fase	Fase.
<i>i</i>	Punto o componente i-ésima.
in	Inerte.
interna	Subcapa límite interior.
<i>j</i>	Punto o componente j-ésima.
<i>k</i>	Instante k-ésimo.
<i>kk</i>	Diagonal principal.
lam	Laminar.
liq	Líquido.
max	Máximo.
min	Mínimo.
<i>n</i>	Dirección normal. Norte.
<i>N</i>	Norte.
ox	Oxidante.
<i>p</i>	Partícula.
pared	Valor en la pared.
pro	Producto.
<i>P</i>	Presión.
<i>q</i>	Fase q-ésima.
<i>r</i>	Dirección radial.
rad	Radiación.
<i>s</i>	Sur. Relación estequiométrica.
<i>S</i>	Superficie. Sistema. Salida. Sur.
sim	Simulación.
st	Estequiométrico.
<i>t</i>	Total. Dirección tangencial. Arriba.
<i>T</i>	Arriba.

xxvi Nomenclatura

<i>th</i>	Teórica.
tran	Transición.
turb	Turbulento.
vap	Vapor.
V	Volumétrica.
VC	Volumen de control.
<i>w</i>	Oeste.
<i>W</i>	Oeste.
<i>x</i>	Coordenada cartesiana.
<i>y</i>	Coordenada cartesiana.
<i>z</i>	Coordenada cartesiana.
0	Inicial. Instante previo. Referencia.
1	Instante actual.
∞	Condiciones del flujo aguas arriba. Condiciones de longitud infinita.
*	Numérico. Supuesto.
**	Doblemente supuesto.
***	Triplemente supuesto.
—	Valor medio. Filtrado espacial.
‘	Fluctuación. Corrección
^	Pseudo

Siglas

ACF	Función de autocorrelación
AMG	Multigrid aritmético
ASM	Modelo algebraico
CAE	Computer-Aided Engineering
CDS	Central Differences Scheme
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrich-Lewy
CHAM	Concentration Heat And Momentum
CINDEX	Matriz de índices de celda
COEF	Matriz de coeficientes
CSF	Continuum Surface Force
DES	Detached Eddy simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
DO	Discrete Ordinates
DOF	Degrees Of Freedom
DPM	Discrete Phase Model

DSGS	Dinamic Subgrid Scale
DTR	Discrete Transference Radiation
EARSM	Explicit Algebraic Reynolds Stresses Model
EDC	Eddy Dissipation Concept
EVM	Eddy Viscosity Models
EWT	Enhanced wall treatment
FIC	Fluid In Cell
FIDAP	Fluid Dynamics Analysis Package
FINE	Flow INtegrated Environments
FLOPS	FLoating points Operations Per Second
GMG	Multigrid geométrico
I-CFD	Industrial-CFD
IBM	International Business Machines
LANL	Los Alamos National Laboratory
LES	Large Eddy Simulation
LES-NWR	LES-Near Wall Resolved
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
MAC	Marker And Cell
MANIAC	Mathematical Analyzer Numerical Integrator And Computer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NNSA	National Nuclear Security Administration
NWF	Non-equilibrium wall-function
PDF	Probability Distribution Function
PHOENICS	Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code
PIC	Particle In Cell
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators
PLIC	Piecewise Linear Interface Calculation
PNS	Parabolized Navier Stokes
QUICK	Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RSM	Reynolds Stress Models
RTD	Residence Time Distribution
S-A	Spallart-Almaras
S2S	Surface-To-Surface
SGS	Escalas de submalla (<i>subgrid scale</i>)
SIMPLE	Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent
SIMPLER	Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Revised
SLIC	Simple Line Interface Calculation

xxviii Nomenclatura

SST	Shear Stress Transport
SWF	Standard wall function
TDMA	Algoritmo de Tridiagonalización de Matrices
TSH	Thin Shear Layer
URANS	Unsteady RANS
VC	Volumen de Control
VECINDEX	Matriz de índices vecinos
VLES	Very Large Eddy Simulation
VLES-NWR	Very Large Eddy Simulation with Near Wall Modeling
VOF	Volume Of Fluid
WALE	Wall-Adapting Local Eddy-viscosity model
WF	Wall-function
WRLES	Wall-Resolved LES

1

INTRODUCCIÓN AL CFD

Las técnicas numéricas en Ingeniería han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas, siendo concretamente la Mecánica de Fluidos una de las disciplinas científicas donde este auge ha tenido mayor repercusión.

Las ecuaciones generales de la Mecánica de Fluidos no admiten soluciones generales analíticas. Por esta razón, su estudio se ha abordado desde diferentes puntos de vista, tales como la experimentación, el análisis dimensional o el análisis matemático simplificado. Con la evolución de los computadores desde mediados del siglo pasado, se ha añadido una nueva técnica de análisis: el estudio computacional de los flujos, comúnmente conocido como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

En este primer capítulo se abordan los antecedentes de esta disciplina, mostrando su desarrollo histórico desde sus comienzos hasta la situación actual. Además se presentan una serie de ideas introductorias, acerca del uso de estas técnicas, que resumen sus capacidades y restricciones, así como las aplicaciones más destacadas en el ámbito de la Ingeniería.

Contenidos

- 1.1. ¿Qué es el CFD?
- 1.2. Reseña histórica sobre el CFD
- 1.3. Campos de aplicación
- 1.4. Ventajas e inconvenientes
- 1.5. Desarrollo y empleo de códigos: usuario frente a programador
 - 1.5.1. Códigos CFD: secuencia y estructura
 - 1.5.2. Códigos CFD: estrategias a seguir
- 1.6. Objetivos de este libro
- 1.7. Estructura del libro