

Índice general

1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA VENTILACIÓN NATURAL	1
Importancia económica	1
Tipos de ventilación	3
2. DINÁMICA DE FLUIDOS APLICADA A LA VENTILACIÓN	5
2.1. ECUACIONES FÍSICAS QUE DESCRIBEN LOS FLUJOS ATMOSFÉRICOS	5
2.2. FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO EN LA ATMÓSFERA	8
2.3. EFECTO DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA SOBRE EDIFICIOS E INVERNADERO	11
2.4. FORMAS CONVENCIONALES DE ABORDAR LA VENTILACIÓN NATURAL:	14
2.4.1. <i>Métodos experimentales</i>	14
2.4.2. <i>Modelos analíticos y empíricos</i>	15
2.4.3. <i>Modelos multizona y de zona</i>	16
3. DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)	18
3.1. GENERACIÓN DE LA MALLA	20
3.2. RESOLUCIÓN DEL FLUJO PRINCIPAL: DNS, LES Y RANS.....	23
3.3. MODELOS DE TURBULENCIA QUE SE EMPLEAN EN LA TÉCNICA RANS	25
3.3.1. <i>Aproximación de Boussinesq (k-ε standard, RNG y SST k-ω)</i>	25
3.3.2. <i>Modelos de transporte de Reynolds (RSM)</i>	33
3.4. RESOLUCIÓN DEL FLUJO CERCANO A LA PARED (MODELO DE PARED)	34
3.5. ESQUEMAS DE CÁLCULO Y RESIDUOS.....	39
3.6. ANÁLISIS CRÍTICO DE GUÍAS DE BUENAS PRÁCTICAS EN CFD.....	42
3.6.1. <i>Elección de las variables objetivo</i>	44
3.6.2. <i>Elección de las ecuaciones de aproximación para describir la física del flujo</i>	44
3.6.3. <i>Elección de la representación geométrica de los obstáculos</i>	45
3.6.4. <i>Elección del dominio computacional</i>	46
3.6.5. <i>Elección de las condiciones de contorno</i>	48

Simulación del perfil de viento.....	48
Simulación del efecto del suelo	49
Condiciones de contorno en la parte superior del dominio.....	53
Condición de contorno lateral y salida del dominio.....	53
Condiciones de contorno de la superficie de los edificios	54
3.6.6. Elección de las condiciones iniciales	54
3.6.7. Elección de la malla	54
3.6.8. Elección de las aproximaciones numéricas y de los criterios de convergencia	55
3.7. ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS ESTUDIOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL EN INVERNADEROS MEDIANTE CFD	57
4. OBJETIVOS	63
5. MATERIALES Y MÉTODOS	66
5.1. EL SISTEMA AUTOMÁTICO DE ADQUISICIÓN SIMULTÁNEA DE DATOS.	66
5.1.1. Anemómetros sónicos	66
5.1.2. Anemómetros mecánicos: sistema cazoleta-veleta.....	68
5.1.3. Registrador de datos de los anemómetros mecánicos	69
5.1.4. Calibración de los anemómetros mecánicos	71
5.2. DESCRIPCIÓN DEL INVERNADERO	72
5.3. MEDIDAS DE CAMPO	75
5.4. SIMULACIONES.....	77
5.4.1. Variables objetivo	77
5.4.2. Ecuaciones de aproximación	77
5.4.3. Representación geométrica de los obstáculos.....	77
5.4.4. Dominio computacional.....	77
5.4.5. Perfil del viento de entrada	78
5.4.6. Modelo de suelo	79
5.4.7. Condiciones de contorno	80
5.4.8. Condiciones iniciales.....	80

5.4.9. Malla.....	81
5.4.10. Aproximaciones numéricas.....	83
5.4.11. Criterios de convergencia	84
5.4.12. Simulaciones ensayadas y validación	84
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	86
6.1. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA	86
6.2. ANÁLISIS DE LA MALLA DEL INVERNADERO.....	89
6.3. MEDIDAS EXPERIMENTALES DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO	91
6.4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y VALIDACIÓN	93
6.5. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO ALREDEDOR DEL INVERNADERO.....	103
6.6. SUGERENCIA PARA UTILIZAR LOS RESULTADOS DE ESTA TESIS. CASO PRÁCTICO: ESTUDIO DEL FLUJO EN EL INTERIOR DE UN INVERNADERO	108
7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	117
7.1. CONCLUSIONES	117
7.2. PROPUESTA DE TRABAJO FUTURO.....	120
8. REFERENCIAS	122
Trabajos y comunicaciones del autor.....	132
ANEJO A DISCRETIZACIÓN Y LINEALIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE	134
ANEJO B ALGORITMO DE RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES	136
ANEJO C RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE LA SIMULACIÓN	138
ANEJO D RESULTADOS REGRESIÓN	147
ANEJO E FOTOGRAFÍAS DEL INVERNADERO CASO ESTUDIO.....	151

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Principales cultivos y datos de superficie en España (Cotec, 2009).</i>	2
<i>Tabla 2 Estructura de la capa superficial de la atmósfera</i>	11
<i>Tabla 3 Constantes modelo standard k-ε, RNG y SST k-ω</i>	31
<i>Tabla 4 Clasificación revisada de Davenport para obtener la longitud rugosa (z₀) en función del tipo de suelo (Wieringa, 1992)</i>	38
<i>Tabla 5 Revisión de las principales guías de buenas prácticas</i>	43
<i>Tabla 6 Comparación de modelos CFD aplicados a invernaderos</i>	62
<i>Tabla 7 Características técnicas de los anemómetros sónicos</i>	67
<i>Tabla 8 Estación meteorológica Red SIAR (Modelo 1)</i>	75
<i>Tabla 9 Valores z₀ elegidos para la rugosidad del suelo alrededor del invernadero</i>	79
<i>Tabla 10 Cuadro resumen de los parámetros que se utilizaron en las simulaciones</i>	85
<i>Tabla 11 Malla del ambiente exterior del invernadero</i>	90
<i>Tabla 12 Vectores velocidad alrededor del invernadero (velocidad exterior 4 m/s)</i>	92
<i>Tabla 13 Resultados del análisis de regresión lineal (Caso práctico)</i>	109
<i>Tabla 14 Caso práctico: Resumen de la simulación</i>	114
<i>Tabla 15 Datos observados y predichos por los modelos. Módulo (m/s)</i>	115
<i>Tabla 16 Datos observados y predichos por los modelos. Dirección (°)</i>	115
<i>Tabla 17 Resumen de la calidad de la malla utilizada para el caso práctico</i>	116
<i>Tabla 18 Velocidad estandarizada de las simulaciones y medidas experimentales</i>	139

Índice de figuras

<i>Figura 1 Esquema del flujo alrededor de un objeto bidimensional con aristas cortantes: (a) líneas de corriente medias y (b) perfiles de la velocidad (Halitsky, 1968).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2 Esquema del flujo alrededor de un objeto tridimensional con aristas cortantes (Halitsky, 1968).</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3 Ley de pared para superficies suaves (línea de puntos) y arenosas (línea continua) para diferentes $ks+$ (Blocken, et al., 2007)</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4 Representación esquemática del cálculo de (izquierda) primer orden y de (derecha) segundo orden... </i>	<i>40</i>
<i>Figura 5 Diagrama de la primera celda computacional. Perfiles de velocidad del modelo de pared y del perfil logarítmico. (Blocken, et al., 2007)</i>	<i>50</i>
<i>Figura 6 Estación meteorológica PCE-FWS 20 utilizada para la toma de medidas en campo.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 7 Ejemplo de salida de datos de los anemómetros mecánicos</i>	<i>70</i>
<i>Figura 8 Ejemplo de salida de datos de los anemómetros sónicos 3D.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 9 Conexión del sistema de medida desarrollado por el IVIA</i>	<i>70</i>
<i>Figura 10 Calibración de los sensores de cazoleta y veleta frente al sensor sónico.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 11 Emplazamiento invernadero. Catadau (Valencia)</i>	<i>74</i>
<i>Figura 12 Detalle del invernadero y sus alrededores</i>	<i>74</i>
<i>Figura 13 Puesta en campo de los sensores cazoleta, veleta y sónicos.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 14 Planta del dominio del invernadero dividido mediante: (arriba) la técnica Split y (abajo) la técnica O-grid. Representación de la forma de las celdas en las esquinas: o-grid (a y b) y la técnica split (c y d).</i>	<i>82</i>
<i>Figura 15 Comparación entre los módulos de velocidad los anemómetros de cazoleta y sónico. Ambos anemómetros miden con una precisión similar la velocidad del viento.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 16 Comparación entre la dirección medida por el anemómetros de cazoleta y sónico. Ambos anemómetros miden con una precisión similar la dirección del viento.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 17 Velocidad estandarizada en la fachada suroeste del invernadero para los diferentes modelos de turbulencia y datos experimentales (de arriba a abajo): a 3 m y 4 m de altura.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 18 Velocidad estandarizada en la fachada Sureste (Barlovento) y Noroeste (Sotavento) para los diferentes modelos de turbulencia y experimentales.....</i>	<i>97</i>

<i>Figura 19 Representación de las líneas de corriente en un plano perpendicular al suelo contiene los sensores A. Modelo k-ε (arriba) y modelo RSM (abajo). Los cuadros rojos representan los puntos de medida para sensores "A".</i>	98
<i>Figura 20 Regresión lineal de los datos experimentales frente a los datos de simulación para (de izquierda a derecha y de arriba abajo) k-ε estándar primer orden vs 3 m/s; k-ε primer orden vs 4 m/s; k-ε segundo orden 4 m/s; k, RSM segundo orden vs 4 m/s.</i>	101
<i>Figura 21 Detalle de la energía cinética turbulenta del modelo en la esquina Sureste-Noreste del invernadero k-ε (Izquierda) y RSM (Derecha) para velocidad exterior de 3 m/s</i>	102
<i>Figura 22 Líneas de corriente en un plano longitudinal a 1,5 m de la fachada Noreste del invernadero predichas por el modelo RNG k-ε que contiene los puntos "A"</i>	102
<i>Figura 23 Contornos de v-velocidad y líneas de corriente en dos planos horizontales (3m y 4m) para una velocidad exterior de 4 m/s y modelo RSM.</i>	106
<i>Figura 24 Contorno de la velocidad-v en la sección media del invernadero (a) y líneas de corriente en la misma sección (b)</i>	107
<i>Figura 25 Velocidad estandarizada por la velocidad exterior para un viento (arriba) Sureste-Noroeste y (abajo) Noreste-Suroeste.</i>	111
<i>Figura 26 Algoritmo de resolución SIMPLE</i>	137
<i>Figura 27 Representación de las velocidades experimentales estandarizadas por la velocidad exterior en todos los puntos medidos.</i>	140
<i>Figura 28 Velocidad estandarizada por la velocidad exterior en la zona de aproximación del viento exterior (sensores B) para los diferentes modelos de turbulencia y media de los datos experimentales (de arriba a abajo): a 3 m y 4 m de altura.</i>	141
<i>Figura 29 Contornos de la v-velocidad estandarizada frente a la velocidad exterior para: (de arriba a abajo) k-ε primer orden y RNG, SST, y RSM segundo orden; y (de izquierda a derecha) a 3 m y a 4,5 m de altura.</i>	143
<i>Figura 30 Líneas de corriente en un plano paralelo a la fachada Noreste que contiene a los sensores "A" para (de arriba a abajo): k-ε primer orden; RNG k-ε, SST k-ω y RSM de segundo orden.</i>	145
<i>Figura 31 Contornos de v-velocidad en al invernadero (de arriba abajo): centro del vano Nordeste; entre los</i>	

dos últimos vanos del Nordeste y a 1,5 metros de la fachada Nordeste; y de (izquierda a derecha): k-ε primer orden; RNG k-ε, SST k-ω y RSM de segundo orden. 146