

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	3
1.2. Objetivos y Metodología . . . . .	5
1.3. Planteamiento del trabajo . . . . .	7
<b>2. Consideraciones generales sobre el ruido de combustión en motores Diesel</b>	<b>9</b>
2.1. Introducción . . . . .	11
2.2. Fuentes del ruido del motor . . . . .	11
2.2.1. Ruido de combustión . . . . .	13
2.2.2. Ruido mecánico . . . . .	16
2.2.2.1. Cabeceo del pistón . . . . .	16
2.2.2.2. Ruido del cigüeñal . . . . .	19
2.3. Mecanismos físicos asociados al ruido de combustión en motores Diesel	20
2.3.1. Fuente . . . . .	21
2.3.1.1. Modelo de analogía acústica . . . . .	21
2.3.1.2. Modelo de llama turbulenta . . . . .	23
2.3.2. Mecanismos de transmisión . . . . .	26
2.3.3. Mecanismos de emisión . . . . .	29
2.4. Métodos de cuantificación del ruido de combustión . . . . .	37
2.4.1. Experimentales . . . . .	37
2.4.1.1. Determinación de la atenuación del bloque . . . . .	38
2.4.1.2. Descomposición de la presión en el cilindro . . . . .	41
2.4.2. Teóricos . . . . .	45

2.4.2.1.	Análisis vibratorio mediante elementos finitos . . . . .	46
2.4.2.2.	Predicción del ruido mediante métodos numéricos . . .	47
2.5.	Análisis de la resonancia en la cámara de combustión . . . . .	49
2.5.1.	Procedimientos experimentales . . . . .	50
2.5.2.	Procedimientos de cálculo . . . . .	55
2.5.2.1.	Teoría modal . . . . .	56
2.5.2.2.	Técnicas computacionales . . . . .	59
2.6.	Resumen . . . . .	62
<b>3.</b>	<b>Descripción de la metodología CFD</b>	<b>65</b>
3.1.	Introducción . . . . .	67
3.2.	Funcionamiento CFD . . . . .	67
3.3.	Ecuaciones generales . . . . .	69
3.4.	Modelo de turbulencia . . . . .	71
3.5.	Discretización . . . . .	72
3.5.1.	Espacial . . . . .	72
3.5.2.	Temporal . . . . .	75
3.6.	Solución de las ecuaciones discretizadas . . . . .	76
3.7.	Descripción de las geometrías calculadas . . . . .	78
3.8.	Generación de las mallas . . . . .	79
3.8.1.	Malla fija . . . . .	80
3.8.2.	Independencia de malla . . . . .	81
3.8.3.	Malla móvil . . . . .	83
3.9.	Condiciones de contorno e iniciales . . . . .	87
3.9.1.	Condiciones de contorno . . . . .	87
3.9.2.	Condiciones iniciales . . . . .	88
3.10.	Resumen . . . . .	90
<b>4.</b>	<b>Estudio de la sensibilidad de la resonancia a parámetros de motor</b>	<b>91</b>
4.1.	Introducción . . . . .	93
4.2.	Caracterización de la resonancia . . . . .	93
4.3.	Validación de los resultados CFD . . . . .	95
4.4.	Influencia del movimiento del aire . . . . .	97

4.5.	Influencia de la geometría del bowl . . . . .	105
4.5.1.	Parámetros de las cámaras de combustión de los motores Diesel DI . . . . .	106
4.5.2.	Características de las cámaras de combustión estudiadas . . . . .	107
4.5.3.	Características de los cálculos realizados . . . . .	107
4.6.	Influencia de la temperatura del aire encerrado . . . . .	116
4.7.	Influencia de las condiciones de la excitación . . . . .	119
4.7.1.	Ubicación de la excitación . . . . .	120
4.7.2.	Número de excitaciones . . . . .	122
4.7.3.	Tamaño de la excitación . . . . .	125
4.7.4.	Intensidad de la excitación . . . . .	127
4.8.	Resumen . . . . .	130
<b>5.</b>	<b>Cálculo de la resonancia</b>	<b>133</b>
5.1.	Introducción . . . . .	135
5.2.	Procedimiento de cálculo propuesto . . . . .	136
5.2.1.	Características del proceso de combustión en motores Diesel . . . . .	136
5.2.2.	Descripción del procedimiento CFD . . . . .	137
5.2.2.1.	Preprocesado, procesado y posprocesado . . . . .	137
5.2.2.2.	Condiciones de contorno, iniciales y términos fuente . . . . .	145
5.2.2.3.	Resumen y suposiciones . . . . .	147
5.2.2.4.	Comparación de cálculos 3D y 2D . . . . .	148
5.3.	Discusión de resultados y validación . . . . .	150
5.3.1.	Respuesta en frecuencia . . . . .	151
5.3.2.	Energía de resonancia . . . . .	153
5.3.3.	Validación . . . . .	154
5.3.3.1.	Nivel de presión . . . . .	155
5.3.3.2.	Respuesta en frecuencia . . . . .	156
5.3.3.3.	Frecuencia temporal . . . . .	158
5.3.3.4.	Energía de resonancia . . . . .	159
5.4.	Resumen . . . . .	162

<b>6. Aplicación del procedimiento al análisis de la resonancia</b>	<b>163</b>
6.1. Introducción . . . . .	165
6.2. Descripción del estudio paramétrico . . . . .	165
6.3. Análisis de los resultados . . . . .	168
6.3.1. Influencia de las condiciones de inyección . . . . .	168
6.3.2. Influencia del régimen de giro . . . . .	170
6.3.3. Influencia del grado de carga . . . . .	173
6.3.4. Influencia de la geometría del bowl . . . . .	175
6.4. Resumen . . . . .	187
<b>7. Conclusiones y desarrollos futuros</b>	<b>189</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	191
7.2. Desarrollos futuros . . . . .	193
<b>A. Apéndice</b>	<b>195</b>
A.1. Descripción de las instalaciones experimentales . . . . .	197
A.1.1. Descripción de la sala . . . . .	197
A.1.2. Sistema de medida de la presión en el cilindro . . . . .	198
A.1.3. Torso binaural . . . . .	199
A.1.4. Calibración de los transductores de presión . . . . .	199
A.2. Características del motor ensayado . . . . .	201
A.3. Descripción de los ensayos . . . . .	202
A.4. Programas desarrollados para el cálculo de la resonancia . . . . .	202
A.4.1. Generación de autoencendidos . . . . .	203
A.4.2. Control de términos fuente . . . . .	208
<b>B. Bibliografía</b>	<b>229</b>

# Índice de figuras

1.1. Esquema de la metodología seguida . . . . .	6
2.1. Identificación de las fuentes de ruido en un vehiculo . . . . .	12
2.2. Distribución del ruido del motor [4] . . . . .	14
2.3. Relación entre el ruido de combustión y las fuerzas de excitación [4] . . . . .	14
2.4. Fuerza de excitación directa (a) y fuerza de excitación secundaria (b), según Anderton [6] . . . . .	15
2.5. Mecanismo físico del “piston slap” [17] . . . . .	17
2.6. Modelo del “piston slap” [17] . . . . .	18
2.7. Procesos físicos asociados al ruido de combustión [6] . . . . .	20
2.8. Fotografía (A) y esquema (B) de una llama turbulenta [182] . . . . .	24
2.9. Espectro del ruido de combustión para una llama de gases premezclados en campo libre [178] . . . . .	25
2.10. “piston slap” . . . . .	27
2.11. Acoplamiento FE-WB a lo largo de la interface acústica-estructural . . . . .	35
2.12. Modelo híbrido FE-WB para un problema 2D de acústica estructural interna . . . . .	35
2.13. Comparación de la aproximación de presión (en la posición indicada en la figura 2.12 como “p”) para un problema 2D de acústica estructural interna . . . . .	36
2.14. Comparación de la convergencia de presión a 211 Hz para un problema 2D de acústica estructural interna [192] . . . . .	37
2.15. Curvas de atenuación del bloque definidas por Anderton, Rusell y CMT-Motores Térmicos . . . . .	39
2.16. Evidencia experimental de la sensibilidad de la curva de atenuación para diferentes condiciones de operación del motor. Estimación del nivel de ruido de un motor de 1.6 l con la curva de atenuación [189] . . . . .	40

2.17. Curvas de atenuación para dos tipos de motores [189] . . . . .	40
2.18. Presión a 1500 RPM y 38 % de carga en tiempo. Aplicación de la técnica de descomposición de la presión . . . . .	42
2.19. Respuesta en frecuencia a 1500 RPM y 38 % de carga en frecuencia. Aplicación de la técnica de descomposición de la presión . . . . .	42
2.20. Modelo FE del bloque . . . . .	46
2.21. Evidencia experimental de la resonancia para dos ciclos y dos cilindros, a 3500 RPM y 28 % de carga [187] . . . . .	51
2.22. Espectro obtenido de la señal de presión en cilindro para cuatro transductores de presión [67] . . . . .	52
2.23. Sistema de adquisición de 12 transductores de presión . . . . .	53
2.24. Comparación de la ubicación del knock entre la medida con sensores convencionales y el sistema de adquisición en la junta de culata [114] .	54
2.25. Geometría cilíndrica del bowl y sistema de referencia para la aplicación de la teoría modal acústica . . . . .	56
2.26. Patrones de oscilación de los tres modos relevantes . . . . .	58
2.27. Sección transversal de los cinco pistones de diferente diámetro, calculados mediante el método de elementos finitos [66] . . . . .	59
2.28. Influencia de la posición del pistón en el comportamiento de los cuatro primeros modos ( $\alpha_{mn}$ ), motor 1 (izquierda) y motor 5 (derecha) [66] .	60
3.1. Un volumen de control unidireccional alrededor del nodo $P$ [126] . . .	74
3.2. Método de solución basado en la densidad [53] . . . . .	77
3.3. Geometrías de las cámaras de combustión estudiadas . . . . .	78
3.4. Vista isométrica de la topología de malla y condiciones de contorno del bowl cilíndrico . . . . .	80
3.5. Detalle de la topología de malla del bowl cilíndrico: vista desde el plano de simetría (izquierda) y vista desde la culata (derecha) . . . . .	81
3.6. Respuesta en frecuencia de un monitor localizado cerca de la pared en función del número de celdas . . . . .	81
3.7. Energía de resonancia de un monitor localizado cerca de la pared en función del número de celdas . . . . .	82
3.8. Ubicación del captador experimental y puntos CFD de monitorización de presión . . . . .	83
3.9. Influencia del número de celdas en el tiempo CPU por iteración . . . .	83
3.10. Plano de simetría en el modelo tridimensional . . . . .	84
3.11. Zonas que comprende el dominio de cálculo del modelo CFD . . . . .	84

3.12. Metodología seguida para la construcción de la malla tridimensional . . . . .	85
3.13. Características de la malla en la zona simétrica de la geometría tridimensional en dos instantes: en el PMS (A) y a 24.18° APMS (instante en que se inicia la inyección piloto) (B) . . . . .	86
4.1. Patrones de oscilación obtenidos: con la teoría modal (izquierda) y con la aportación CFD (derecha) para 1 fuente de excitación . . . . .	95
4.2. Patrones de oscilación obtenidos: con la teoría modal (izquierda) y con la aportación CFD (derecha) para 5 fuentes de excitación . . . . .	96
4.3. Geometría cilíndrica de la cámara de combustión, distribución de los monitores en el plano transversal 0°, con indicación de la fuente de excitación . . . . .	98
4.4. Comportamiento de los tres modos de oscilación . . . . .	99
4.5. Evolución temporal de la temperatura en el interior del bowl para diferentes niveles de swirl . . . . .	100
4.6. Variación de la frecuencia del primer modo de oscilación entre los casos: $V_t = 34,7$ m/s y $V_t = 0$ m/s . . . . .	101
4.7. Respuesta en frecuencia de un monitor CFD ubicado en la posición del transductor de presión experimental, para diferentes condiciones de flujo en el interior del cilindro . . . . .	101
4.8. Influencia del swirl en la evolución de la $ER(-)$ en diferentes secciones transversales del bowl, para cuatro posiciones radiales $R(-)$ del monitor	102
4.9. Evolución radial de la $ER(-)$ para distintas condiciones de funcionamiento	103
4.10. Diferencia de la $ER(-)$ entre los casos con $V_t = 34.7$ m/s y $V_t = 11.2$ m/s en función del radio adimensional $R(-)$ , estimado para diferentes instantes de la simulación . . . . .	104
4.11. Geometrías de las cámaras de combustión estudiadas, distribución de los monitores en el plano 0°, con indicación de la fuente de excitación	105
4.12. Patrones de oscilación en un plano transversal a la mitad del bowl para las cinco geometrías simuladas con CFD con una sola excitación . . . . .	108
4.13. Respuesta en frecuencia en un monitor ubicado en una posición equivalente a la posición del captador experimental, para las cinco geometrías estudiadas . . . . .	109
4.14. Frecuencia de los tres modos en función del diámetro máximo adimensional de cada geometría, calculados mediante la técnica de CFD y estimados mediante la teoría modal (TM) . . . . .	110
4.15. Geometría “C” con detalle del cilindro imaginario para la estimación del diámetro característico . . . . .	111

4.16. Frecuencia de los tres modos en función del diámetro característico adimensional  $Dc(-)$  de cada geometría, calculados mediante la técnica CFD y estimados mediante la teoría modal (TM) . . . . . 112

4.17. Comparación de la evolución radial de la  $ER(-)$  en el plano  $0^\circ$  entre las cinco geometrías de bowl estudiadas, a diferentes profundidades . . 113

4.18. Evolución radial de la  $ER(-)$  de monitores ubicados en el plano  $0^\circ$  a diferentes profundidades del bowl, para cada geometría de bowl . . . . 114

4.19. Influencia del diámetro máximo y diámetro característico sobre la  $ER(-)$  máxima . . . . . 115

4.20. Geometría “B” con detalle de la ubicación de los puntos de monitorización CFD, punto de monitorización experimental y punto de autoencendido . . . . . 116

4.21. Respuesta en frecuencia para las diferentes temperaturas de aire en el interior del bowl (A) y su respectivo zoom (B) . . . . . 117

4.22. Frecuencia de los modos de resonancia a diferentes temperaturas, estimados con la Teoría Modal (TM) y calculados mediante CFD . . . . . 118

4.23. Evolución radial de la energía de resonancia adimensional en el plano  $0^\circ$  para diferentes temperaturas de aire, para monitores ubicados a distintas profundidades . . . . . 119

4.24. Geometría “B” con detalle de la ubicación de los puntos de monitorización CFD, punto de monitorización experimental, punto de autoencendido de referencia y otros puntos de autoencendido . . . . . 120

4.25. Respuesta en frecuencia para diferentes ubicaciones de autoencendido 121

4.26. Energía de resonancia adimensional máxima y mínima para diferentes posiciones de autoencendido . . . . . 121

4.27. Localización de las zonas de autoencendido en un plano transversal del bowl re-entrante para los casos con: uno, dos y cinco puntos de autoencendido . . . . . 123

4.28. Influencia del número de autoencendidos sobre la respuesta en frecuencia 123

4.29. Comparación de los máximos y mínimos niveles de  $ER(-)$  para uno, dos y cinco autoencendidos . . . . . 124

4.30. Patrones de oscilación obtenidos con CFD en los casos de uno y cinco autoencendidos . . . . . 124

4.31. Tamaño de la zona de autoencendido en el plano transversal del bowl re-entrante para casos con: mitad, referencia, y doble volumen de la excitación . . . . . 125

4.32. Influencia del tamaño de la zona de autoencendido sobre la respuesta en frecuencia . . . . . 126

4.33. Influencia del tamaño de la zona de autoencendido sobre los niveles máximos y mínimos de $ER(-)$ . . . . .	127
4.34. Influencia de la intensidad del autoencendido sobre la respuesta en frecuencia . . . . .	128
4.35. Influencia de la intensidad del autoencendido sobre los niveles máximos y mínimos de $ER(-)$ . . . . .	129
5.1. Paso 1 de la metodología CFD . . . . .	138
5.2. Paso 2 de la metodología CFD . . . . .	139
5.3. Paso 3 de la metodología CFD . . . . .	140
5.4. Distribución de autoencendidos y posición del transductor de presión en la pared con ocho chorros de inyección (A); retraso de la velocidad del sonido asumiendo que el autoencendido ocurre al final del chorro con una temperatura en cámara de 1000 K (B) y efectos de la velocidad del sonido sobre la tasa de liberación de calor (DFQL) en tres casos: DFQL para un transductor ubicado en la pared, DFQL para un transductor central y DFQL corregido con la velocidad del sonido. [68] . . . . .	141
5.5. Paso 4 de la metodología CFD . . . . .	142
5.6. Paso 5 de la metodología CFD . . . . .	143
5.7. Paso 6 de la metodología CFD . . . . .	145
5.8. Geometría y condiciones de contorno consideradas en la simulación CFD de la configuración 2D-axisimétrica . . . . .	149
5.9. Representación de la presión (A) y temperatura (B) a 1500 RPM y 37 Nm de carga, tomada por un monitor ubicado en la misma coordenada que el captador experimental para las configuraciones 2D-axisimétrica y tridimensional . . . . .	149
5.10. Respuesta en frecuencia (A) y zoom de picos de resonancia (B), obtenida de los casos 2D-axisimétrico y tridimensional a 1500 RPM y 37 Nm de carga, a partir de monitores CFD en la misma posición que el transductor experimental . . . . .	150
5.11. Geometría tipo “C” del bowl de la cámara de combustión utilizada en los ensayos experimentales y simulada mediante cálculo tridimensional, con detalle de la distribución de los monitores CFD . . . . .	151
5.12. Respuesta en frecuencia CFD a 1500 RPM y 37 Nm de carga, obtenida de monitores en tres posiciones radiales y en los tres planos: 0° (A), 180° (B), y 90° (C) . . . . .	152
5.13. Evoluciones radiales de la $ER$ para monitores ubicados a diferentes profundidades del bowl, sobre los planos: 0° (A), 180° (B) y 90° (C), obtenida de la simulación CFD con la geometría del bowl tipo “C” . . . . .	154

5.14. Comparación de la evolución de la presión entre el captador experimental y los monitores CFD en los planos $0^\circ$ , $90^\circ$ y $180^\circ$ , vista general (A) y zoom de combustiones piloto (B) y principal (C). Punto de funcionamiento a 1500 RPM, 37 Nm de carga . . . . .	156
5.15. Comparación de la respuesta en frecuencia de la combustión piloto (izquierda), principal (medio) y total (derecha) entre el método experimental y la aportación CFD . . . . .	157
5.16. Evolución de la frecuencia CFD y experimental del primer modo de resonancia durante la combustión principal . . . . .	159
5.17. Variación ciclo a ciclo de la $ER$ obtenido por el transductor en el cilindro 1 . . . . .	160
5.18. Comparación del nivel de $ER$ entre la medida experimental y la simulación CFD sobre los planos: $0^\circ$ (A), $180^\circ$ (B) y $90^\circ$ (C) . . . . .	161
6.1. Geometría de cámara de combustión utilizada en los ensayos experimentales y simulados mediante cálculo tridimensional, con detalle de la distribución de los monitores CFD y zonas de autoencendido . . . .	166
6.2. Comparación a 1500 RPM y 37 Nm de carga entre los puntos de funcionamiento con una y dos inyecciones en dominio tiempo (A) y frecuencia (B), registrada por un monitor CFD en el plano $0^\circ$ en la misma coordenada radial y profundidad que el captador experimental . . . . .	168
6.3. Comparación de la evolución radial de $ER$ a distintas profundidades del bowl en el plano $0^\circ$ , entre los casos con una y dos inyecciones . . .	169
6.4. Comparación a 37 Nm de carga con dos inyecciones entre los casos a 1500 RPM y 2850 RPM en dominio tiempo (A) y frecuencia (B) tomada por un monitor CFD ubicado en el plano $0^\circ$ en la misma coordenada radial y profundidad que el captador experimental . . . . .	171
6.5. Comparación de la evolución temporal de la temperatura en el interior del cilindro entre las simulaciones a 1500 RPM y 2850 RPM . . . . .	171
6.6. Comparación de la evolución radial de la $ER$ , a distintas profundidades $h(-)$ del bowl en el plano $0^\circ$ , entre los casos a 1500 RPM y 2850 RPM	172
6.7. Comparación a 1500 RPM con dos inyecciones entre los casos a 37 Nm y 151 Nm de carga en dominio tiempo (A) y frecuencia (B) tomada por un monitor CFD ubicado en el plano $0^\circ$ en la misma coordenada radial y profundidad que el captador experimental . . . . .	173
6.8. Comparación de la evolución de la temperatura en el interior del cilindro entre las simulaciones a 37 Nm y 151 Nm . . . . .	174
6.9. Comparación de la evolución radial $ER$ , a distintas profundidades del bowl en el plano $0^\circ$ , entre los casos a 37 Nm y 151 Nm de carga . . . .	175
6.10. Efecto de la geometría del bowl sobre la resonancia . . . . .	176

6.11. Geometrías de las cámaras de combustión estudiadas . . . . .	176
6.12. Patrones de oscilación en planos transversales del bowl (columna izquierda) y vista isométrica (columna derecha) de cada geometría cerca del PMS . . . . .	177
6.13. Nivel de presión de las cuatro geometrías estudiadas mediante cálculo CFD para la combustión: piloto (A) y principal (B) . . . . .	178
6.14. Respuesta en frecuencia de las cuatro geometrías estudiadas mediante cálculo CFD para un monitor ubicado en una posición equivalente a la posición del captador experimental en el plano $0^\circ$ . . . . .	179
6.15. Zoom de la figura 6.14 con detalle del primer pico (A) y segundo pico (B) del primer modo de resonancia . . . . .	179
6.16. Comparación de la evolución de la frecuencia del primer pico (A) y del segundo pico (B) de resonancia durante la combustión principal en función de la posición del pistón . . . . .	180
6.17. Comparación de la evolución de la temperatura en el interior del cilindro en la geometrías del bowl “B”, “C”, “D” y “E” para un punto de funcionamiento de 1500 RPM - 37 Nm de carga . . . . .	181
6.18. Comparación de la evolución de $\alpha_{(1,0)}$ (A) y $\alpha_{(0,1)}$ (B) durante la combustión principal en función de la posición del pistón . . . . .	182
6.19. Evolución de la amplitud del primer pico (A) y del segundo pico (B) durante la combustión principal en función de la posición del pistón . . . . .	183
6.20. Evolución radial de la $ER$ , a diferentes profundidades del bowl, para las cuatro geometrías de bowl estudiadas . . . . .	184
6.21. Influencia de la geometría del bowl sobre la evolución radial de la $ER$ , para cuatro profundidades del bowl . . . . .	185
6.22. Influencia de la relación geométrica AR del bowl en los niveles de $ER$ . . . . .	185
6.23. Influencia de la inclinación de las paredes del bowl en los niveles de $ER$ . . . . .	186
A.1. Esquema de la cámara anecóica . . . . .	197
A.2. Fotografía del equipo binaural . . . . .	199
A.3. Posición del torso binaural . . . . .	200
A.4. Ejemplo de calibración de transductores . . . . .	201
A.5. Geometría del bowl del pistón del motor ensayado . . . . .	201

# Indice de tablas

2.1. Parámetros estadísticos del nivel de ruido estimado con la curva de atenuación [189] . . . . .	41
2.2. Coeficientes $C_i$ obtenidos para dos familias de motores y coeficiente de correlación de los dos componentes [128] . . . . .	44
2.3. Coeficientes $C_i$ obtenidos para dos familias de motores y coeficiente de correlación de los tres componentes [189] . . . . .	45
2.4. Coeficientes de Bessel para modos radiales . . . . .	57
3.1. Valores para los coeficientes del modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ . . . . .	72
4.1. Valores de inicialización de la velocidad tangencial y turbulencia de los cálculos CFD, asociados a las condiciones de operación del motor, estimadas en el PMS . . . . .	98
4.2. Características de los cálculos . . . . .	108
4.3. Valores de $Dmax(-)$ y $Dc(-)$ obtenidos para cada geometría . . . . .	111
4.4. Relaciones geométricas de las cámaras de combustión estudiadas . . . . .	113
4.5. Variación de la temperatura del aire en el interior del bowl, usada en el estudio paramétrico CFD . . . . .	117
4.6. Variación del tamaño de la excitación usada en el estudio paramétrico CFD . . . . .	126
4.7. Condiciones de carga experimental usadas para la inicialización del autoencendido en los cálculos CFD . . . . .	128
5.1. Condiciones térmicas en las paredes . . . . .	145
5.2. Condiciones CFD iniciales, al cierre de la válvula de admisión . . . . .	146
6.1. Resumen del estudio paramétrico realizado mediante herramientas CFD	165
6.2. Características de los cálculos . . . . .	167

6.3. Resumen de las condiciones iniciales . . . . .	167
6.4. Resumen de las condiciones de contorno . . . . .	167
6.5. Resumen de datos geométricos y resultados en frecuencia de los dos primeros picos . . . . .	180