

# Índice general

|   |            |
|---|------------|
| <b>Resumen</b>  | <b>I</b>   |
| <b>Resum</b>  | <b>III</b> |
| <b>Abstract</b>   | <b>v</b>   |
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>IX</b>  |
| <b>Índice general</b>   | <b>XI</b>  |
| <b>Nomenclatura</b>   | <b>xv</b>  |
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1. Motivación . . . . .   | 3          |
| 1.2. Objetivos . . . . .  | 5          |
| 1.3. Organización y desarrollo de la Tesis . . . . .                    | 6          |
| <b>2. Modelos de onda plana y caracterización de materiales</b>         | <b>9</b>   |
| 2.1. Introducción . . . . .   | 11         |
| 2.1.1. Modelos aplicables al cálculo acústico . . . . .                 | 11         |
| I. Modelo dinámico . . . . .  | 11         |
| II. Modelo acústico lineal . . . . .                                    | 14         |
| 2.2. Ecuación de ondas . . . . .  | 14         |
| 2.2.1. Medio móvil . . . . .  | 15         |
| 2.2.2. Medio en reposo . . . . .  | 18         |
| 2.3. Acústica unidimensional de conductos . . . . .                     | 19         |
| 2.3.1. Medio en reposo . . . . .  | 19         |
| 2.3.2. Medio móvil . . . . .  | 21         |
| 2.4. Modelos de onda plana. Representación matricial . . . . .          | 23         |
| 2.4.1. Generalidades . . . . .  | 23         |
| 2.4.2. Matriz de transferencia de un conducto . . . . .                 | 25         |
| 2.4.3. Matriz de transferencia de un conducto cónico . . . . .          | 28         |
| 2.4.4. Matriz de transferencia en expansiones y contracciones . . . . . | 29         |
| 2.4.5. Matriz de transferencia de conductos extendidos . . . . .        | 31         |
| 2.5. Placas y tubos perforados . . . . .                                | 32         |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.5.1.    | Impedancia acústica . . . . .   | 33        |
| 2.6.      | Materiales absorbentes . . . . .  | 38        |
| 2.6.1.    | Introducción . . . . .  | 39        |
| 2.6.2.    | Caracterización del material . . . . .  | 43        |
| 2.6.3.    | Consideraciones adicionales . . . . .   | 44        |
| I.        | Efecto en la impedancia de conductos perforados . . . . .   | 44        |
| II.       | Medio móvil . . . . .   | 46        |
| 2.7.      | Silenciadores . . . . .   | 47        |
| 2.7.1.    | Configuraciones sin disipación . . . . .  | 47        |
| 2.7.2.    | Configuraciones con disipación . . . . .  | 48        |
| 2.8.      | Catalizadores . . . . .   | 49        |
| 2.8.1.    | Introducción . . . . .  | 49        |
| 2.8.2.    | Modelado acústico del monolito . . . . .  | 50        |
| I.        | Medio en reposo . . . . .   | 50        |
| II.       | Medio móvil . . . . .   | 53        |
| 2.9.      | Atenuación sonora en silenciadores y catalizadores . . . . .  | 63        |
| 2.9.1.    | Consideraciones energéticas . . . . .   | 63        |
| 2.9.2.    | Índices de atenuación sonora en silenciadores y catalizadores . . . . .   | 64        |
| 2.10.     | Aplicaciones . . . . .  | 65        |
| 2.10.1.   | $TL$ de una cámara de expansión simple . . . . .  | 66        |
| 2.10.2.   | $TL$ de una cámara reversa . . . . .  | 67        |
| 2.10.3.   | $TL$ de una cámara con doble salida opuesta . . . . .   | 68        |
| 2.10.4.   | $TL$ de una cámara reversa con material absorbente y placa perforada . . . . .  | 70        |
| 2.10.5.   | $TL$ de un resonador concéntrico . . . . .  | 73        |
| 2.10.6.   | $TL$ de un resonador concéntrico con material absorbente . . . . .  | 81        |
| 2.10.7.   | $TL$ de un catalizador bicónico . . . . .   | 83        |
| 2.10.8.   | Limitaciones . . . . .  | 86        |
| 2.11.     | Conclusiones . . . . .  | 87        |
| <b>3.</b> | <b>Modelado acústico multidimensional de silenciadores con material absorbente mediante elementos finitos</b> . . . . . | <b>89</b> |
| 3.1.      | Introducción . . . . .  | 91        |
| 3.2.      | Aplicación del MEF a la ecuación de ondas convectiva . . . . .  | 92        |
| 3.2.1.    | Formulación en presión . . . . .  | 92        |
| I.        | Vector de carga . . . . .   | 95        |
| II.       | Imposición de la condición de impedancia . . . . .  | 96        |
| III.      | Obtención de la atenuación . . . . .  | 97        |
| 3.3.      | Subdominios acoplados. Placas y tubos perforados . . . . .  | 97        |
| 3.3.1.    | Medio en reposo . . . . .   | 98        |
| 3.3.2.    | Medio móvil . . . . .   | 100       |
| I.        | Continuidad de velocidad . . . . .  | 101       |
| II.       | Continuidad de desplazamiento . . . . .   | 102       |
| 3.4.      | Modelado de la propagación en materiales absorbentes . . . . .  | 103       |
| 3.4.1.    | Medio en reposo . . . . .   | 105       |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 3.4.2.    | Medio móvil . . . . .   | 107        |
| I.        | Continuidad de velocidad . . . . .  | 109        |
| II.       | Continuidad de desplazamiento . . . . .   | 109        |
| 3.5.      | Aplicaciones . . . . .  | 110        |
| 3.5.1.    | Cámara de expansión simple . . . . .  | 110        |
| 3.5.2.    | Cámara reversa . . . . .  | 111        |
| 3.5.3.    | Cámara con doble salida opuesta . . . . .   | 112        |
| 3.5.4.    | Cámara reversa con material absorbente y placa perforada . . . . .                                | 114        |
| 3.5.5.    | Resonador concéntrico con material absorbente . . . . .   | 117        |
| 3.6.      | Conclusiones . . . . .  | 120        |
| <b>4.</b> | <b>Modelado acústico multidimensional de catalizadores mediante elementos finitos</b>             | <b>123</b> |
| 4.1.      | Introducción . . . . .  | 125        |
| 4.2.      | Modelado acústico de catalizadores sin flujo medio . . . . .                                      | 126        |
| 4.2.1.    | Modelo 3D conductos/3D monolito . . . . .   | 126        |
| 4.2.2.    | Modelo 3D conductos/1D monolito . . . . .   | 129        |
| 4.2.3.    | Comparación de resultados . . . . .   | 134        |
| 4.3.      | Modelado acústico de catalizadores con flujo medio . . . . .                                      | 137        |
| 4.3.1.    | Modelo 3D conductos/1D monolito . . . . .   | 139        |
| 4.3.2.    | Aplicaciones . . . . .  | 139        |
| 4.4.      | Conclusiones . . . . .  | 140        |
| <b>5.</b> | <b>Modelado acústico de silenciadores mediante técnicas analíticas modales multidimensionales</b> | <b>143</b> |
| 5.1.      | Introducción . . . . .  | 145        |
| 5.2.      | Acústica tridimensional de conductos . . . . .  | 147        |
| 5.2.1.    | Conductos rectangulares . . . . .   | 147        |
| 5.2.2.    | Conductos circulares . . . . .  | 150        |
| 5.2.3.    | Conductos cónicos . . . . .   | 154        |
| 5.3.      | Método de ajuste modal . . . . .  | 162        |
| 5.3.1.    | Fundamentos del método . . . . .  | 162        |
| 5.3.2.    | Condiciones de contorno . . . . .   | 165        |
| 5.3.3.    | Aplicaciones . . . . .  | 168        |
| I.        | Cámara de expansión simple . . . . .  | 169        |
| II.       | Cámara reversa . . . . .  | 175        |
| III.      | Cámara con doble salida opuesta . . . . .   | 187        |
| IV.       | Cámara reversa con material absorbente y placa perforada . . . . .                                | 204        |
| 5.4.      | Conclusiones . . . . .  | 213        |
| <b>6.</b> | <b>Modelado acústico de catalizadores mediante técnicas analíticas modales multidimensionales</b> | <b>215</b> |
| 6.1.      | Introducción . . . . .  | 217        |
| 6.2.      | Geometría circular . . . . .  | 217        |

|  |            |
|--|------------|
| 6.2.1. Modelo 3D conductos/3D monolito . . . . .                 | 217        |
| 6.2.2. Modelo 3D conductos/1D monolito . . . . .                 | 223        |
| 6.2.3. Comparación de modelos 3D/3D y 3D/1D . . . . .            | 228        |
| 6.3. Geometría con conductos cónicos . . . . .                   | 229        |
| 6.3.1. Modelo 3D conductos/3D monolito . . . . .                 | 229        |
| 6.3.2. Modelo 3D conductos/1D monolito . . . . .                 | 238        |
| 6.3.3. Comparación de modelos 3D/3D y 3D/1D . . . . .            | 244        |
| 6.4. Comentarios sobre la consideración de flujo medio . . . . . | 244        |
| 6.5. Conclusiones . . . . .                                      | 245        |
| <b>7. Conclusiones y desarrollos futuros</b>                     | <b>247</b> |
| 7.1. Conclusiones . . . . .                                      | 249        |
| 7.2. Desarrollos futuros . . . . .                               | 250        |
| <b>Bibliografía</b>  | <b>253</b> |