

1
2
3
4
5 **APLICACIÓN DE ADVANCED TRANSFER PATH ANALYSIS (ATPA) EN**
6 **UNA AERONAVE DE ROTOR BASCULANTE CON SELECCIÓN**
7 **AUTOMÁTICA DE SUBSISTEMAS BASADA EN MÉTODO GTDT.**

8 **PACS:**

9
10 Rodríguez Sorribes, Pere Vicenç¹; Cierco Molins, Ester¹; Magrans Fontrodona, Francesc
11 Xavier¹; Bizzarro, Giuseppe²; Perazzolo, Alessandro²
12 1. Ingeniería para el Control del Ruido S.L, C/ Berruguete 52, Barcelona 08035 Spain,
13 +34934286339, icr@icrsl.com
14 2. Leonardo Helicopter Division, Via Giovanni Agusta, 520, Cascina Costa (VA), Italia
15

16 **Palabras Clave:** subsistemas, SEA, TPA, ruido, vibraciones
17
18
19
20
21
22
23
24

25 **ABSTRACT.**

26
27 An application has been developed for the automatic selection of subsystems in an aircraft, to be
28 used with Advanced Transfer Path Analysis (ATPA) and Statistical Energy Analysis (SEA)
29 methods. The calculated TD matrix, see GTDT method, has been used.
30 As the powers of the direct transfer matrix are calculated, the weakly coupled subsystems are
31 related to the formation of a diagonal matrix with differentiated blocks. A more uniform matrix
32 appears if the coupling is not weak.
33 An experimental ATPA test has been carried out to know the most dominant paths of interior
34 noise, and to quantify the air-borne and structure-borne.
35

36 **RESUMEN.**

37
38 Se ha desarrollado una aplicación para la selección automática de subsistemas en una
39 aeronave, con el objetivo de ser utilizados por los métodos Advanced Transfer Path Analysis
40 (ATPA) y Análisis Estadístico Energético (SEA).
41 A medida que se calculan las potencias de la matriz de transferencias directas (T^D) se forma
42 una matriz diagonal con bloques diferenciados relacionada con la existencia de subsistemas
43 débilmente acoplados. La matriz se hace más uniforme si el acoplamiento no es débil.
44 Un ensayo ATPA en dicha cabina ha permitido conocer los caminos más dominantes del ruido
45 interior, así como cuantificar la vía aérea y estructural.
46

47 1. INTRODUCCIÓN

48

49 En el marco del proyecto de investigación PIANO, se ha realizado un estudio vibro-acústico de
50 una aeronave de rotor basculante desarrollada por la empresa *Leonardo Helicopter Division*
51 (LHD).

52

53 El objetivo general de dicho proyecto es mejorar el confort acústico en el interior de la
54 aeronave, gracias al conocimiento de los caminos de transmisión del ruido. La cuantificación de
55 las vías de transmisión se ha realizado de manera experimental a través del método Advanced
56 Transfer Path Analysis (ATPA). Por otro lado, se ha desarrollado de manera computacional
57 mediante modelos numéricos FEM y SEA.

58

59 Ambas alternativas, ATPA y SEA, requieren de una subdivisión previa del sistema en
60 subsistemas. Así pues, se realiza un proceso de identificación de subsistemas en la aeronave
61 con un doble objetivo:

62

- 63 • Obtener un modelo del acoplamiento de energía entre subsistemas mediante un
64 modelo SEA específico [3].
- 65 • Aplicar el método ATPA de forma experimental en el interior de la cabina de la
66 aeronave.

66

67 En el contexto de SEA, la identificación de subsistemas se basa generalmente en el cálculo de
68 densidad modal y requiere pasar por análisis modal [4]. En el marco del ATPA, los subsistemas
69 a menudo se escogen de manera cualitativa en base a la experiencia, siempre que se traten
70 casos similares [5]. Sin embargo, una herramienta de identificación de subsistemas basada en
71 un método objetivo es necesaria en numerosas ocasiones. **Error! No s'ha trobat l'origen de la**
72 **referència. Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** El enfoque presentado aquí difiere
73 de aquellos. La identificación de los subsistemas y su grado de acoplamiento se realiza
74 mediante la matriz de transferencia directa (T^D) y sus potencias, según el método desarrollado
75 en [1]. **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**

76

77 En primer lugar, se exponen algunos conceptos relacionados con la teoría GTDT -que subyace
78 al ATPA- (capítulo 2). A continuación, se presenta una descripción del método utilizado, el
79 lenguaje asociado y su justificación física en el capítulo 3. A continuación, se muestra una
80 breve descripción del modelo numérico del rotor basculante. Finalmente, se aplica el método a
81 la aeronave, se evalúan los resultados obtenidos y se exponen las conclusiones del trabajo.

82

83

84 2. BASES DEL MÉTODO GTDT

85

86 El método para identificar los subsistemas en el marco de la GTDT (Global Transfer Direct
87 Transfer) se basa en el concepto de vías de transmisión. Así pues, en esta sección se presentan
88 algunos conceptos relacionados con el análisis de vías de transmisión, que también son la base
89 del método ATPA.

90

91 Suponiendo que un sistema mecánico se describe mediante un sistema lineal de ecuaciones;

92

$$93 \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad x_i, \mathbf{b}_i, A_{ij} \in \mathbb{C} \quad (1)1$$

94 siendo \mathbf{A} una matriz de rigidez generalizada (dinámica) y \mathbf{b} un vector de excitaciones externas.

95

96 La matriz del sistema \mathbf{A} se puede dividir en una matriz diagonal $\mathbf{\Lambda}$, una triangular superior \mathbf{U} y
una triangular inferior \mathbf{L} :

97

$$\mathbf{A} = \mathbf{\Lambda} + \mathbf{L} + \mathbf{U} \quad (2)2$$

98 Así, el sistema lineal se puede reescribir como:

$$(\Lambda + L + U)x = b \quad (3)3$$

$$\Lambda(I + \Lambda^{-1}(L + U))x = b \quad (4)4$$

$$(I + \Lambda^{-1}(L + U))x = \Lambda^{-1}b \quad (5)5$$

$$(I - T^D)x = \Lambda^{-1}b \quad (6)6$$

$$x = \Lambda^{-1}b + T^Dx \quad (7)7$$

99

100 donde T^D es la matriz de transferencias directas (la transposición de la matriz de transferencia
101 directa definida en [2] con ceros en diagonal) y puede expresarse como:

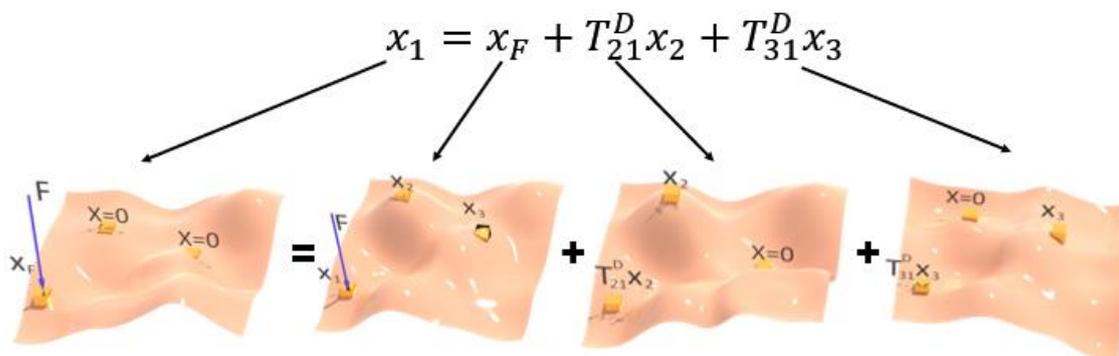
102 **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**

$$T^D = -\Lambda^{-1}(L + U) \quad (8)8$$

103

104 El significado de la ecuación (7) se muestra en la Figura 1 con un ejemplo, una placa con 3 nodos
105 con una fuerza puntual externa F aplicada en el nodo 1. El desplazamiento en el nodo 1
106 ((7)7**Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** x_1) se puede descomponer en 3 términos:
107 el primero es el efecto de la fuerza en el nodo 1 (el desplazamiento en el nodo 1 solo debido a la
108 fuerza aplicada, expresada como x_F y los otros dos representan el efecto del desplazamiento del
109 resto de los nodos en el nodo 1. Volviendo a la ecuación (7), el primer término representa, para
110 cada nodo del sistema, el efecto de las fuerzas externas cuando los otros nodos están
111 bloqueados y el segundo término representa el efecto del desplazamiento (o aceleración o
112 cualquier otra magnitud) del resto de nodos cuando el resto de nodos están bloqueados y no hay
113 fuerza externa.

114



115

116

117

Figura 1. Explicación de la ecuación $x = \Lambda^{-1}b + T^Dx$ mediante ejemplo.

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

La forma en que se obtiene la matriz T^D depende del contexto: a nivel experimental, se determina a partir de las funciones de transferencia global medidas [2], mientras que en un modelo computacional se puede calcular a partir de la matriz del sistema **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència. A.**

La matriz T^D cuantifica cómo la señal (aceleración, velocidad o desplazamiento) en cada uno de los grados de libertad (DOF) del sistema depende de la señal en el resto de DOFs. Esto corresponde al concepto de que la señal en un grado de libertad puede descomponerse en una parte debido al movimiento de los otros grados de libertad y una parte proveniente de fuerzas externas. Esto se hace matemáticamente explícito en la ecuación (8).

El enfoque comúnmente utilizado de que el movimiento de todos los puntos de un sistema es una consecuencia de la aplicación de fuerzas externas a todos los puntos del sistema se traduce ahora en la idea de que cada movimiento DOF puede atribuirse al movimiento de los otros puntos del sistema más una contribución de fuerza externa solo en ese punto.

135

136

Este concepto está en línea con la formulación integral de Green, que establece que la señal en cualquier punto se puede obtener del conocimiento de la señal en un contorno cerrado que la contiene independientemente de la fuerza que ha producido esa señal en el contorno.

138

139

Como observación final sobre la matriz \mathbf{T}^D , cabe señalar que corresponde exactamente a la matriz de Jacobi utilizada en el método iterativo que lleva su nombre.

141

142

Cuando la variable utilizada es la energía de cada subsistema, como por ejemplo en SEA, la señal en los grados de libertad y sus valores son reemplazados por la energía de cada subsistema, y por lo tanto \mathbf{T}^D es la contribución de la energía de cada subsistema a otros subsistemas.

144

145

La matriz \mathbf{T}^D se puede obtener a partir de la ecuación dinámica fundamental de un sistema mecánico:

147

$$([\mathbf{K}] - \omega^2[\mathbf{M}]) \cdot \{x\} = f \quad (9)9$$

$$[\mathbf{H}(\omega)] \cdot \{x\} = f \quad (10)10$$

$$[\mathbf{H}(\omega)] = [\mathbf{K}] - \omega^2[\mathbf{M}] \quad (11)11$$

$$[\mathbf{T}^D] = [\mathit{diag}(\mathbf{H}(\omega))]^{-1} \cdot ([\mathbf{H}(\omega)] - \mathit{diag}([\mathbf{H}(\omega)])) \quad (12)12$$

150

151

152

153

3. SELECCIÓN DE SUBSISTEMAS BASADA EN EL MÉTODO GTDT

154

155

Trabajos previos sobre clustering ([1],[6]) mostraron que, para subsistemas débilmente acoplados, el rendimiento del algoritmo de identificación de subsistemas aumentaba cuando se utilizaban potencias de la matriz **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.****Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** \mathbf{T}^D .

156

157

158

159

La exponenciación de la matriz \mathbf{T}^D tiene el significado físico subyacente de establecer conexiones de orden superior entre nodos. Si \mathbf{T}^{D^1} tiene el significado de la conexión directa de energía entre nodos, \mathbf{T}^{D^2} se puede interpretar como la transferencia de energía entre nodos, después de que la primera transferencia de energía ha tenido lugar, por lo que representa caminos de 2º orden.

160

161

162

163

164

Bajo la hipótesis de que los subsistemas vibroacústicos SEA se definen por el hecho de que la mayor parte de la energía fluye dentro del mismo subsistema, porque las conectividades dentro del subsistema son mucho más fuertes que las conectividades a DOFs fuera de este subsistema, la exponenciación trata de subrayar este comportamiento. Intenta hacerlo fortaleciendo numéricamente la conectividad entre elementos de los mismos subsistemas y diluyendo las conectividades débiles con DOFs pertenecientes a otros subsistemas. La exponenciación de \mathbf{T}^D se realiza mediante productos secuenciales de matrices en un esquema de 2^n , para tener un mejor control de los resultados en cada paso de cálculo. Esto se traduce en el hecho de que solo se evalúan las potencias de dos.

165

166

167

168

169

170

171

172

173

El algoritmo de clustering propuesto se basa en el hecho de que, si existe un subsistema débilmente acoplado, la magnitud de los elementos de la matriz \mathbf{T}^D elevados a la enésima potencia debe ser mayor para los DOFs del propio subsistema. Por tanto, en este caso aparecerá una matriz cuadrada centrada en la diagonal con valores mucho mayores que los del resto de filas y columnas. En la Figura 2. Comportamiento de potencias de matriz sintética de \mathbf{T}^D con

174

175

176

177

178 dos subsistemas se muestra un ejemplo con señales sintéticas que consisten en dos
179 subsistemas totalmente desacoplados

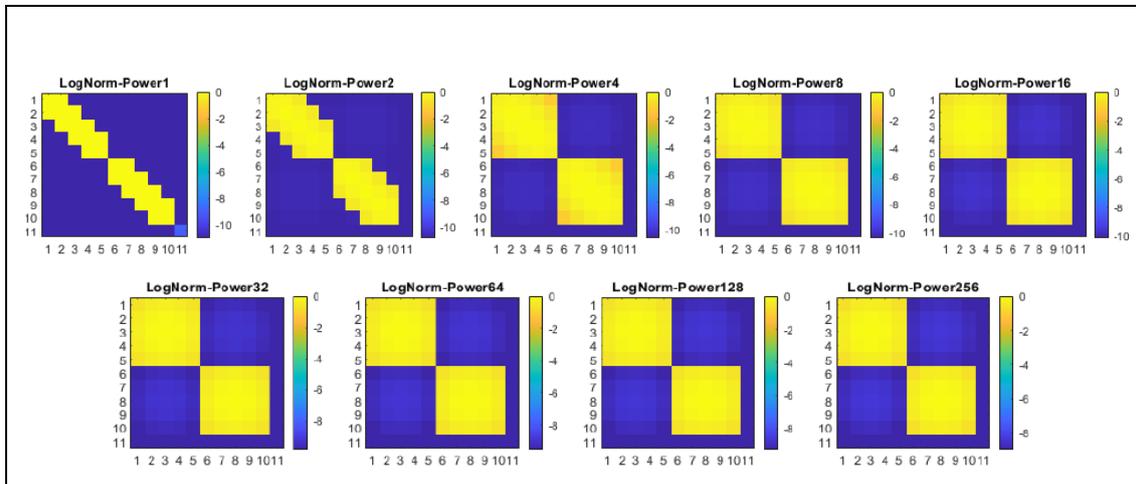


Figura 2. Comportamiento de potencias de matriz sintética de T^D con dos subsistemas1

180

181

182 Así, el método propuesto se basa en evaluar si las potencias matriciales forman matrices
183 cuadradas visibles en diagonal o no, y cuantifica la relación de su norma con sus matrices de
184 acoplamiento, lo que se conoce como contraste.

185 La norma de la matriz de contraste, muestra el grado de fuerza de la unión entre dos subsistemas,
186 es decir, da una escala continua de la fuerza o debilidad de su unión al resto de los subsistemas.
187 Además, su valor inverso establece un límite superior al error asumido si el comportamiento del
188 subsistema se calcula independientemente del otro subsistema [1].**Error! No s'ha trobat**
189 **l'origen de la referència.**

190 El contraste, a medida que aumenta la potencia de la matriz T^D , converge a un límite que
191 depende en cada frecuencia de su mayor valor propio. Por lo tanto, este límite puede conocerse
192 incluso sin calcular las potencias sucesivas.

193 En un modelo de elementos finitos, T^D es una matriz dispersa (*sparse matrix*), igual que la matriz
194 A del sistema. A medida que aumenta la potencia de la matriz T^D , la matriz se llena gradualmente
195 en función del aumento del orden de los caminos y además se conectan caminos más distantes.
196 Una vez que la matriz está completamente llena, la influencia entre los DOF comienza a hacerse
197 visible. Este proceso para una matriz de grandes dimensiones es un proceso costoso que se
198 puede simplificar seleccionando un cierto número de DOFs, generando una matriz más pequeña
199 que la original. De esta manera, hay caminos entre cualquier grado de libertad por muy lejos que
200 esté, la matriz se llena y ya tiene en cuenta las interacciones entre grados de libertad.

201 Cabe destacar que, es crucial tener en cuenta que este no es un método para definir subsistemas
202 basados en ciertas hipótesis, sino un método para localizarlos si existen (con datos de origen
203 experimental o numérico). La existencia de subsistemas no depende del método presentado en
204 sí, sino que es una característica subyacente de la estructura en estudio y de la conectividad
205 entre sus partes definitorias.

206

207

208

4. RESULTADO DE LA SELECCIÓN DE SUBSISTEMAS

209

210

211

212

Los resultados del proceso de subdivisión del subsistema a través de la agrupación de la matriz T^D se muestran en la Figura 3. (a) Matriz T^D Sin agrupar y (b) Matriz T^D agrupada (ordenada), con la posición correspondiente de los elementos agrupados en el modelo de rotor basculante..

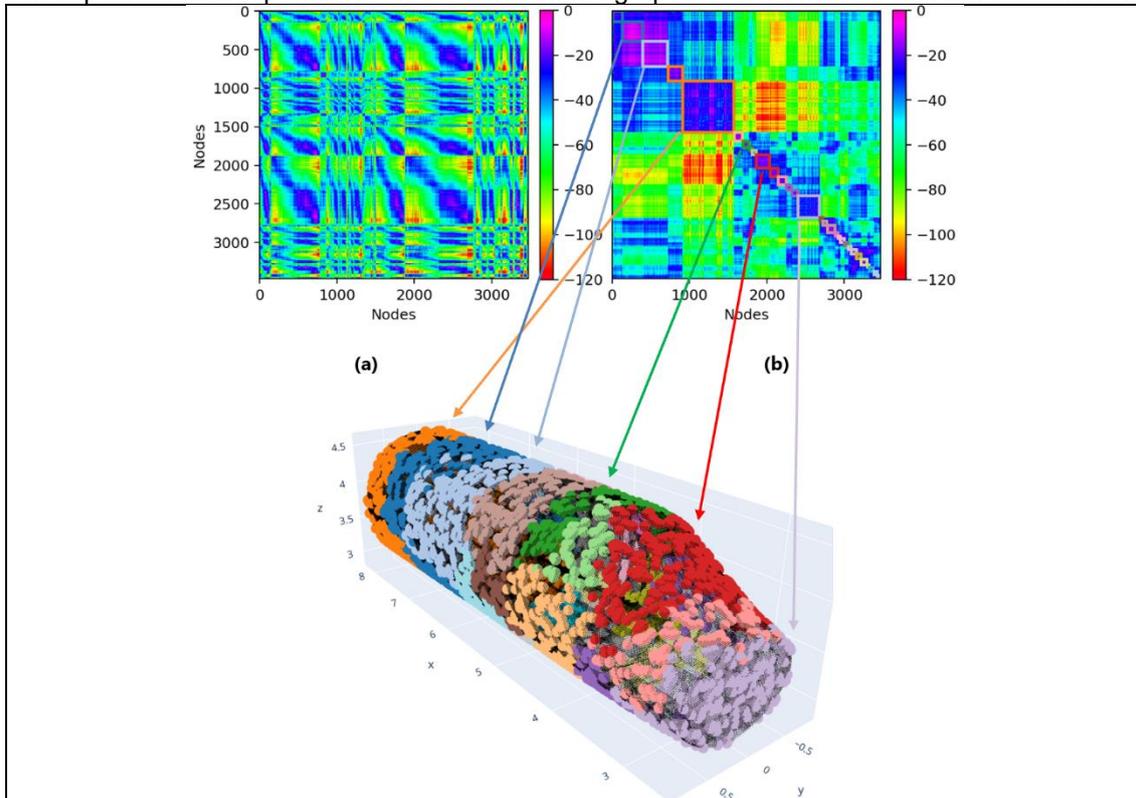


Figura 3. (a) Matriz T^D Sin agrupar y (b) Matriz T^D agrupada (ordenada), con la posición correspondiente de los elementos agrupados en el modelo de rotor basculante.2

213

214

215

216

217

218

219

220

221

La matriz sin ordenar (representada en la Figura 3a) no parece tener ninguna información sobre la distinción de subsistemas, pero después de la agrupación adecuada aparecen varios bloques en la diagonal (Figura 3b). La correspondencia entre los elementos de la matriz T^D y los elementos de la cabina de rotor basculante se muestra en diferentes colores. Todos los elementos que se encuentran dentro del mismo clúster forman un subsistema. **Figura 3.** (a) Matriz T^D Sin agrupar y (b) Matriz T^D agrupada (ordenada), con la posición correspondiente de los elementos agrupados en el modelo de rotor basculante.2 **Figura 3.** (a) Matriz T^D Sin agrupar y (b) Matriz T^D agrupada (ordenada), con la posición correspondiente de los elementos agrupados en el modelo de rotor basculante.2

222

223

224

225

El número de bloques seleccionados es un parámetro de entrada de la metodología de agrupación en clústeres y, como tal, es arbitrario. Sin embargo, la estructura general del sistema se puede observar en la matriz ordenada en cualquier caso, independientemente del número de bloques seleccionados.

226

227

228

Finalmente, los subsistemas en la cabina del rotor basculante se han seleccionado en función de la matriz T^D . Esta selección se muestra en la Figura 4. Selección final de subsistemas en la cabina del rotor basculante según la metodología aplicada:

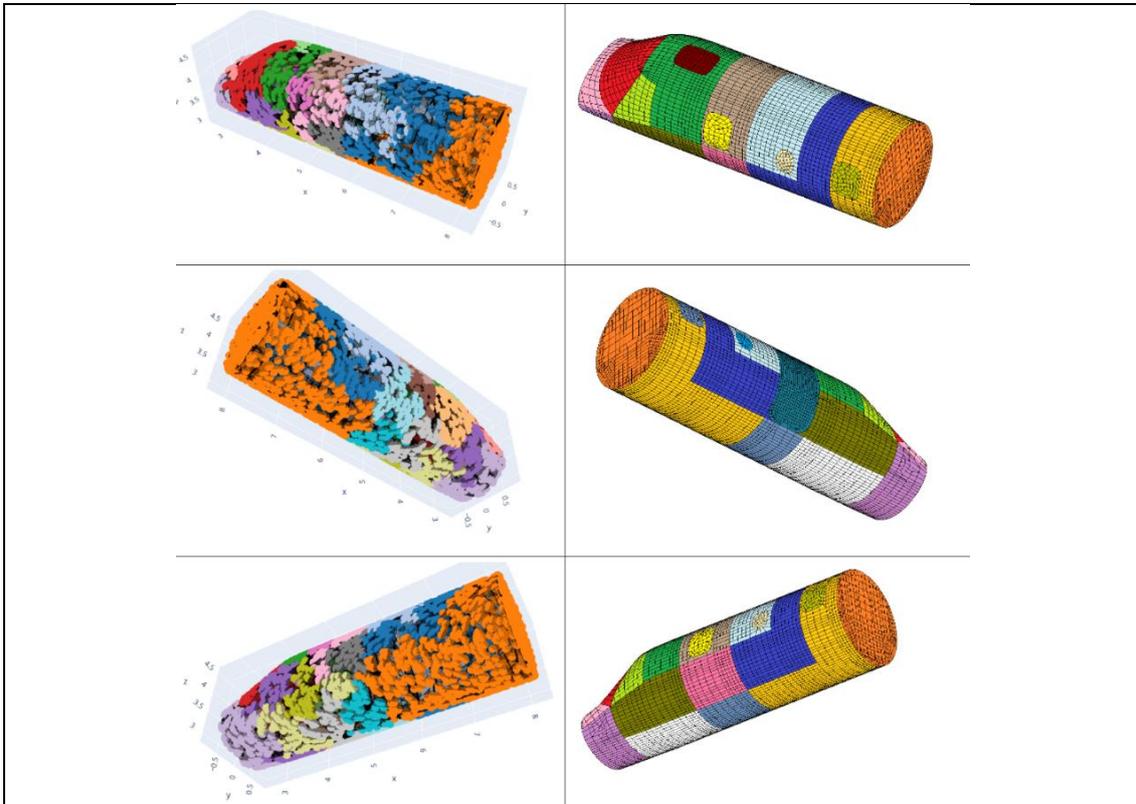


Figura 4. Selección final de subsistemas en la cabina del rotor basculante según la metodología aplicada³

229

230

231

5. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL ATPA

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

Tras la identificación de subsistemas realizada se procedió a realizar un ensayo según metodología ATPA con un objetivo triple: obtener la contribución de cada uno de los paneles/subsistemas interiores en el ruido del micrófono receptor, separar qué parte de esta contribución es estructural y que parte es aérea y finalmente obtener los factores η_{ij} SEA de estos subsistemas a partir de la matriz de T^D (esta parte será objeto de una comunicación futura).

Cada uno de los subsistemas se controló mediante un acelerómetro (subsistemas estructurales) o un micrófono (fisuras o receptores). Las contribuciones de ruido se calcularon en una posición determinada representativa del oído del piloto, llamada Target, y allí se instaló un micrófono.

La prueba consta de dos partes distintas: una medición estática y otra dinámica. Ambas deben llevarse a cabo con sensores (acelerómetros y micrófonos) situados en la misma posición. La prueba estática tiene por objeto recoger todas las funciones de transferencia necesarias para establecer las relaciones entre los subsistemas y tiene que llevarse a cabo con un vehículo estacionado sin cargas externas que actúen sobre él. Las funciones registradas durante el ensayo estático son las denominadas T^G (Funciones de Transferencia Global), que establecen la relación entre cada par de subsistemas. Las T^G medidas darán lugar a otras funciones, que se denominan T^D (Funciones de Transferencia Directa). Las T^D son similares a las T^G , en el sentido de que establecen la relación entre cualquier par de subsistemas, cuando todos los demás subsistemas actúan como si estuvieran bloqueados. Esto implicaría que el resto de los subsistemas controlados no tienen ninguna influencia en la relación establecida por el T^D obtenido. Como esto no puede conseguirse en la práctica, las T^D tienen que obtenerse

255 numéricamente. Los ensayos estáticos permiten medir directamente las T^G , por lo que las T^D
256 pueden calcularse numéricamente durante una etapa de postproceso y análisis.

257

258 En la prueba dinámica, realizada en rampa, el avión funcionó en 2 condiciones operativas:

259

260

- Modo VTOL 100%

261

- Modo AP 86 %

262

263 La lista de subsistemas preliminar obtenida a partir del cálculo fue ligeramente modificada, por
264 motivos prácticos, tras explorar el interior de la aeronave in-situ. Asimismo, se instrumentó tanto
265 la parte estructural (rotor y puntos de unión de las alas a la cabina) como la parte de cabina
266 (paneles laterales, puertas, ventanas, techo, suelo y parabrisas).



Figura 5. Aeronave objeto de ensayo4

267

268

Los resultados obtenidos en dBA para el modo VTOL 100% se muestran en la Figura 6.



Figura 6. Contribuciones de los paneles interiores en dBA para la condición VTOL 100%.5

269

270 La curva y la barra de color negro muestran el valor medido en el micrófono llamado Target
271 mientras que la curva roja nos indica la suma de las contribuciones. Una primera comprobación
272 de la prueba de paneles es conseguir que con los subsistemas escogidos se sintetice el nivel
273 medido, ya que de esta manera se asegura que los subsistemas escogidos son los necesarios
274 para caracterizar el vehículo.
275

307 identificados. Como prueba de la bondad de esta selección previa de subsistemas, se han
308 mostrado los buenos resultados obtenidos con el ensayo de vías de transmisión avanzado
309 (ATPA).

310
311 Los trabajos futuros pueden incluir una propuesta para calcular la mencionada matriz T^D
312 condensada en base a una selección arbitraria de nodos en el modelo FEM, ya que la matriz de
313 contraste presentada sólo se refiere a los subsistemas identificados automáticamente por el
314 método propuesto, y no a los finalmente propuestos bajo criterios de ingeniería. La idea sería,
315 en lugar de realizar primero el clustering, y luego computar los parámetros de acoplamiento entre
316 subsistemas, que el usuario pudiera establecer los subsistemas que le parezcan adecuados, o
317 en general, desee, y a partir de ahí se podría computar esta matriz de acoplamiento.

318

319

320

321 AGRADECIMIENTOS

322

323 Los trabajos presentados en este documento han sido realizados en el marco del proyecto
324 PIANO (Path Identification for Active Noise Control), financiados por el programa Horizon 2020 -
325 Clean Sky, Grant Agreement 885976.

326

327

328

329

REFERENCIAS

330 [1] F.X. Magrans, J. Poblet-Puig, A. Rodríguez-Ferran, A subsystem identification method based
331 on the path concept with coupling strength estimation, *Mech. Syst. Sign. Proc.* 100 (2018) 588–
332 604.

333 [2] F.X. Magrans, Method of measuring transmission paths, *J. Sound Vib.* 74 (1981) 321–330.

334 [3] Free Field Technologies: “Actran 2021.1 User’s guide ActranVI”

335 [4] A. Le Bot, V. Cotoni. Validity diagrams of statistical energy analysis. *Journal of Sound and*
336 *Vibration*, Elsevier, 2010, 329, pp.221-235. 10.1016/j.jsv.2009.09.008. hal-00573940

337 [5] F.X. Magrans, P.V. Rodriguez G. Cousin, Low and mid-high frequency advanced
338 transmission path analysis. *Proceedings of the 12 International Congress on Sound and Vibration*,
339 *Lisboa, Portugal (2005)*.

340 [6] F.X. Magrans, J. Poblet-Puig, A. Rodríguez-Ferran., The solution of linear mechanical
341 systems in terms of path superposition, *Mech. Syst. Signal Proc.* 85 (2017) 111–125.

342 [7] F.X. Magrans, J. Poblet-Puig, A. Rodríguez-Ferran. Sub-structuring of mechanical systems
343 based on the path concept. In: *INTER-NOISE 2016 in Hamburg, Germany August 21-24, 2016:*
344 *45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering p. 2485-2494.*

345