



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA REALIZACIÓN DE ENSAYOS AERODINÁMICOS.

Alumno: José Peragón de la Torre

Tutor: Prof. Dña. Rocío Bolaños Jiménez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2022



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Doña Rocío Bolaños Jiménez , tutora del Trabajo de Fin de Grado titulado: Diseño, construcción y puesta a punto de un túnel de viento para realización de ensayos aerodinámicos, que presenta José Peragón de la Torre, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, junio de 2022

El alumno:

José Peragón de la Torre

Los tutores:

Rocío Bolaños Jiménez

Índice general.

1. Introducción.....	12
1.1. Resumen/Abstract.....	12
1.2. Motivación, justificación y objetivos del trabajo.....	14
1.3. Aspectos generales de un túnel de viento.....	15
1.3.1. Historia.....	16
1.3.2. Tipos de túnel de viento.....	17
1.3.3. Componentes generales de un túnel de viento y su diseño.....	19
1.4. Mecánica de Fluidos Computacional.....	25
1.4.1. Generalidades.....	25
1.4.2. Ecuaciones de Navier-Stokes.....	27
1.4.3. Condiciones de contorno.....	29
1.4.4. Discretización del dominio computacional: Malla computacional.....	30
1.4.5. Métodos numéricos.....	32
1.4.6. Convergencia de simulaciones numéricas.....	35
1.4.7. Modelos de turbulencia.....	36
1.5. Instrumentos de medición de flujo.....	40
1.5.1. Tubo de venturi.....	40
1.5.2. Tubo de Pitot.....	41
1.5.3. Anemómetro de hilo caliente.....	42
2. Descripción del túnel de viento.....	43
2.1. Entrada.....	44
2.2. Contracción.....	46
2.3. Zona de ensayo.....	53
2.4. Difusor.....	54
2.5. Fleje.....	55
2.6. Ventilador.....	56
3. Simulaciones numéricas.....	62
3.1. Selección de la tobera: Simulaciones 2D.....	62
3.1.1. Mallado.....	62
3.1.2. Configuración de la simulación y selección de tobera.....	68
3.2. Estudio de sensibilidad de malla.....	73
3.3. Simulación 3D de la tobera.....	76
3.3.1. Mallado 3D de la tobera.....	76
3.3.2. Ejecución de la simulación 3D.....	80
3.3.3. Estudio de sensibilidad de malla de la simulación 3D.....	83

3.4.	Simulación 2D del túnel completo.	85
3.4.1.	Mallado 2D del túnel completo.	85
3.4.2.	Configuración de la simulación del túnel completo.	87
4.	Construcción del túnel.....	94
4.1.	Soporte inferior.....	96
4.2.	Entrada.	99
4.3.	Contracción.....	102
4.4.	Sección de medida.....	106
4.5.	Difusor.....	113
4.6.	Fleje y ventilador.	117
4.7.	Presupuesto.....	119
5.	Calibración del túnel.	124
5.1.	Calibración del túnel de viento.	124
5.1.1.	Calibración con anemómetro de hilo caliente.	124
5.1.2.	Calibración con tubo de Pitot.....	128
5.2.	Comprobación de uniformidad de flujo.	134
6.	Conclusiones y trabajo futuro.....	142
7.	Anexos.....	144
7.1.	Anexo I. Planos de los componentes del túnel de viento.....	144
7.1.1.	Entrada.	144
7.1.2.	Contracción.....	146
7.1.3.	Sección de medida.....	149
7.1.4.	Difusor.	151
7.2.	Anexo II. Comparación de las configuraciones de la simulación.....	154
7.3.	Anexo III. Comparación de los modelos de las curvas.	174
7.4.	Anexo IV. Resultados de la comprobación de uniformidad de flujo.	185
8.	Bibliografía	204

Índice de figuras.

Figura 1. Túnel de viento cerrado de la Universidad de Jaén.	14
Figura 2. Brazo giratorio de Benjamin Robins. (7).	16
Figura 3. Túnel de viento abierto. (1).....	17
Figura 4. Túnel de viento cerrado. (8).....	18
Figura 5. Rejilla <i>honeycomb</i>	20
Figura 6. Rejilla de malla rectangular.	20
Figura 7. Tipos de rejillas. (11)	20
Figura 8. Esquema de una tobera. (13)	21
Figura 9. Método de las líneas características. (10)	23
Figura 10. Curva Presión-Caudal de un ventilador axial. (18).....	25
Figura 11. Mallado estructurado. (24).....	30
Figura 12. Mallado no estructurado. (25).....	30
Figura 13. Malla híbrida. (26).....	31
Figura 14. Malla móvil. (27)	31
Figura 15. Residuales de una simulación numérica.....	35
Figura 16. Residuales de una simulación numérica sin converger	36
Figura 17. Modelo Spalart-Allmaras en Ansys Fluent.	37
Figura 18. Modelo Standard k- ϵ en Ansys Fluent.	38
Figura 19. Modelo Realizable k- ϵ en Ansys Fluent.	38
Figura 20. Modelo RNG k- ϵ en Ansys Fluent.....	39
Figura 21. Modelo Standard k- ω en Ansys Fluent.	39
Figura 22. Modelo SST k- ω en Ansys Fluent.....	40
Figura 23. Esquema de tubo de Venturi. (28).....	41
Figura 24. Esquema de tubo de Pitot. (7)	41
Figura 25. Esquema de anemómetro de hilo caliente. (29).....	42
Figura 26. Estructura del túnel de viento. Formato CAD.....	43
Figura 27. Túnel de viento. Formato CAD.	43
Figura 28. Túnel de viento. Vistas.	44
Figura 29. Lámina de sección de entrada. Formato CAD.	45
Figura 30. Estructura de sección de entrada. Formato CAD.....	45
Figura 31. Entrada del túnel de viento. Formato CAD.	46
Figura 32. Ilustración del punto x_m . (12).....	46
Figura 33. Curva $0.5x_m$	47
Figura 34. Curva $0.375x_m$	47
Figura 35. Curva $0.625x_m$	48
Figura 36. Curva Modelo Grado 6.	49
Figura 37. Curva Modelo Grado 8.	49
Figura 38. Curva Modelo Grado 10.	50
Figura 39. Curva Modelo Principal.	50
Figura 40. Ilustración comparativa de las curvas de contracción.	51
Figura 41. Tobera. Formado CAD.	51
Figura 42. Estructura de la contracción. Formato CAD.....	52
Figura 43. Tobera ensamblada. Formato CAD.	52
Figura 44. Estructura de la zona de ensayo. Formato CAD.....	53
Figura 45. Zona de ensayo. Formato CAD.	53
Figura 46. Difusor. Formato CAD.	54
Figura 47. Estructura del difusor. Formato CAD.	54

Figura 48. Ensamblaje del difusor. Formato CAD.....	55
Figura 49. Fleje.	55
Figura 50. Ventilador.	56
Figura 51. Curva de funcionamiento del ventilador.....	56
Figura 52. Características geométricas del ventilador.	57
Figura 53. Variador de frecuencia.	57
Figura 54. Ventilador del variador.....	58
Figura 55. Fuente de alimentación del variador.	58
Figura 56. Mando de control del variador.	58
Figura 57. Obtención de los puntos de la curva de funcionamiento con <i>PlotDigitizer</i>	59
Figura 58. Curva de funcionamiento del ventilador aproximada.	59
Figura 59. Curvas de funcionamiento del ventilador aproximadas.	61
Figura 60. Introducción de curva de contracción en SolidWorks.....	63
Figura 61. Mallado 1 del Modelo Principal.....	63
Figura 62. Mallado 1 del modelo principal (zoom).	64
Figura 63. Comprobación de calidad de la malla 1.	64
Figura 64. Mallado 2 del modelo principal.	65
Figura 65. Mallado 2 del modelo principal (zoom).	65
Figura 66. Comprobación de calidad de la malla 2.	66
Figura 67. Mallado 3 del modelo principal.	66
Figura 68. Mallado 3 del modelo principal (zoom).	67
Figura 69. Comprobación de calidad de la malla 3.	67
Figura 70. Comparación de velocidades a la entrada de las curvas de contracción.	68
Figura 71. Comparación de velocidades a la salida de las curvas de contracción.....	69
Figura 72. Comparación de velocidades horizontales a la salida de las curvas de contracción.....	69
Figura 73. Comparación de velocidades verticales a la salida de las curvas de contracción.	70
Figura 74. Contorno de velocidad de la tobera elegida.....	70
Figura 75. Contorno de presión de la tobera elegida.	71
Figura 76. Vectores de velocidad de la tobera elegida. Imagen 1.....	71
Figura 77. Vectores de velocidad de la tobera elegida. Imagen 2.....	72
Figura 78. Contorno de velocidad. Malla 1.	73
Figura 79. Contorno de presión. Malla 1.....	73
Figura 80. Perfil de velocidad. Malla 1.....	73
Figura 81. Contorno de velocidad. Malla 2.	74
Figura 82. Contorno de presión. Malla 2.....	74
Figura 83. Perfil de velocidad. Malla 2.....	74
Figura 84. Contorno de velocidad. Malla 3.	75
Figura 85. Contorno de presión. Malla 3.....	75
Figura 86. Perfil de velocidad. Malla 3.....	75
Figura 87. Zona de fluido de la simulación 3D.....	76
Figura 88. Mallado 1 de la tobera 3D.....	77
Figura 89. Mallado interior 1 de la tobera 3D.....	77
Figura 90. Comprobación de calidad de la malla tridimensional 1.	78
Figura 91. Mallado 2 de la tobera 3D.....	78
Figura 92. Mallado interior 2 de la tobera 3D.....	79
Figura 93. Comprobación de calidad de la malla tridimensional 2.	79

Figura 94. Residuales. Simulación 3D.....	80
Figura 95. Contorno de velocidad delantero. Simulación 3D.	80
Figura 96. Contorno de velocidad trasero. Simulación 3D.	81
Figura 97. Contorno de presión. Simulación 3D.	81
Figura 98. Residuales. Segunda simulación 3D.	82
Figura 99. Contorno de velocidad. Segunda simulación 3D.	82
Figura 100. Contorno de presión. Segunda simulación 3D.	82
Figura 101. Residuales del estudio de sensibilidad de malla. Simulación 3D.	83
Figura 102. Contorno de velocidad del estudio de sensibilidad de malla. Simulación 3D.	84
Figura 103. Contorno de presión del estudio de sensibilidad de malla. Simulación 3D.....	84
Figura 104. Túnel 2D completo. Mallado normal.	85
Figura 105. Túnel 2D completo. Detalle de mallado normal.....	85
Figura 106. Comprobación de calidad del mallado normal del túnel completo.....	86
Figura 107. Túnel 2D completo. Mallado de capa límite.	86
Figura 108. Túnel 2D completo. Detalle de mallado de capa límite.	86
Figura 109. Comprobación de calidad del mallado de capa límite del túnel completo.	87
Figura 110. Curva del ventilador en Ansys Fluent.	88
Figura 111. Residuales. Simulación túnel completo con mallado normal.....	89
Figura 112. Contorno de velocidad. Simulación túnel completo con mallado normal.....	89
Figura 113. Contorno de presión. Simulación túnel completo con mallado normal.	89
Figura 114. Vectores de velocidad 1. Simulación con mallado normal.	90
Figura 115. Vectores de velocidad 2. Simulación con mallado normal.	90
Figura 116. Vectores de velocidad 3. Simulación con mallado normal.	90
Figura 117. Residuales. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.	91
Figura 118. Contorno de velocidad. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.	91
Figura 119. Contorno de presión. Simulación túnel completo con malla final en la capa límite.	92
Figura 120. Vectores de velocidad 1. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.	92
Figura 121. Vectores de velocidad 2. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.	92
Figura 122. Vectores de velocidad 3. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.	93
Figura 123. Túnel de viento finalizado. Vista posterior.	94
Figura 124. Túnel de viento finalizado. Vista anterior.	94
Figura 125. Láminas de metacrilato y PVC.....	95
Figura 126. Láminas de PVC.....	95
Figura 127. Perfiles del soporte.....	96
Figura 128. Conexión de barras con escuadras.	96
Figura 129. Unión atornillada de las barras.	97
Figura 130. Patas del soporte.....	97
Figura 131. Apoyo inferior.	98
Figura 132. Rueda inferior.....	98
Figura 133. Soporte completo.	99
Figura 134. Paneles iniciales.....	99
Figura 135. Refuerzos de la entrada.	100
Figura 136. Entrada construida.	100

Figura 137. Filtro de tela.....	101
Figura 138. <i>Honeycomb</i> introducido en la entrada.	101
Figura 139. Rejilla de malla rectangular introducida en la entrada.....	102
Figura 140. Perfil de contracción plano.	102
Figura 141. Perfil de contracción doblado.....	103
Figura 142. Uniones atornilladas en las costillas de la tobera.....	103
Figura 143. Estructura de la tobera finalizada.	104
Figura 144. Tobera construida.....	104
Figura 145. Tobera lijada.....	105
Figura 146. Tobera pintada.	105
Figura 147. Tobera finalizada.	106
Figura 148. Sección de medida construida.....	106
Figura 149. Marco de la zona de ensayo.....	107
Figura 150. Piezas adicionales.....	107
Figura 151. Tapadera lateral de la zona de ensayo.....	108
Figura 152. Compuerta lateral de la zona de ensayo.	108
Figura 153. Compuerta inferior y cierres.	109
Figura 154. Compuerta superior de la sección de medida.....	109
Figura 155. Agujeros de la compuerta superior.	110
Figura 156. Agujeros de la compuerta inferior.	110
Figura 157. Tapones de los agujeros de las compuertas.....	111
Figura 158. Agujeros de la compuerta superior tapados.....	111
Figura 159. Agujeros de la compuerta inferior tapados.....	112
Figura 160. Sección de medida finalizada.	112
Figura 161. Triángulos del difusor.	113
Figura 162. Costillas del difusor.	113
Figura 163. Marco redondo del difusor.	114
Figura 164. Unión de estructura y triángulos.	114
Figura 165. Triángulo doblado.....	115
Figura 166. Molde para los triángulos doblados.	115
Figura 167. Difusor con material añadido y lijado.	116
Figura 168. Difusor terminado.	116
Figura 169. Conexiones para arranque en estrella.	117
Figura 170. Esquema de fuerza del ventilador.	117
Figura 171. Soporte del ventilador.....	118
Figura 172. Variador acoplado al soporte.....	118
Figura 173. Ventilador y fleje adaptados.	119
Figura 174. Presupuesto de las planchas.....	119
Figura 175. Presupuesto del ventilador.	120
Figura 176. Presupuesto del variador.....	120
Figura 177. Presupuesto de las rejillas.....	121
Figura 178. Presupuesto de la perfilería.....	121
Figura 179. Presupuesto del herraje.....	122
Figura 180. Presupuesto de mano de obra.....	122
Figura 181. Resumen de presupuesto.....	123
Figura 182. Monitor del anemómetro de hilo caliente.	124
Figura 183. Colocación de varilla del anemómetro de hilo caliente.	125
Figura 184. Varilla del anemómetro de hilo caliente en el interior del túnel.....	125

Figura 185. Gráfica v-f con anemómetro de hilo caliente.....	127
Figura 186. Gráfica f-v con anemómetro de hilo caliente.....	127
Figura 187. Calibración de túnel de viento con tubo de Pitot.	128
Figura 188. Software MPSLink.	129
Figura 189. Multiplexor.	130
Figura 190. Ejemplo de velocidad media medida con tubo de Pitot.	131
Figura 191. Diagrama v-f con tubo de Pitot.	131
Figura 192. Diagrama f-v con tubo de Pitot.	132
Figura 193. Comparación de gráficas v-f con ambos aparatos de medida.....	132
Figura 194. Comparación de gráficas f-v con ambos aparatos de medida.....	133
Figura 195. Agujeros superiores (1-7).	134
Figura 196. Agujeros inferiores (2-6).	134
Figura 197. Esquema de los puntos de medida.....	135
Figura 198. Velocidades del agujero 4 con altura 3.....	136
Figura 199. Velocidades del agujero 4 con altura 3. Zoom 1.	136
Figura 200. Velocidades del agujero 4 con altura 3. Zoom 2.	137
Figura 201. Picos de frecuencia en la medida de velocidad.	137
Figura 202. Contorno de velocidad medido a la salida de la tobera.....	139
Figura 203. Contorno real de velocidad a la salida de la tobera.	140
Figura 204. Contorno de intensidad turbulenta a la salida de la tobera.	141
Figura 205. Plano de entrada.	144
Figura 206. Plano de entrada. Marco 1.	144
Figura 207. Plano de entrada. Marco 2.	145
Figura 208. Plano de entrada. Marco 3.	145
Figura 209. Plano de entrada. Ensamblaje.....	146
Figura 210. Plano de contracción. Tobera.....	146
Figura 211. Plano de contracción. Marco 1.	147
Figura 212. Plano de contracción. Marco 2.	147
Figura 213. Plano de contracción. Marco 3.	148
Figura 214. Plano de contracción. Marco 4.	148
Figura 215. Plano de contracción. Ensamblaje.....	149
Figura 216. Plano de sección de medida.....	149
Figura 217. Plano de sección de medida. Marco 1.	150
Figura 218. Plano de sección de medida. Marco 2.	150
Figura 219. Plano de sección de medida. Ensamblaje.	151
Figura 220. Plano de difusor.....	151
Figura 221. Plano de difusor. Marco 1.....	152
Figura 222. Plano de difusor. Marco 2.....	152
Figura 223. Plano de difusor. Marco 3.....	153
Figura 224. Plano de difusor. Ensamblaje.	153
Figura 225. Residuales. Simulación 1.	154
Figura 226. Contorno de velocidad. Simulación 1.....	154
Figura 227. Contorno de presión. Simulación 1.....	155
Figura 228. Perfil de velocidad. Simulación 1.	155
Figura 229. Residuales. Simulación 2.	156
Figura 230. Contorno de velocidad. Simulación 2.....	156
Figura 231. Contorno de presión. Simulación 2.....	156
Figura 232. Perfil de velocidad. Simulación 2.	157

Figura 233. Residuales. Simulación 3.	157
Figura 234. Contorno de velocidad. Simulación 3.....	158
Figura 235. Contorno de presión. Simulación 3.....	158
Figura 236. Perfil de velocidad, Simulación 3.	158
Figura 237. Residuales. Simulación 4.	159
Figura 238. Contorno de velocidad, Simulación 4.....	159
Figura 239. Contorno de presión, Simulación 4.....	160
Figura 240. Perfil de velocidad. Simulación 4.	160
Figura 241. Residuales. Simulación 5.	161
Figura 242. Contorno de velocidad. Simulación 5.....	161
Figura 243. Contorno de presión. Simulación 5.....	162
Figura 244. Perfil de velocidad. Simulación 5.	162
Figura 245. Residuales. Simulación 6.	163
Figura 246. Contorno de velocidad. Simulación 6.....	163
Figura 247. Contorno de presión. Simulación 6.....	163
Figura 248. Perfil de velocidad. Simulación 6.	164
Figura 249. Residuales. Simulación 7.	165
Figura 250. Contorno de velocidad. Simulación 7.....	165
Figura 251. Contorno de presión. Simulación 7.....	166
Figura 252. Perfil de velocidad, Simulación 7.	166
Figura 253. Residuales. Simulación 8.	167
Figura 254. Contorno de velocidad. Simulación 8.....	167
Figura 255. Contorno de presión. Simulación 8.....	168
Figura 256. Perfil de velocidad. Simulación 8.	168
Figura 257. Residuales. Simulación 9.	169
Figura 258. Contorno de velocidad. Simulación 9.....	169
Figura 259. Contorno de presión. Simulación 9.....	170
Figura 260. Perfil de velocidad. Simulación 9.	170
Figura 261. Residuales. Simulación 10.	171
Figura 262. Contorno de velocidad. Simulación 10.....	171
Figura 263. Contorno de presión. Simulación 10.....	171
Figura 264. Perfil de velocidad. Simulación 10.	172
Figura 265. Residuales. Simulación 11.	172
Figura 266. Contorno de velocidad. Simulación 11.....	173
Figura 267. Contorno de presión. Simulación 11.....	173
Figura 268. Perfil de velocidad. Simulación 11.	173
Figura 269. Residuales. Simulación 12.	174
Figura 270. Contorno de velocidad. Simulación 12.....	174
Figura 271. Contorno de presión. Simulación 12.....	175
Figura 272. Perfil de velocidad. Simulación 12.	175
Figura 273. Residuales. Simulación 13.	176
Figura 274. Contorno de velocidad. Simulación 13.....	176
Figura 275. Contorno de presión. Simulación 13.....	177
Figura 276. Perfil de velocidad. Simulación 13.	177
Figura 277. Residuales. Simulación 14.	178
Figura 278. Contorno de velocidad. Simulación 14.....	178
Figura 279. Contorno de presión. Simulación 14.....	178
Figura 280. Perfil de velocidad. Simulación 14.	179

Figura 281. Residuales. Simulación 15.	179
Figura 282. Contorno de velocidad. Simulación 15.....	180
Figura 283. Contorno de presión. Simulación 15.....	180
Figura 284. Perfil de velocidad. Simulación 15.	180
Figura 285. Residuales. Simulación 16.	181
Figura 286. Contorno de velocidad. Simulación 16.....	181
Figura 287. Contorno de presión. Simulación 16.....	182
Figura 288. Perfil de velocidad. Simulación 16.	182
Figura 289. Residuales. Simulación 17.	183
Figura 290. Contorno de velocidad. Simulación 17.....	183
Figura 291. Contorno de presión. Simulación 17.....	184
Figura 292. Perfil de velocidad. Simulación 17.	184
Figura 293. Velocidades del agujero 1 con altura 1.	185
Figura 294. Velocidades del agujero 1 con altura 2.	186
Figura 295. Velocidades del agujero 1 con altura 3.	186
Figura 296. Velocidades del agujero 2 con altura 1.	187
Figura 297. Velocidades del agujero 2 con altura 2.	187
Figura 298. Velocidades del agujero 2 con altura 3.	188
Figura 299. Velocidades del agujero 2 con altura 4.	188
Figura 300. Velocidades del agujero 2 con altura 5.	189
Figura 301. Velocidades del agujero 2 con altura 6.	189
Figura 302. Velocidades del agujero 3 con altura 1.	190
Figura 303. Velocidades del agujero 3 con altura 2.	190
Figura 304. Velocidades del agujero 3 con altura 3.	191
Figura 305. Velocidades del agujero 3 con altura 4.	191
Figura 306. Velocidades del agujero 3 con altura 5.	192
Figura 307. Velocidades del agujero 3 con altura 6.	192
Figura 308. Velocidades del agujero 4 con altura 1.	193
Figura 309. Velocidades del agujero 4 con altura 2.	193
Figura 310. Velocidades del agujero 4 con altura 3.	194
Figura 311. Velocidades del agujero 4 con altura 4.	194
Figura 312. Velocidades del agujero 4 con altura 5.	195
Figura 313. Velocidades del agujero 4 con altura 6.	195
Figura 314. Velocidades del agujero 5 con altura 1.	196
Figura 315. Velocidades del agujero 5 con altura 2.	196
Figura 316. Velocidades del agujero 5 con altura 3.	197
Figura 317. Velocidades del agujero 5 con altura 4.	197
Figura 318. Velocidades del agujero 5 con altura 5.	198
Figura 319. Velocidades del agujero 5 con altura 6.	198
Figura 320. Velocidades del agujero 6 con altura 1.	199
Figura 321. Velocidades del agujero 6 con altura 2.	199
Figura 322. Velocidades del agujero 6 con altura 3.	200
Figura 323. Velocidades del agujero 6 con altura 4.	200
Figura 324. Velocidades del agujero 6 con altura 5.	201
Figura 325. Velocidades del agujero 6 con altura 6.	201
Figura 326. Velocidades del agujero 7 con altura 1.	202
Figura 327. Velocidades del agujero 7 con altura 2.	202
Figura 328. Velocidades del agujero 7 con altura 3.	203

Índice de tablas.

Tabla 1. Tipos de túnel de viento según número de Mach. (9), (10)	18
Tabla 2. Comparación de mallas para la configuración de la simulación.	76
Tabla 3. Comparación de las mallas de la simulación 3D.....	84
Tabla 4. Comparación de las mallas de las simulaciones 2D del túnel completo.....	93
Tabla 5. Valores máximos y mínimos medidos con anemómetro de hilo caliente.....	126
Tabla 6. Resultados de calibración con anemómetro de hilo caliente.....	126
Tabla 7. Resultados de calibración con tubo de Pitot.	130
Tabla 8. Errores relativos para las frecuencias medidas.....	133
Tabla 9. Matriz de velocidades medias.....	138
Tabla 10. Matriz de intensidades turbulentas.	138

1. Introducción.

1.1. Resumen/Abstract.

Resumen:

El objetivo del presente trabajo es llevar a cabo el diseño y la construcción de un túnel de viento abierto de pequeño tamaño para ser utilizado en estudios aerodinámicos de diferente tipo que se realizan en el Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Jaén. Aunque ya existe un túnel de viento en el laboratorio de Mecánica de Fluidos, hay una necesidad reciente de disponer de uno adicional que permita realizar estudios de menor envergadura, más enfocados en la docencia y la realización de Trabajos de Fin de Grado y Máster.

Para llevar a cabo este trabajo, en primer lugar se realiza un estudio bibliográfico acerca de las principales características de diseño de los túneles de viento, sus diferentes tipos y usos.

Posteriormente, se analizan sus componentes más importantes y se dimensionan usando modelos de la literatura, especialmente la tobera. Se tienen en cuenta para este primer paso las dimensiones requeridas de la zona de medida y el espacio disponible en el laboratorio, entre otros parámetros.

Además, se realizan simulaciones numéricas para poder escoger el diseño más adecuado y predecir, de forma cualitativa, su comportamiento antes de la correspondiente fabricación. Para ello se han hecho simulaciones utilizando el software Ansys Fluent en dos dimensiones (2D) para el túnel completo y elementos en particular, y en tres dimensiones (3D) para la tobera, el componente de mayor interés.

A continuación se realiza una provisión de materiales, se seleccionan los más convenientes y se deciden los métodos de fabricación más adecuados. Se procede así a la construcción del túnel de viento mediante materiales como PVC y metacrilato junto con la elaboración del presupuesto del proyecto.

Finalmente, una vez construido, se realizan ensayos con el objetivo de obtener una calibración y caracterización preliminar del túnel con la finalidad de conocer las condiciones reales de funcionamiento.

Abstract:

The main aim of this project is to develop the design and manufacturing of an open wind tunnel of small size that will be used for aerodynamic studies of different types that are done in the Fluid Mechanics Department of the University of Jaen. Despite the fact that there is a wind tunnel in the Fluid Mechanics laboratory already, it is necessary to have a new one which helps to perform some smaller studies, such as those related to teaching activities or developing Bachelor/Master theses.

Firstly, a bibliographic study about the main features of the design of wind tunnels, their different types and uses is done in order to do this job.

Then, it is important to analyze the main parts of a wind tunnel and dimensionize them by using models from bibliography, specially with the nozzle. The dimensions of the measurements zone and the space available in the laboratory among other parameters are taken into account.

Besides, some numerical simulations are prepared to choose the most suitable design and predict its behaviour qualitatively before the fabrication. The software used is Ansys Fluent in two dimensions (2D) for the complete tunnel and some elements in particular and in three dimensions (3D) for the nozzle, the most important component.

Moreover, the materials are chosen and ordered, deciding the best way to fabricate the tunnel. PVC and methacrylate are used to make it up. A budget to know the price of the project is done as well.

Finally, measurements and tests are conducted to calibrate the tunnel and to obtain a first characterization of the real working conditions.

1.2. Motivación, justificación y objetivos del trabajo.

En el laboratorio de Mecánica de Fluidos existe un túnel de viento cerrado de gran tamaño que es útil para aplicaciones de investigación concretas. Sin embargo, recientemente se han acometido ciertas actuaciones para poder llevar a cabo estudios aerodinámicos de alta precisión y muy específicos, lo cual dificulta su uso para análisis más sencillos. Por ello, ha surgido la necesidad de disponer de un túnel de viento adicional más versátil que permita su uso para estudios aerodinámicos más genéricos, sencillos y que no requieran tanto control. Por ejemplo, se podrían llevar a cabo prácticas docentes de las asignaturas del área y la realización de estudios para Trabajos de Fin de Grado y Fin de Máster.



Figura 1. Túnel de viento cerrado de la Universidad de Jaén.

Por tanto, el objetivo final es la construcción de un túnel de viento de menor tamaño que el actual y de diseño abierto. Sus dimensiones son otra ventaja, teniendo un total de entorno a 3 metros de largo (mucho menor que el ya existente y por tanto más versátil). También se quiere diseñar de tal forma que permita separar sus partes, que no se puede hacer en el túnel ya existente, y con una bancada móvil, facilitando así su transporte y almacenamiento, habilitando la posibilidad de realizar ensayos con él en distintos lugares. Esto último es crucial dada la limitación de espacio en el laboratorio de Mecánica de Fluidos A3-003.

Es por ello que un nuevo túnel de viento de menor envergadura habilita a la Universidad de Jaén a desarrollar nuevos estudios docentes e investigadores y ampliar algunos ya existentes. También cabe la posibilidad de incluirlo en actividad docente o formativa en el futuro.

Por tanto, los principales objetivos en este trabajo son:

- Diseño de la geometría del túnel de viento en 2D y en 3D mediante software como Catia V5, SolidWorks o Autocad que permiten importación al módulo Meshing de Ansys Fluent.
- Mallado de las geometrías anteriores y simulación numérica para analizar el comportamiento del aire a la salida de la tobera del túnel de viento tanto en 2D como en 3D y el análisis del túnel completo en 2D.
- Selección y compra de elementos y materiales, procurando minimizar costes.
- Selección de los métodos de fabricación más adecuados.
- Construcción del túnel de viento con los materiales seleccionados.
- Realización de medidas para la calibración del túnel y la caracterización inicial de las condiciones reales de funcionamiento.

1.3. Aspectos generales de un túnel de viento.

El túnel de viento es un elemento de cierto interés para el análisis de la interacción del aire con objetos sólidos a distintas velocidades. Es importante estudiarlo debido a la amplia gama de utilidades que tiene a día de hoy (1):

- Industria aeronáutica. Para analizar los materiales de los que se componen los aviones y su adecuada sustentación. (2).
- Industria automovilística. Análisis de la resistencia de los modelos de carrocería al viento en busca de perfiles más aerodinámicos con intención de reducir el consumo de los vehículos, especialmente a larga distancia. (3).
- Vehículos de competición. Similar al anterior, pero con búsqueda de un aumento considerable de velocidad. (3).

- Entrenamiento deportivo. Algunos atletas se someten a entrenamientos en túneles de viento para considerar la fatiga generada por el viento en los mismos (ciclistas, maratonianos...). (4).
- Energía renovable. Es posible utilizarlos para comprobar la aerodinámica de los perfiles de las aspas de los aerogeneradores para que proporcionen la máxima energía posible, además de comprobar su resistencia y estabilidad. (5).
- Arquitectura. Estudio estabilidad y resistencia en modelos semejantes a las grandes construcciones de menor tamaño en relación a los efectos causados por las acciones del viento. (6).

1.3.1. Historia.

El concepto de túnel de viento surge hace aproximadamente 150 años. Antes se optaba por otra técnica de estudio de la aerodinámica del vuelo, el análisis con el brazo giratorio mecánico desarrollado por Benjamin Robins, cuyo esquema aparece en la Figura 2. (7).

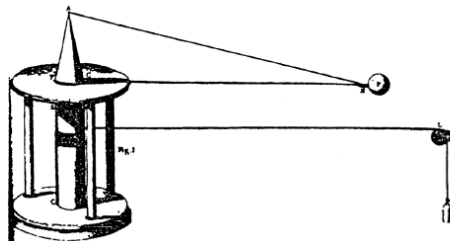


Figura 2. Brazo giratorio de Benjamin Robins. (7).

Una cuerda es envuelta alrededor de un cilindro y una masa está atada a la parte inferior. La cuerda pasa sobre una polea y el cilindro junto con el brazo giran conforme la masa cae. (7).

Sin embargo fue más adelante cuando George Cayley desarrolló el suyo propio. Él fue quien realizó los estudios sobre la fuerza de sustentación con un planeador con una envergadura de 200 pies. Cabe destacar que fue el primero en distinguir el concepto de propulsión y de sustentación. (7).

Después de todos los cambios causados por las revolucionarias ideas de Cayley, se creó finalmente el primer túnel de viento en 1871. El siguiente problema era analizar si existía semejanza entre un problema modelo a menor escala y otro grande de aviación a gran escala. (7).

Más adelante fue Osborne Reynolds quien mostró que sí es posible, se cumple siempre que el número de Reynolds fuese el mismo en ambos problemas, dando lugar a la posibilidad de estudios de pequeño tamaño para resolución de grandes problemas de aerodinámica mediante semejanza física. (7).

Finalmente surgió gracias a esto el primer vehículo motorizado volador más pesado que el aire que fue tripulado. (7).

1.3.2. Tipos de túnel de viento.

Según circulación del aire:

- Túnel de viento abierto: el aire utilizado es exterior, este circula por el interior y se devuelve al ambiente. (7).
 - Ventajas:
 - Es más sencillo y barato de construir. (7).
 - Inconvenientes:
 - El túnel deberá incluir rejillas que permitan acondicionar el flujo conforme al ensayo realizado. (3).
 - Influencia de las condiciones del aire exterior. (7).



Figura 3. Túnel de viento abierto. (1)

- Túnel de viento cerrado: el aire no es expulsado al exterior sino que es recuperado por un difusor. (7).
 - Ventajas:
 - Mayor control de la calidad del flujo. (7).
 - Se reduce notablemente el ruido generado. (7).
 - Inconvenientes:
 - Su coste es mayor. (7).
 - El diseño es más complejo. (7).
 - Es necesario instalar equipos como dispositivos de refrigeración o intercambiadores de calor cuando se trabaja con grandes problemas. (7).

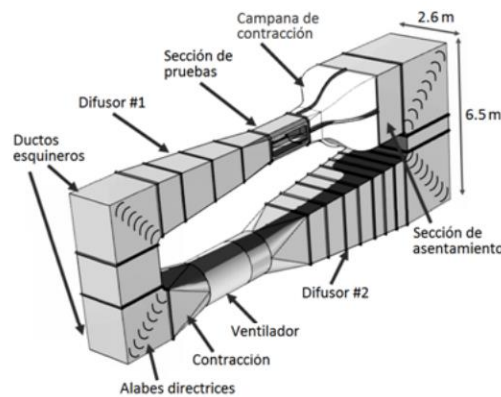


Figura 4. Túnel de viento cerrado. (8).

Según velocidad de flujo interior:

Se adjunta la siguiente tabla resumen:

Tipo de túnel de viento	Número de Mach
De baja velocidad	$M < 0,3$
Subsónico	$M < 0,7$
Transónico	$0,7 < M < 1,2$
Supersónico	$1,2 < M < 5$
Hipersónico	$M > 5$

Tabla 1. Tipos de túnel de viento según número de Mach. (9), (10)

En esta clasificación cabe destacar la existencia de ondas de choque en el caso de los flujos supersónicos que generan un gran aumento en la presión del fluido y una caída en su velocidad. Este fenómeno físico dificulta notablemente el estudio del problema. (10).

En los túneles de viento subsónicos existen un par de ventajas considerables como son la facilidad en la construcción en comparación con los supersónicos junto con sus pequeños valores de pérdida de carga. (10).

El túnel que se realizará en este trabajo es un túnel abierto (que tomará aire del exterior con ayuda de un ventilador) y de baja velocidad (trabaja con velocidades de entorno a 10-15 m/s en la zona de ensayo).

1.3.3. Componentes generales de un túnel de viento y su diseño.

Entrada.

Es la zona inicial del túnel (en caso de ser abierto) (1). Puede ser de varios tipos, aunque lo normal es que tenga una sección cuadrada con adaptadores alrededor que facilitan la succión del aire al túnel al disminuir las pérdidas de carga por efecto de arista viva en su interior. También debe tener rejillas u otros elementos filtradores para poder acondicionar el flujo a la entrada de la tobera, como se explica a continuación. (8).

Elementos acondicionadores de flujo.

Son objetos compuestos por la combinación de elementos unidos que tienen un patrón repetitivo. Pueden ser utilizados para acondicionar el flujo de aire exterior de la forma deseada y disminuir la intensidad turbulenta (8), (11), (12). En concreto, se desea que a la entrada de la tobera la velocidad sea lo más axial posible. Para conseguir esto, los elementos más comunes son los *honeycomb* (características por su patrón hexagonal en forma de panal de abeja) con un cierto espesor para dirigir el flujo. Además, para romper las posibles turbulencias, se suelen usar rejillas de malla rectangular a la salida del *honeycomb* (11), (12).

Se muestra a continuación una imagen de ambos:

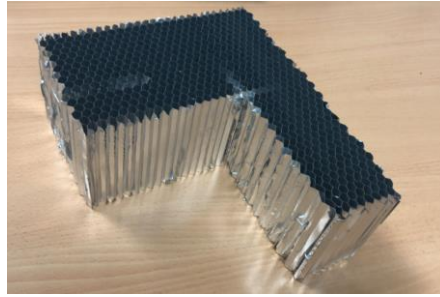


Figura 5. Rejilla *honeycomb*.



Figura 6. Rejilla de malla rectangular.

Adicionalmente, se pueden incorporar mallas de diferentes patrones y tamaños para cambiar la intensidad turbulenta en la zona de medida.

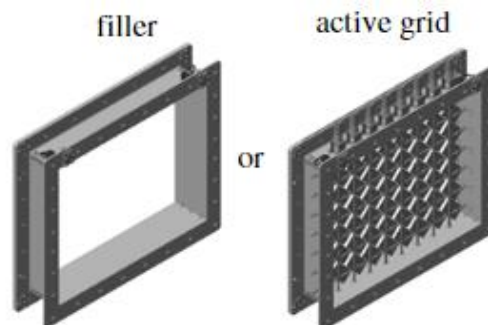


Figura 7. Tipos de rejillas. (11)

Contracción.

Es la parte en la que se reduce la sección del túnel con el objetivo de aumentar la velocidad del aire (o el número de Reynolds), reduciendo el espesor de la capa límite, y por tanto, uniformizando el flujo. (1).

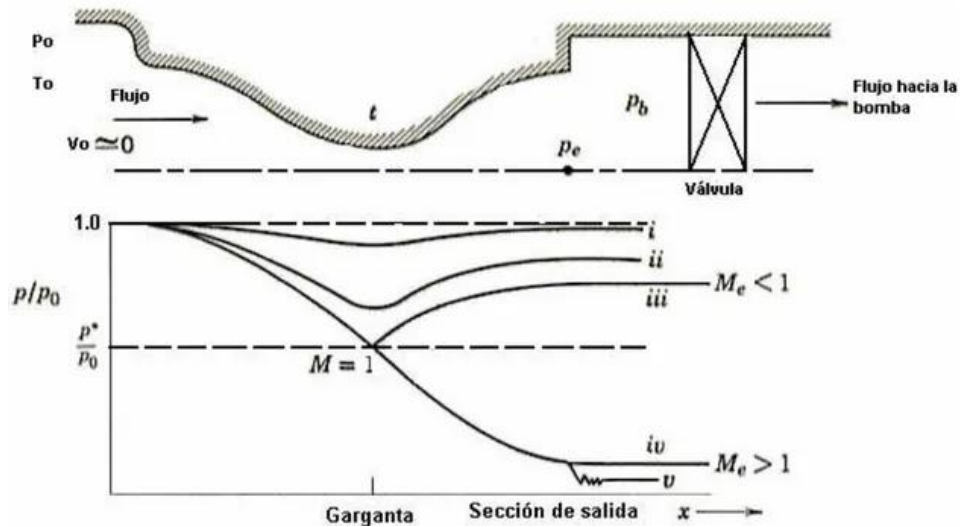


Figura 8. Esquema de una tobera. (13)

Se caracteriza por tener requerimientos de importancia en su diseño debido a la necesidad de la obtención de un flujo uniforme a la salida de la misma. Se suelen aplicar toberas con curvas complejas que se han determinado con anterioridad. (12), (14).

El método más utilizado para este problema es la interpolación polinómica, en la que se usan como datos de entrada la altura de la entrada y de la salida de la tobera junto con su longitud creando así un polinomio de coeficientes desconocidos (de grado a elegir) y se imponen unas condiciones de contorno para dicha función que impliquen que (12):

- El punto inicial debe tomar un valor igual a la altura inicial. (12), (15).
- El punto final debe tomar un valor igual a la altura final. (12), (15).
- Exista una condición de tangencia horizontal a la curva a la entrada y a la salida del túnel (para que ambas sean suaves y favorezcan la uniformidad del flujo), es decir, anular la primera derivada de la función en ambos puntos. (12), (15).

- Si todas las condiciones de contorno no están creadas pueden anularse las derivadas de orden superior a la entrada y a la salida. (12), (15).
- Se resuelve el sistema de ecuaciones compatible determinado para obtener los coeficientes del polinomio. (12), (15).

Este procedimiento puede aplicarse también para un polinomio lineal, que es el caso más sencillo tanto en diseño como en fabricación, pero al no generarse una curva durante la reducción de sección, es posible que no se genere un flujo tan uniforme a la salida de la tobera como podría darse utilizando una función más compleja, o que las pérdidas de carga en este elemento sean mayores. (16).

Otra forma de diseñar este elemento consiste en utilizar un procedimiento similar al anterior pero con dos funciones polinómicas que se unen. Para aplicar este método suelen usarse polinomios de grado 3 en ambas partes de la contracción, aunque pueden ser de grado superior (12). Se crean funciones polinómicas con coeficientes desconocidos y se imponen las condiciones de contorno mencionadas anteriormente. Aunque de forma adicional, la función a trozos debe cumplir con continuidad y derivabilidad en todo su dominio (la longitud de la tobera) (12). Para ello, en el punto de unión la función y su derivada debe tomar el mismo valor en ambas partes. Este punto que ejerce de nexo puede moverse a lo largo del eje horizontal para optimizar el diseño lo máximo posible, generando una variable más que puede modificarse y no existe en el caso anterior. (12).

Cabe destacar que existen algunos modelos matemáticos en los que conociendo la altura de la entrada y la salida de la contracción y su longitud, es posible determinar rápidamente una función que tenga un buen ajuste. Sin embargo, es importante analizar mediante simulaciones numéricas o experimentos reales la calidad de estas aproximaciones. (15).

En caso de necesitar una tobera convergente-divergente, se aplica el Método de las Características (MOC) para evitar la formación de ondas de choque que reducen notablemente la velocidad del flujo y generan un aumento de presión (10). Se conocen como características a las líneas orientadas según las perturbaciones del flujo supersónico. El método ajusta el ángulo del flujo aplicando la teoría de la

expansión de Prandtl-Meyer con intención de generar todas las líneas características, cuyos extremos definen la curva divergente de la tobera. (10).

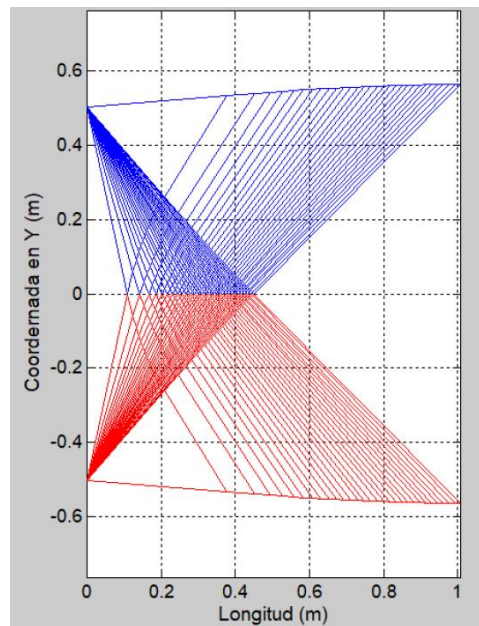


Figura 9. Método de las líneas características. (10)

Zona de medida.

Se caracteriza por ser de sección cuadrada o rectangular para facilitar la colocación de los materiales a ensayar, así como para evitar distorsiones ópticas (10). Además, debe hacerse transparente, para permitir la visualización de su interior. Debe ser una zona accesible por los usuarios del túnel mediante compuertas o elementos similares para poder introducir o extraer lo que se necesite. Suele ser el elemento de mayor longitud de los túneles para poder ajustar la colocación del ensayo de forma que no exista influencia de la corriente de aire de la contracción ni del posterior difusor y el subsecuente ventilador, dejando la distancia necesaria con respecto a estas partes. (1).

Difusor.

Es la parte posterior a la cámara de ensayo y su principal función es conseguir un aumento de sección en el túnel que genera un incremento de presión en el mismo junto con una reducción de su velocidad (1), (14). Los difusores pueden generar vibraciones con el paso de flujo de aire a través de ellos además de influir al flujo de la cámara de ensayo si su diseño no es el adecuado. Pueden generar desprendimiento de la capa límite, lo cual es perjudicial por el gran aumento de pérdida de carga que generaría. (17).

Suele ser de forma cúbica, rectangular y cónica, con mayor pérdida conforme se aumente el ángulo de amplitud. Existe la posibilidad de que se tenga que diseñar para que tenga un cambio entre estas geometrías anteriores, lo cual será uno de los problemas a resolver explicado más adelante.

Ventilador.

Elemento que produce la corriente de aire en el interior del túnel. Se utiliza uno de tipo axial, que se caracteriza por la trayectoria paralela al eje del mismo que sigue el aire (18). Existen muchos parámetros de interés para realizar un buen dimensionado del mismo: el diámetro (que afecta notablemente al caudal de aire debido a que este aumenta de forma cúbica con esta magnitud, además de que su tamaño es importante para facilitar su transporte si es necesario o para encajarlo correctamente al resto de elementos del túnel), la velocidad de giro (que genera un aumento del caudal si este aumenta) (18). De igual manera es importante considerar las propiedades de los álabes, debido a que su ángulo es fundamental para determinar la estabilidad del flujo y lograr un aumento o disminución del caudal debido a su relación lineal con este. El número de álabes no determina unas mejores condiciones de trabajo pero sí permite un rango mayor de valores de caudal y presión para utilizar (18).

La curva característica de un ventilador axial tiene la forma que se muestra en la siguiente figura:

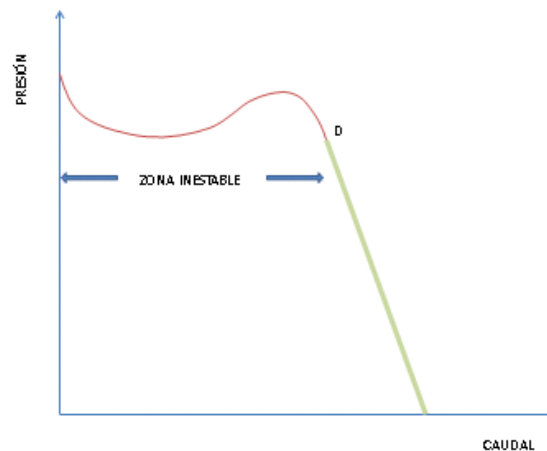


Figura 10. Curva Presión-Caudal de un ventilador axial. (18)

El diseño debe ser adecuado para evitar la zona inestable, en la que es difícil predecir el comportamiento del problema que se quiere analizar. Por ello, el ventilador elegido deberá tener los valores adecuados de presión y caudal en la zona verde de la figura anterior, debido a que un sobredimensionado puede causar daños en el túnel o por el contrario, si el ventilador está minimizado, puede ser que no se alcance la velocidad deseada. (18).

1.4. Mecánica de Fluidos Computacional.

1.4.1. Generalidades.

La Mecánica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) es una de las técnicas usadas en la Mecánica de Fluidos para atajar problemas complejos en los que las ecuaciones de Navier-Stokes no tienen solución analítica. En este caso, las ecuaciones se resuelven numéricamente, obteniendo soluciones aproximadas de las mismas. (19).

Para ello, el problema tiene que ser discretizado espacial y temporalmente. Puede aplicarse el método de diferencias finitas, que tiene dos procedimientos principales: el explícito, que se caracteriza por el análisis de cada término de las ecuaciones en el instante de tiempo conocido, pero teniendo como principal

desventaja que son condicionalmente estables (requiere de un rango de paso de tiempo específico para que la discretización converja en una buena solución numérica) y el implícito (analiza el instante posterior al conocido), que es incondicionalmente estable pero requiere de una mayor cantidad de recursos computacionales debido a que se necesita resolver un sistema de ecuaciones y realizar operaciones complejas como la inversa de su matriz de coeficientes, lo que significa un mayor consumo de memoria RAM en el ordenador. Otros métodos comunes son Crank-Nicholson, Richardson y Dufort-Frankel, que son combinaciones de los casos explícito e implícito. Aplicando estos algoritmos es posible conseguir los métodos *Upwind* de primer orden, que capturan discontinuidades y tienen positividad (ofrece una solución acotada entre un valor máximo y uno mínimo) y *Upwind* de segundo orden, que tienen un mayor orden de consistencia y también capturan discontinuidades, pero convergen de forma más lenta. (19).

También se puede utilizar el método de volúmenes finitos, que permite la discretización de superficies y volúmenes con diferentes geometrías (triangular, rectangular, hexagonal, etc). En este caso puede aplicarse el método explícito (no recomendado para términos difusivos para su limitación de paso de tiempo) e implícito con las mismas consideraciones explicadas anteriormente. Para realizar la discretización existen métodos como la interpolación lineal, que es de segundo orden de consistencia y captura discontinuidades aunque es dispersivo (no ofrece valores acotados), o el método *Upwind* de primer orden de consistencia que preserva la acotación de las variables y captura discontinuidades a pesar de ser difusivo (suaviza las discontinuidades) y tiene menor consistencia que la interpolación lineal. (19).

En este trabajo, se va a usar el software comercial ANSYS FLUENT, que trabaja con el método de discretización espacial de **volúmenes finitos**, con diferentes algoritmos que permiten la solución numérica aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes:

- Aplicación de métodos explícitos o implícitos para el análisis de problemas en estado transitorio (con existencia de variación temporal). (20), (21), (19).

- Resolución del problema de turbulencia con DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation), RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). (22), (21), (19).
- Pueden utilizarse hipótesis como la de Boussinesq, en caso de que no se resuelva la turbulencia hasta la escala de Kolmogorov. (22), (21), (19).
- Métodos como PISO o SIMPLE para aproximación de la resolución de las ecuaciones junto con los métodos acoplados basados en densidad (Density-Based) tales como FDM o FVM. (20), (21), (19).

1.4.2. Ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Navier Stokes son un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que definen completamente el movimiento de los fluidos newtonianos (19). Las ecuaciones se agrupan en tres grupos fundamentales:

Conservación de la masa. (19)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad, v es la velocidad y ∇ es el operador nabla o divergencia.

Es una ecuación escalar en derivadas parciales de primer orden en tiempo y en espacio, por lo que requiere de una única condición de contorno en ambas variables. Esta expresión matemática indica que la variación local de la masa por unidad de volumen más el flujo convectivo por unidad de volumen es nulo.

Existe una variante de esta ecuación llamada no conservativa en la que se introduce la derivada sustancial:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{v} \quad (2)$$

Tomando la suposición de líquido perfecto (densidad constante, viscosidad constante y difusividad térmica constante), la ecuación toma la siguiente forma:

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (3)$$

En este caso la divergencia de la velocidad para con fluido perfecto es nula según el principio de conservación de la masa.

Conservación de la cantidad de movimiento. (19)

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \rho \vec{f}_m + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (4)$$

La variación local de cantidad de movimiento por unidad de volumen más el flujo convectivo de cantidad de movimiento por unidad de volumen es igual a las fuerzas volumétricas más las fuerzas de superficie por unidad de volumen. τ es el tensor de esfuerzos viscosos y f_m es un vector que incluye los valores de gravedad, aceleración lineal y de coriolis en caso de haberlos.

En formato no conservativo:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{f}_m + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (5)$$

Considerando el caso de líquido perfecto:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{f}_m - \nabla \left(\frac{P}{\rho} \right) + \nu \nabla^2 \vec{v} \quad (6)$$

Donde ∇^2 es el operador laplaciana.

Conservación de la energía. (19)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{|\vec{v}|^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{|\vec{v}|^2}{2} \right) \cdot \vec{v} \right] = \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \vec{\tau}) + \rho \vec{v} \cdot \vec{f}_m - \nabla \cdot \vec{q} + Q_r \quad (7)$$

Donde e es la energía interna.

La variación local de energía por unidad de volumen más el flujo convectivo de esta por unidad de volumen es igual al trabajo de fuerzas de presión y viscosas por unidad de volumen y tiempo más el trabajo de las fuerzas másicas por unidad de volumen y tiempo más el flujo difusivo o molecular de energía calorífica por unidad de volumen más la generación de calor por reacciones químicas o radiación.

En formato no conservativo:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{|\vec{v}|^2}{2} \right) = -\nabla \cdot (P\vec{v}) + \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \vec{\tau}) + \rho \vec{v} \cdot \vec{f}_m - \nabla \cdot \vec{q} + Q_r \quad (8)$$

Donde τ' es la desviación del tensor de esfuerzos respecto de la presión.

Y para el caso específico de líquido perfecto:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_v \vec{v} \cdot \nabla T = -P \nabla \cdot \vec{v} + \bar{\bar{\tau}} : \nabla \vec{v} - \nabla \cdot \vec{q} + Q_r \quad (9)$$

Donde T es la temperatura y c_v el calor específico del fluido a volumen constante.

1.4.3. Condiciones de contorno.

Para poder resolver las ecuaciones es necesario introducir las condiciones de contorno. Su elección es crucial a la hora de obtener resultados realistas en las simulaciones numéricas (23). Existe una amplia variedad de tipos:

- Pressure Inlet/Outlet: permite introducir los valores de presión a la entrada y a la salida. (23).
- Velocity Inlet: permite introducir la velocidad a la entrada. (23).
- Outflow: condición de contorno que no requiere de valor de presión o de velocidad, extrapola el valor de salida con los datos interiores (no recomendado). (23).
- Mass Flow Inlet: permite introducir el valor del flujo másico a la entrada. (23).
- Pressure Far Field: permite modelar una condición de corriente libre en el infinito. (23).
- Wall: define condición de no deslizamiento en el contorno (que pasa a ser considerado como pared). Pueden aplicarse tensiones cortantes en ella también. (23).
- Symmetry: aplica simetría con respecto al contorno seleccionado. (23).
- Axis: utilizado en la línea central de un problema axisimétrico. (23).
- Intake/Exhaust Fan: marca la existencia de un ventilador a la entrada o a la salida del problema (pudiendo indicar sus características). (23).
- Interior: determina como zona interior el contorno seleccionado con esta opción (23).
- Porous Jump: indica la existencia de zona porosa (pudiendo seleccionar sus características) tales como rejillas o filtros. (23).

En las simulaciones del túnel de viento se aplicarán varias de las condiciones de contorno anteriores, indicando la variedad de opciones que permiten.

1.4.4. *Discretización del dominio computacional: Malla computacional.*

El paso previo al realizar la simulación numérica es discretizar el dominio, generando así la malla computacional en cuyos nodos se resolverán numéricamente las ecuaciones (21). Existen distintos tipos:

- **Mallado estructurado:** es la discretización que sigue un patrón reticular, un orden claramente definido e identificable a simple vista. No se adaptan a geometrías demasiado complejas y suelen dar lugar a mayor convergencia. (21).

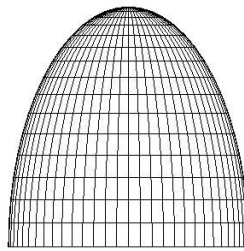


Figura 11. Mallado estructurado. (24)

- **Mallado no estructurado:** la conectividad no es trivial, por lo que es necesario determinar la información de las conexiones entre celdas y almacenarla (consumiendo mayores recursos computacionales). Se adapta a geometrías más complejas. (21).

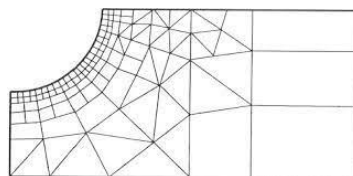


Figura 12. Mallado no estructurado. (25)

- Mallas híbridas: resultante de la combinación entre los dos casos anteriores. Pueden ser conformes si las caras y nodos entre celdas a ambos lados de la interfaz coinciden o no conformes si no se cumple. (21).

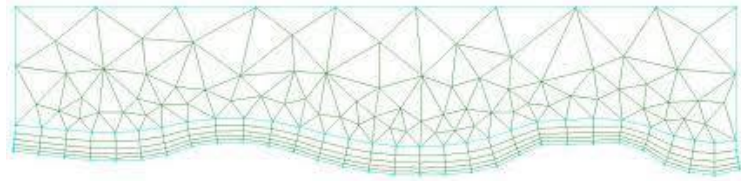


Figura 13. Malla híbrida. (26)

- Mallas móviles: son casos concretos en los que el problema requiere de algún movimiento particular y la malla puede girar o desplazarse para aproximar la solución de forma adecuada. (21).

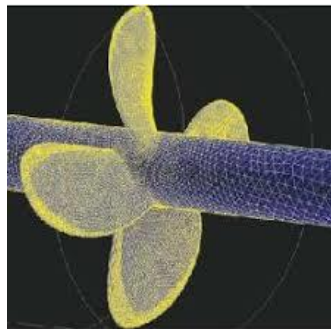


Figura 14. Malla móvil. (27)

Antes de realizar una simulación numérica es importante comprobar la calidad de la malla, para ello se pueden tomar algunas precauciones como no variar de forma muy brusca su tamaño o evitar su alargamiento y deformación. Otras consideraciones importantes son mantener la malla fina en las proximidades de la capa límite y mantener la orientación de las mismas conforme a la dirección del flujo. (21).

1.4.5. *Métodos numéricos.*

Ansys Fluent tiene dos tipos de *solvers* o solucionadores el primero de ellos es el Pressure-based, que obtiene la velocidad de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, después se aplica una corrección para favorecer la conservación de la masa. Posteriormente la ecuación de la conservación de la energía se resuelve secuencialmente junto con algunas ecuaciones escalares adicionales. (20).

Por otro lado, el Density-based resuelve de forma simultánea las ecuaciones de continuidad, conservación de cantidad de movimiento y energía junto con las ecuaciones de transporte que sean requeridas. Pueden aplicarse en forma explícita o implícita. (20).

El modelo Pressure-based tiene cinco algoritmos disponibles:

- SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations): es un método robusto, con un menor consumo de memoria. (20).
- Coupled: tiene una convergencia más rápida. (20).
- SIMPLEC (SIMPLE-Consistent): tiene una convergencia más rápida que SIMPLE (permitiendo factores de relajación mayores). (20).
- PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators): útil para problemas de flujo transitorio o para mallas con falta de simetría. (20).
- FSM (Fractional Step Method): solamente se usa para flujos transitorios, normalmente utilizado con el esquema NITA. Tiene propiedades similares a las de PISO. (20).

Cabe destacar la importancia de los factores de subrelajación, que permiten estabilizar el proceso iterativo para los solucionadores basados en presión. La solución final es independiente del factor de subrelajación, mientras que sí lo es el número de iteraciones aplicadas. (20).

Respecto a la interpolación de la solución entre los diferentes nodos, los esquemas principales para la interpolación son:

- First-Order Upwind: método con buena convergencia de primer orden de consistencia. (20).
- Power Law: Más preciso que el anterior para valores del número de Reynolds menores que 5. (20).
- Second-Order Upwind: es de segundo orden de consistencia a pesar de tener una convergencia más lenta. (20).
- QUICK (Quadratic Upwind Interpolation): es práctico para mallas cuadradas, hexagonales e híbridas, también para flujo rotatorio o con torbellinos. (20).

Es necesario el uso de gradientes para realizar una buena interpolación, existen tres aproximaciones:

- Green-Gauss Cell-Based: es bueno pero difusivo. (20).
- Green-Gauss Node-Based: más preciso que el anterior debido a que elimina la difusión. (20).
- Least-Squares Cell-Based: método por defecto. Es el más barato y tiene la ventaja de adaptarse con facilidad a cualquier tipo de malla. (20).

Para la presión, los métodos de interpolación son los siguientes:

- Standard: aparece por defecto, tiene menor precisión para flujos con grandes gradientes de presión cerca de los contornos del problema. (20).
- PRESTO!: utilizado para flujos con remolinos y problemas con elementos porosos que generen pérdida de presión (rejillas y similares). (20).
- Linear: práctico cuando existan problemas de convergencia. (20).
- Second Order: para flujos compresibles sin pérdidas de carga secundarias. (20).
- Body Force Weighted: para problemas con grandes fuerzas. (20).

El *solver* Density-Based es más práctico cuando existe una fuerte independencia entre la densidad, energía o cantidad de movimiento entre otras. (20). Existen dos formatos de Coupled principales:

- Density-Based Coupled Implicit: es preferido frente al método explícito debido a que no existe un límite por rango de paso de tiempo (limitación de CFL). Se utiliza habitualmente para flujos compresibles a gran velocidad con combustión o para flujos hipersónicos. (20).
- Density-based Coupled Explicit: es útil cuando la limitación de paso de tiempo es del mismo orden que la duración del problema, como casos de ondas de choque. (20).

Para configurar el paso de tiempo se utiliza el número de Courant (CFL), que está limitado a valores menores que 2 para el *solver* explícito y no tiene límites en el implícito. (20).

Antes de realizar una simulación numérica es importante inicializarla a unos valores iniciales. Ansys Fluent ofrece cuatro formas de hacerlo:

- Standard initialization: permite utilizar una condición de contorno como condición inicial. (20).
- Patch values: útil para casos con grandes velocidades o con combustión. (20).
- Hybrid initialization: método por defecto que resuelve la ecuación de Laplace para determinar la presión y la velocidad. También abarca otras variables como la temperatura o la turbulencia. (20).
- FMG (Full MultiGrid) initialization: para problemas complejos con grandes diferencias de presión y velocidad. Utiliza el “Full Aproximation Storage” (FAS) para resolver cada caso por secuencias dependiendo de la forma de la malla. (20).

También existe la posibilidad de utilizar el resultado de una simulación numérica anterior como condición inicial. Este método tiene como ventaja la facilidad para resolver problemas de gran complejidad pero requiere de gran cantidad de recursos computacionales y tiempo debido a la gran cantidad de operaciones que debe realizar el ordenador. (20).

1.4.6. Convergencia de simulaciones numéricas.

La convergencia de una simulación numérica ocurre cuando el error entre una iteración y la anterior es muy pequeño. Para ello se representan los residuales, que son los indicadores de este error y debe tomar un valor muy pequeño para las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía. Si esto ocurre los balances de estas variables se conseguirán (20). Se muestra a continuación una imagen de los residuales de una simulación:

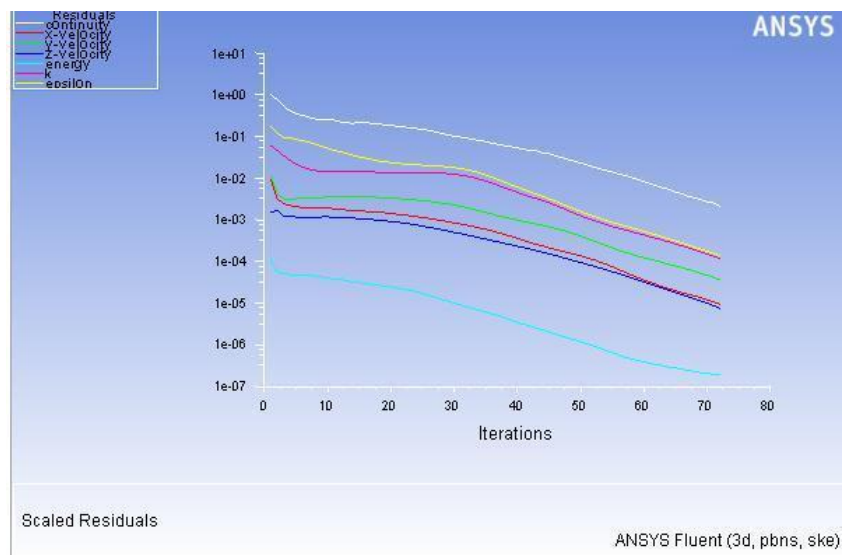


Figura 15. Residuales de una simulación numérica.

Normalmente se puede afirmar que una simulación converge cuando sus residuales se reducen en tres órdenes de magnitud, los residuales de energía caen por debajo de 10^{-6} y los *species residuals* por debajo de 10^{-5} . Otro buen indicador de convergencia es asegurar que se cumple la conservación de masa, calor, etc. (20).

Cuando una simulación numérica no converge, los residuales no disminuyen, sino que se mantienen constantes o aumentan:

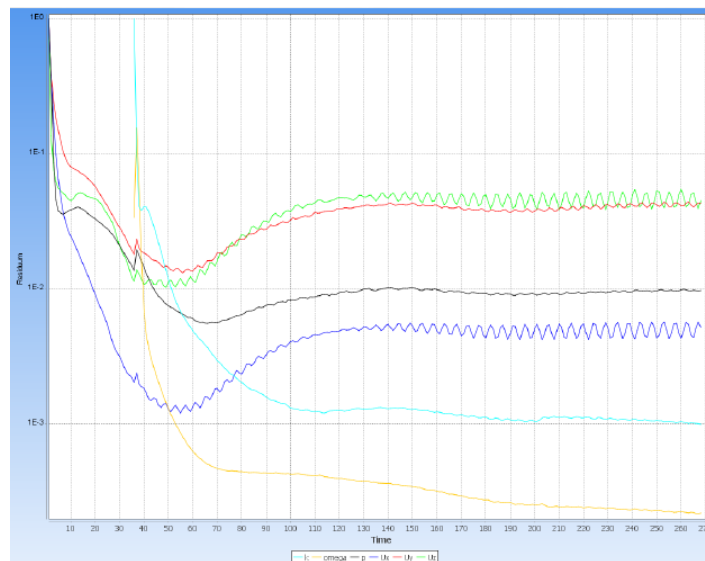


Figura 16. Residuales de una simulación numérica sin converger

Para favorecer la convergencia es importante utilizar una buena condición inicial, realizar cambios en el número de Courant y en los factores de subrelajación (valores muy grandes de estos pueden generar inestabilidad y problemas de convergencia a la simulación) y comprobar la calidad de la malla antes de iterar (una malla inadecuada impedirá la disminución del error). (20).

1.4.7. Modelos de turbulencia.

El software Ansys Fluent permite realizar simulaciones laminares, es decir, despreciando los términos viscosos. Por otro lado, también incorpora una serie de modelos de turbulencia para poder simular condiciones turbulentas (22). Para determinar la turbulencia del problema de forma adecuada es necesario conocer el número de Reynolds en el problema:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (10)$$

Donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), U es la velocidad (m/s), L es la longitud característica (m) y μ es la viscosidad dinámica (kg/ms).

Un flujo turbulento por norma general es transitorio, tridimensional, irregular, con fluctuaciones en espacio y tiempo e impredecible. La energía se transmite desde la escala más larga hasta la escala de Kolmogorov. (22).

Existen diferentes aproximaciones a la turbulencia:

- DNS (Direct Numerical Simulation): resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier Stokes en estado transitorio con el espectro completo de escalas, sin embargo es muy caro y no es práctico para aplicaciones industriales. (22).
- LES (Large Eddy Simulation): resuelve las ecuaciones N-S espaciales con facilidad para remolinos de gran tamaño, pero tiene dificultades para los remolinos de menor tamaño que la malla. Es más barato que el DNS, pero requiere de muchos recursos computacionales para ser especialmente útil industrialmente. (22).
- RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes Simulation): todas las longitudes de las escalas están moderadas y tiene varios modelos disponibles. Es adecuado para flujos industriales. (22).

Ansys Fluent dispone de los siguientes modelos:

- Spalart-Allmaras: es económico para mallas grandes, más práctico en casos 2D. Se utiliza principalmente para aplicaciones aeroespaciales. Una sola ecuación de transporte es resuelta. (22).

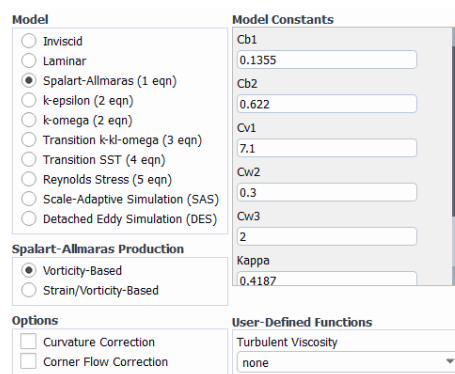


Figura 17. Modelo Spalart-Allmaras en Ansys Fluent.

- Standard k - ϵ : es adecuado para iteraciones iniciales, tiene dos ecuaciones de transporte para la resolución de k y de ϵ . Los coeficientes para este modelo suelen ser determinados de forma empírica. (22).

The screenshot shows the 'Model Setup' dialog in ANSYS Fluent. The 'Model' section on the left has 'k-epsilon (2 eqn)' selected. Below it, the 'k-epsilon Model' section has 'Standard' selected. The 'Near-Wall Treatment' section has 'Standard Wall Functions' selected. The 'Options' section has 'Curvature Correction', 'Production Kato-Launder', and 'Production Limiter' all unchecked. The 'Model Constants' section on the right shows the following values: C_{μ} = 0.033, $C1$ -Epsilon = 1.176, $C2$ -Epsilon = 1.92, TKE Prandtl Number = 1, and TDR Prandtl Number = 1.3. The 'User-Defined Functions' section is empty.

Figura 18. Modelo Standard k - ϵ en Ansys Fluent.

- Realizable k - ϵ : adecuado para flujos complejos que incluyan remolinos, vórtices y flujo transicional localizado. Es una versión mejorada del modelo Standard k - ϵ . Es recomendado para casos estándar. (22).

The screenshot shows the 'Model Setup' dialog in ANSYS Fluent. The 'Model' section on the left has 'k-epsilon (2 eqn)' selected. Below it, the 'k-epsilon Model' section has 'Realizable' selected. The 'Model Constants' section on the right shows the following values: $C2$ -Epsilon = 1.9, TKE Prandtl Number = 1, and TDR Prandtl Number = 1.2. The 'User-Defined Functions' section is empty.

Figura 19. Modelo Realizable k - ϵ en Ansys Fluent.

- RNG k- ϵ : es similar al Realizable k- ϵ , pero tiene mayores problemas de convergencia. (22).

The screenshot shows the 'Model' and 'Model Constants' panels in ANSYS Fluent. In the 'Model' panel, the 'k-epsilon (2 eqn)' option is selected. In the 'k-epsilon Model' sub-panel, the 'RNG' option is selected. The 'Model Constants' panel shows the following values: Cmu = 0.0845, C1-Epsilon = 1.42, and C2-Epsilon = 1.68.

Figura 20. Modelo RNG k- ϵ en Ansys Fluent.

- Standard k- ω : adecuado para capa límite y valores pequeños de número de Reynolds. Útil para flujo transicional. Es un modelo con dos ecuaciones de transporte para resolver k y ω . (22).

The screenshot shows the 'Model' and 'Model Constants' panels in ANSYS Fluent. In the 'Model' panel, the 'k-omega (2 eqn)' option is selected. In the 'k-omega Model' sub-panel, the 'Standard' option is selected. The 'Model Constants' panel shows the following values: Alpha*_inf = 1, Alpha_inf = 0.52, Beta*_inf = 0.09, Beta_i = 0.072, and TKE Prandtl Number = 2. The 'User-Defined Functions' panel shows 'Turbulent Viscosity' set to 'none'. The 'Prandtl Numbers' panel shows 'TKE Prandtl Number' and 'SDR Prandtl Number' both set to 'none'. The 'Options' panel shows 'Production Limiter' checked.

Figura 21. Modelo Standard k- ω en Ansys Fluent.

- SST k- ω : tiene beneficios similares a los del Standard k- ω además de combinarlos con los del modelo k- ϵ . Es recomendado para casos estándar. (22).

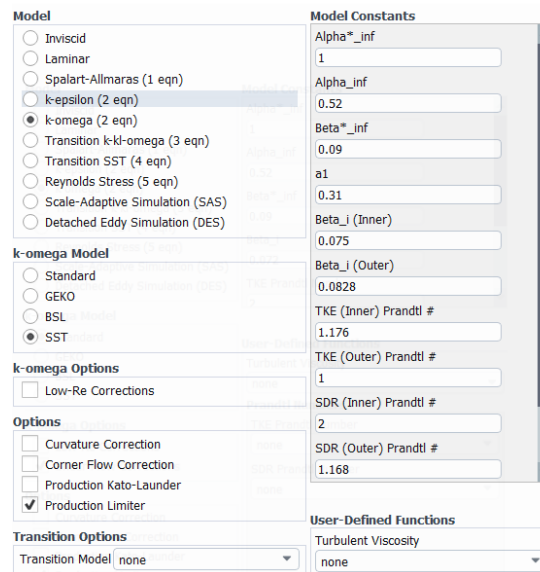


Figura 22. Modelo SST k- ω en Ansys Fluent.

1.5. Instrumentos de medición de flujo.

1.5.1. *Tubo de venturi.*

El tubo de Venturi es un instrumento de medida que permite obtener la presión diferencial asociada a un flujo. Es muy útil para realizar mediciones sobre flujos viscosos. Debe colocarse en un tramo rectilíneo de la tubería y estar alejado de elementos como válvulas o similares que condicionan el flujo y aportarían una solución irreal. (28).

Este aparato aprovecha el efecto Venturi, consistente en un aumento de velocidad conforme se reduce la sección de una tubería, disminuyendo así su presión. Esto permite producir presiones por debajo de la manométrica, generando así una aspiración de fluido por efecto de depresión. (28).

Se muestra a continuación un esquema del tubo de Venturi:

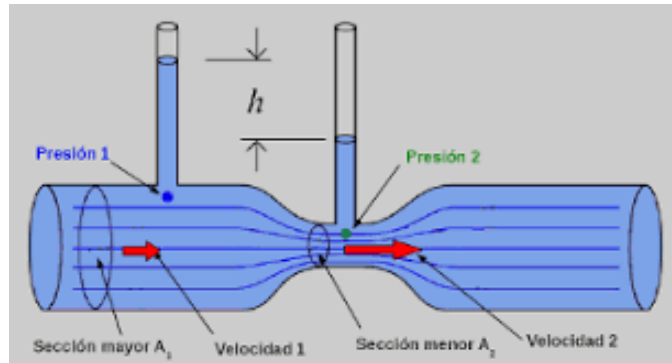


Figura 23. Esquema de tubo de Venturi. (28)

1.5.2. *Tubo de Pitot.*

Es un aparato de medida que obtiene dos tomas de presión (una estática en la punta del tubo y otra dinámica en su zona anterior) para calcular la velocidad a partir de esta información. Tiene mucha utilidad para realizar mediciones de turborreactores donde existen grandes velocidades o para ensayos de vehículos de competición como Fórmula 1 o similares. Permite medir la velocidad en un punto concreto, pero no en toda una zona. Aplicando la ecuación de conservación de energía (Bernoulli) entre las dos tomas del tubo, se puede calcular la velocidad de la siguiente manera: (7)

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{estática} - P_{dinámica})}{\rho}} \quad (11)$$

Se muestra a continuación un esquema del tubo de Pitot:

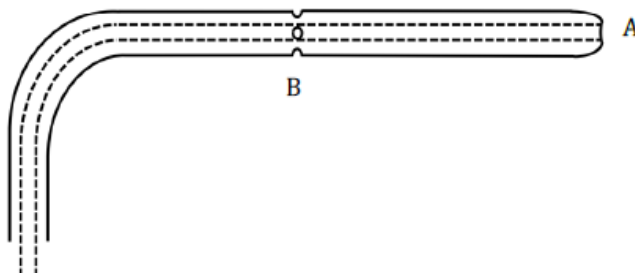


Figura 24. Esquema de tubo de Pitot. (7)

1.5.3. Anemómetro de hilo caliente.

Es un aparato de medida que posee un sensor de hilo caliente en el extremo que aprovecha la transferencia de calor por convección en el hilo. Al medir el intercambio térmico entre este y el flujo, es posible determinar el calentamiento del sensor por corriente eléctrica y su enfriado, siendo ambos proporcionales a la velocidad del fluido que incide de forma perpendicular. (29).

El esquema de un anemómetro de hilo caliente es:

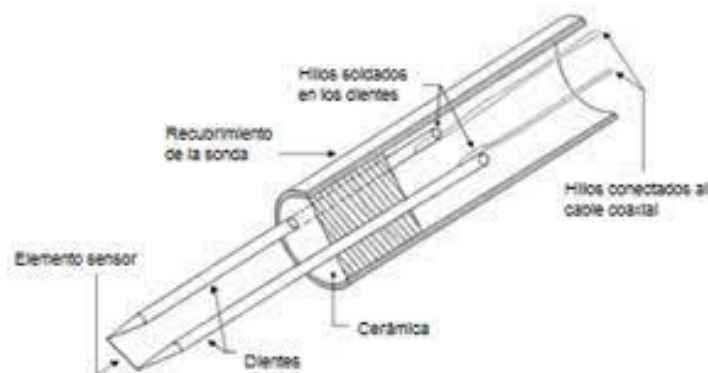


Figura 25. Esquema de anemómetro de hilo caliente. (29)

2. Descripción del túnel de viento.

El túnel de viento será abierto, es decir, absorberá aire del entorno y pasará por una zona de ensayo para ser expulsado nuevamente al exterior gracias a la acción de un ventilador.

Se desea que la cámara de medida tenga una sección cuadrada de $40 \times 40 \text{ cm}^2$ y, debido a las limitaciones de espacio, la longitud máxima del túnel debe ser de 4 m. En las figuras 26, 27 y 28 se muestran el diseño, así como las vistas de planta y perfil del mismo. El diseño se ha realizado en el software SOLIDWORKS.

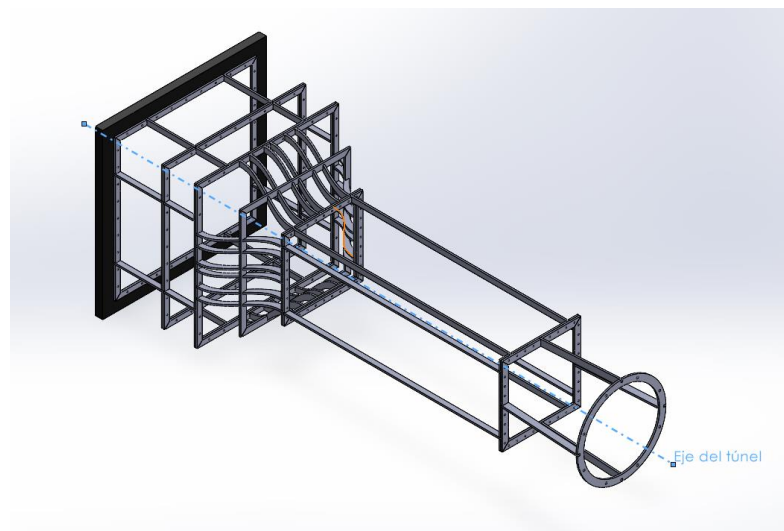


Figura 26. Estructura del túnel de viento. Formato CAD.

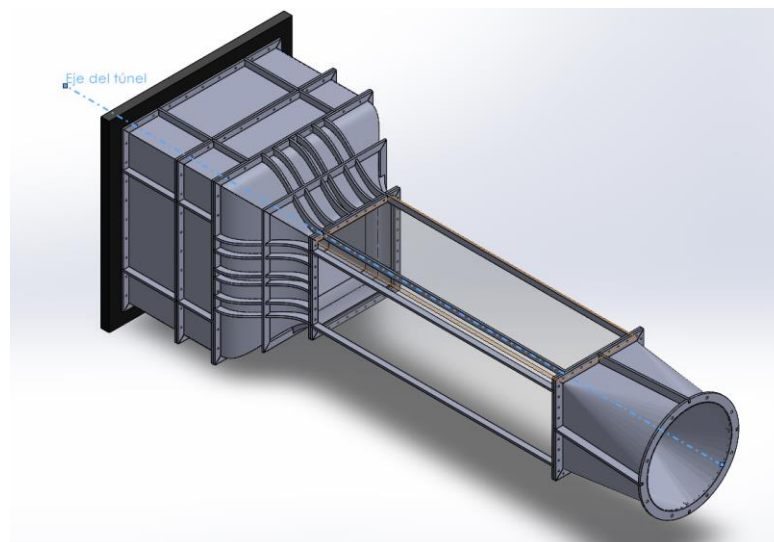


Figura 27. Túnel de viento. Formato CAD.

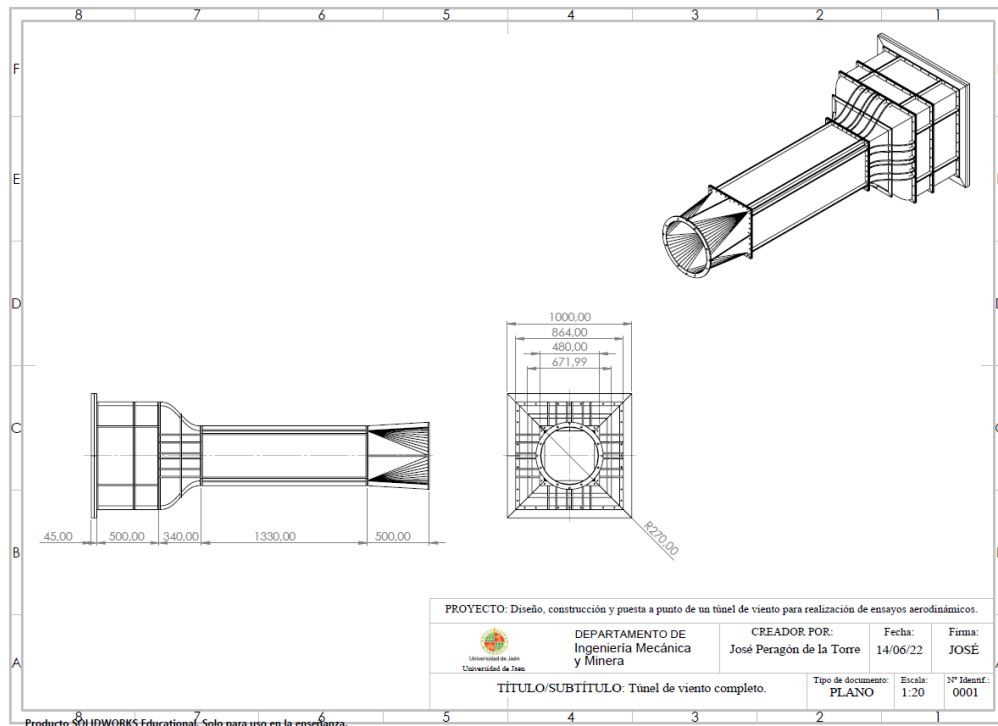


Figura 28. Túnel de viento. Vistas.

Los materiales utilizados serán PVC y metacrilato (para ver el interior del túnel durante la realización del ensayo) junto con rejillas metálicas y de tela que se colocarán en algunas partes del túnel para acondicionar el aire procedente del exterior.

A continuación, se describen las diferentes partes del túnel. En el Anexo I se adjuntan los planos de cada elemento con sus correspondientes cotas.

2.1. Entrada.

Se ha decidido que la relación de contracción sea de 2, por lo que la entrada del túnel de viento será cuadrada de sección $80 \times 80 \text{ cm}^2$. Ya que no tiene que ser transparente, se realizará con PVC. Con el objetivo de poder colocar diferentes planchas acondicionadoras en su interior, será dividida en varias partes a lo largo de su longitud: en un primer tramo de 30 cm y en otro de 20 cm de largo respectivamente.

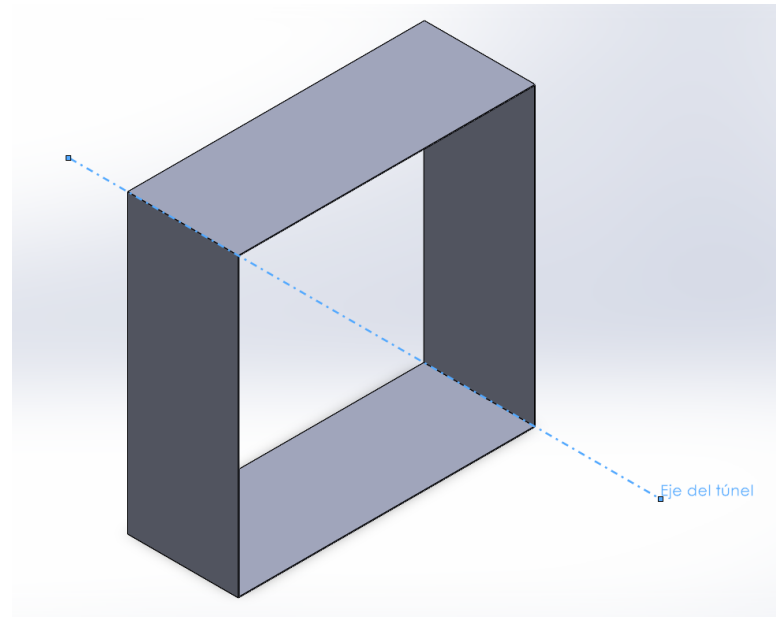


Figura 29. Lámina de sección de entrada. Formato CAD.

Tendrá en particular unas “costillas” que conforman una estructura de apoyo para el material anterior cuya intención es evitar vibraciones que afecten negativamente a los ensayos.

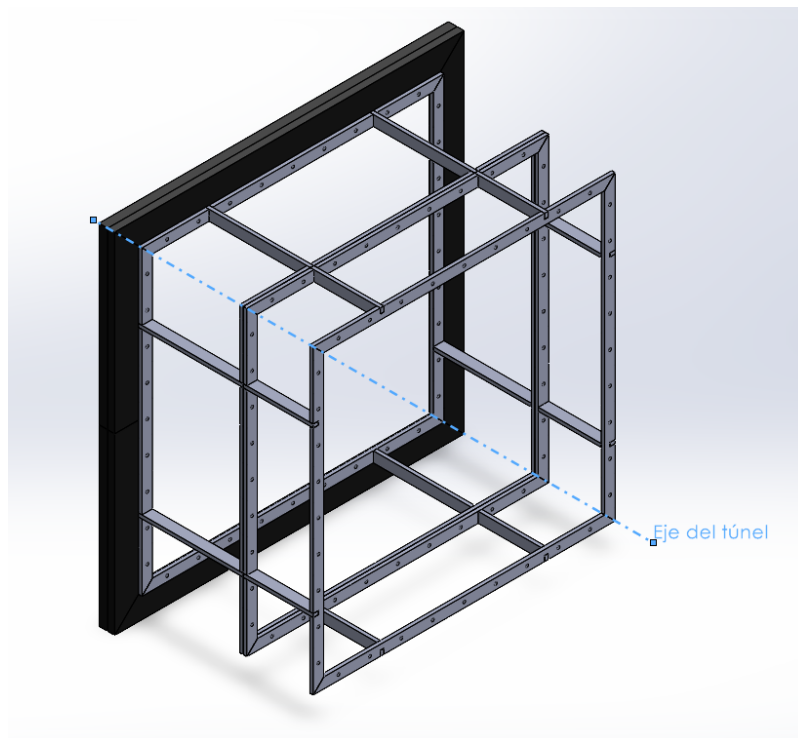


Figura 30. Estructura de sección de entrada. Formato CAD.

La entrada completa es la siguiente:

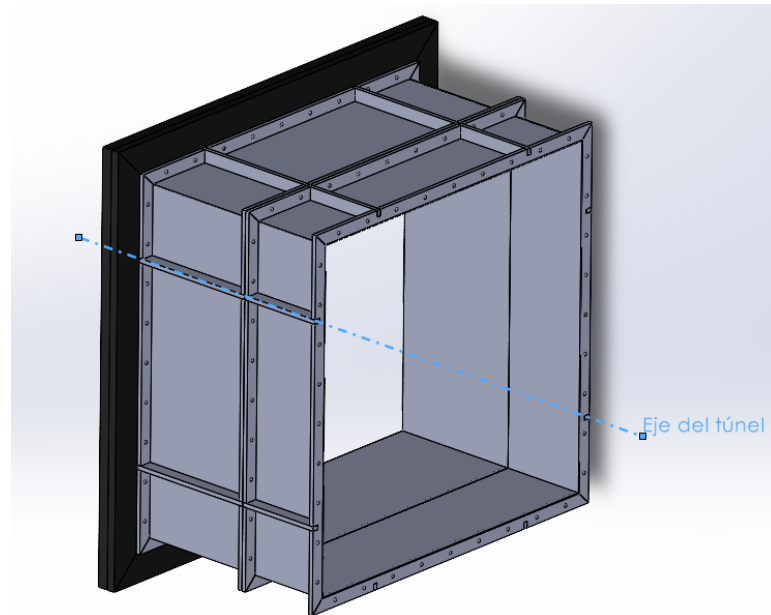


Figura 31. Entrada del túnel de viento. Formato CAD.

2.2. Contracción.

Es el elemento más importante a nivel de diseño, puesto que requiere de un estudio previo para obtener un flujo uniforme a la salida de la misma.

Son muchas las formas de realizar una disminución de sección de un flujo, desde la variación lineal de sección (la más sencilla), hasta algunas curvas polinómicas estudiadas con profundidad. Se opta por tres formas principales:

- **Curva formada por dos polinomios (12).** En este caso la curva de la contracción estará definida por una función a trozos, que tendrá condiciones de continuidad y derivabilidad en el punto de cambio de sección, el cuál será denotado como x_m .

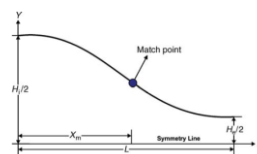


Figura 32. Ilustración del punto x_m . (12)

Se aplicará un valor de x_m de $0.5L$, $0.625L$ y $0.375L$, siendo L la longitud de la contracción con un valor de 34 cm. Utilizando el software Mathematica es posible declarar un polinomio de grado 3 antes de x_m y de grado 4 después de este con coeficientes desconocidos. Después se imponen todas las condiciones del problema (valores inicial y final de las funciones, continuidad y derivabilidad en todos los puntos y derivadas de orden 1 y 2 nulas en el comienzo y el final para una mayor suavidad en ambos sitios). Se adjuntan a continuación los resultados obtenidos.

0.5 x_m .

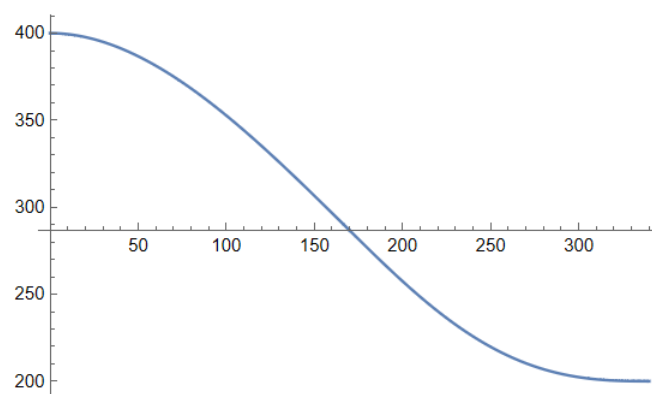


Figura 33. Curva 0.5 x_m .

$$h(x) = \begin{cases} 0.000011534x^3 - 0.00588235x^2 + 400 \\ -9.57843 \cdot 10^{-8}x^4 + 0.00009837x^3 - 0.033564x^2 + 3.76471x + 213.33 \end{cases} \quad (12)$$

0.375 x_m .

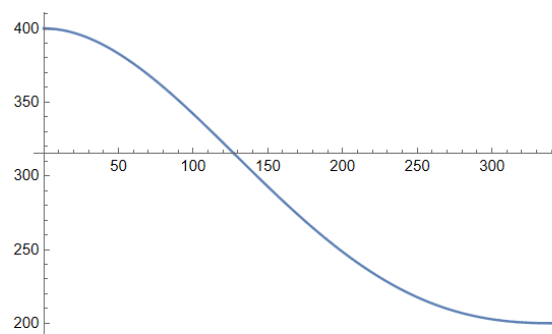
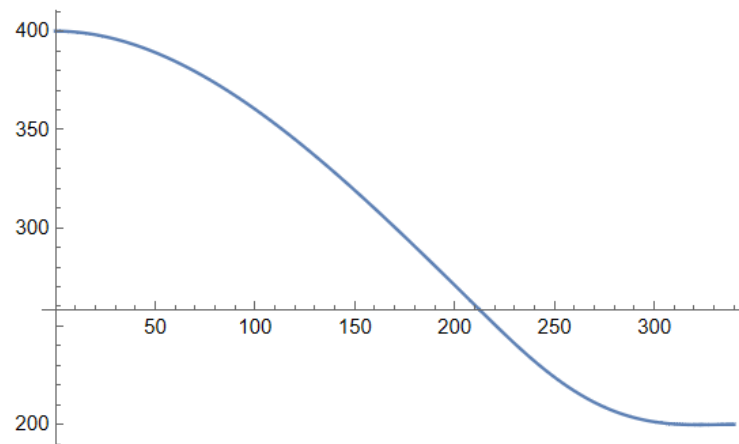


Figura 34. Curva 0.375 x_m .

$$h(x) = \begin{cases} 0.0000205049x^3 - 0.00784313x^2 + 400 \\ -3.923325 \cdot 10^{-8}x^4 + 0.00003851x^3 - 0.010902x^2 + 0.22739x + 393.79 \end{cases} \quad (13)$$

0.625x_m.Figura 35. Curva 0.625x_m.

$$h(x) = \begin{cases} 7.38178 \cdot 10^{-6}x^3 - 0.0047059x^2 + 400 \\ -3.027257 \cdot 10^{-7}x^4 + 0.00032929x^3 - 0.1279x^2 + 20.3689x - 837.037 \end{cases} \quad (14)$$

- **Curva formada por un polinomio (15).** El procedimiento seguido es similar al anterior, pero no existirá un x_m de unión de los intervalos a trozos, puesto que solamente se analizará una función. Para resolver el problema se definen polinomios con coeficientes desconocidos e imponiendo condiciones y resolviendo el correspondiente sistema de ecuaciones, es posible determinar la función deseada que describe el perfil de la contracción. Las condiciones de contorno utilizadas son los valores de la función a la entrada y a la salida de la tobera, la curvatura (segunda derivada) nula en la mitad de la tobera y la anulación de derivadas de orden uno y superior tanto al principio como al final de la coordenada horizontal. Los resultados son los siguientes:

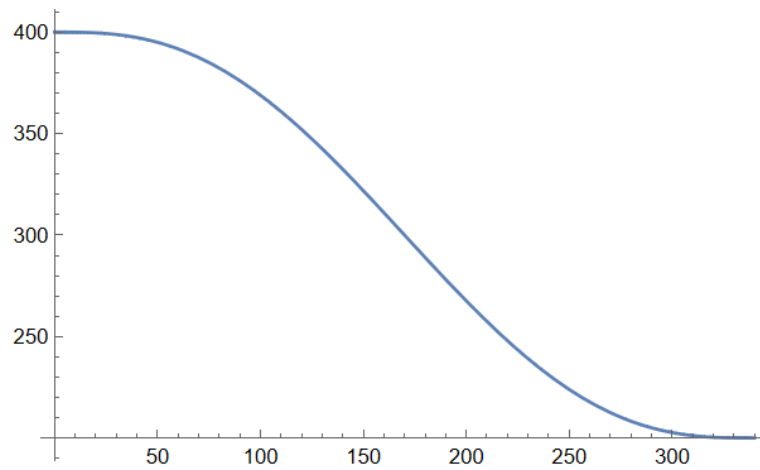
Modelo Grado 6.

Figura 36. Curva Modelo Grado 6.

$$h(x) = -2.6411 \cdot 10^{-10}x^5 + 0.000000224x^4 - 0.00005088x^3 + 400 \quad (15)$$

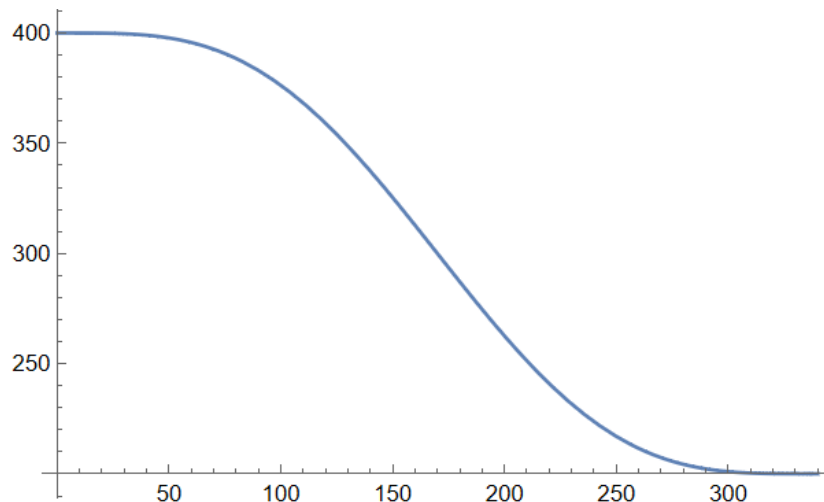
Modelo Grado 8.

Figura 37. Curva Modelo Grado 8.

$$h(x) = 7.616 \cdot 10^{-15} \cdot x^7 - 9.063 \cdot 10^{-12}x^6 + 3.698 \cdot 10^{-9}x^5 - 5.2382 \cdot 10^{-7}x^4 + 400 \quad (16)$$

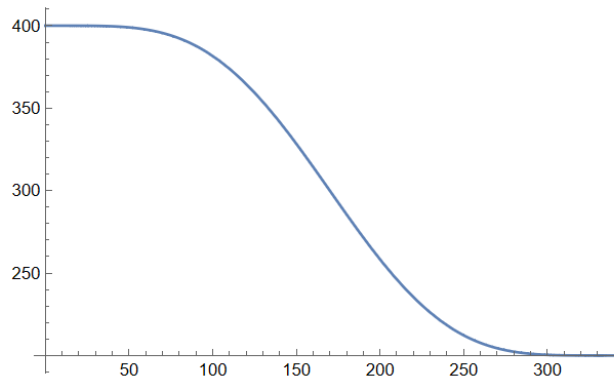
Modelo Grado 10.

Figura 38. Curva Modelo Grado 10.

$$h(x) = -2 \cdot 10^{-19}x^9 + 3.5 \cdot 10^{-16}x^8 - 2 \cdot 10^{-13}x^7 + 5.4 \cdot 10^{-11}x^6 - 5 \cdot 10^{-9}x^5 + 400 \quad (17)$$

- **Curva formada por modelo matemático (15).** Existe un modelo que permite ajustar el perfil de una tobera para unas condiciones de trabajo concretas a partir de ciertos parámetros tales como H_i (altura máxima), H_o (altura mínima) y L (longitud). Su formulación matemática es la siguiente:

$$h(x) = \left[-10 \left(\frac{x}{L} \right)^3 + 15 \left(\frac{x}{L} \right)^4 - 6 \left(\frac{x}{L} \right)^5 \right] (H_i - H_o) + H_i \quad (18)$$

Sustituyendo los valores de L por 340 mm, H_i por 400 mm y H_o por 200 mm:

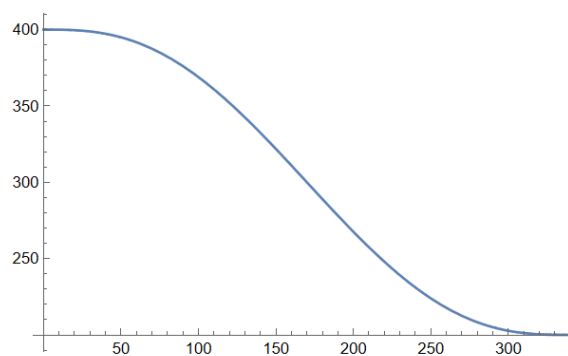


Figura 39. Curva Modelo Principal.

$$h(x) = 400 + 200 \left(-\frac{x^3}{3930400} + \frac{3x^4}{2672672000} - \frac{3x^5}{2271771200000} \right) \quad (19)$$

Mediante un script de Matlab es posible representar gráficamente todos estos perfiles, pudiendo comparar así visualmente la diferencia entre ellos.

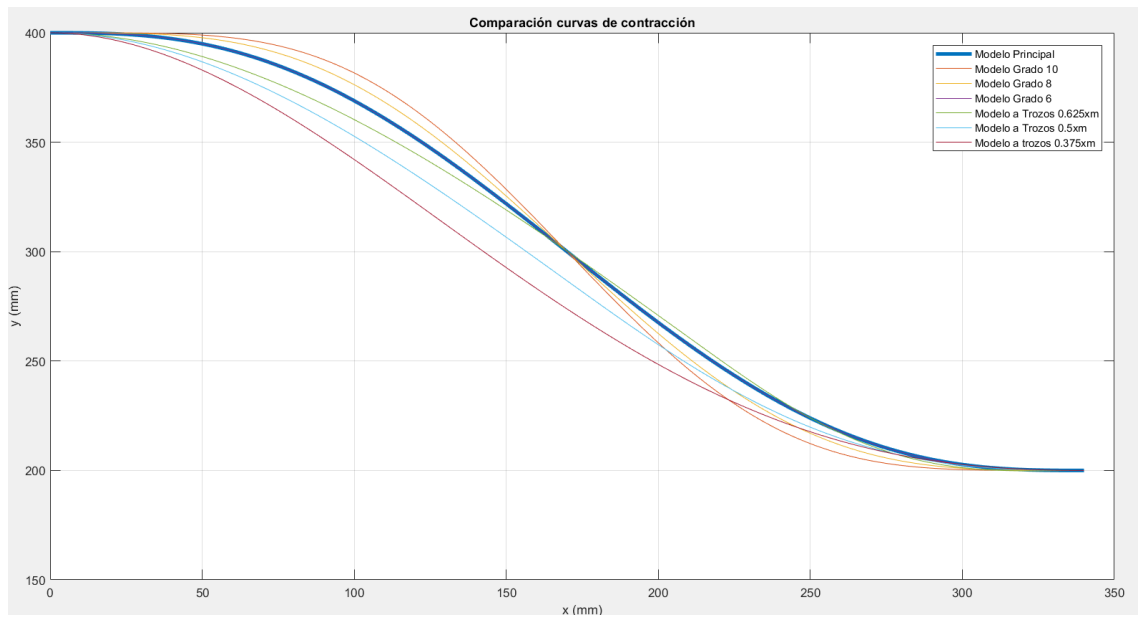


Figura 40. Ilustración comparativa de las curvas de contracción.

El modelo principal será el elegido (se justificará más adelante por los resultados de la simulación numérica).

Se ha modelado en SolidWorks esta tobera, tomando la consideración del espesor de 2 mm del material utilizado.

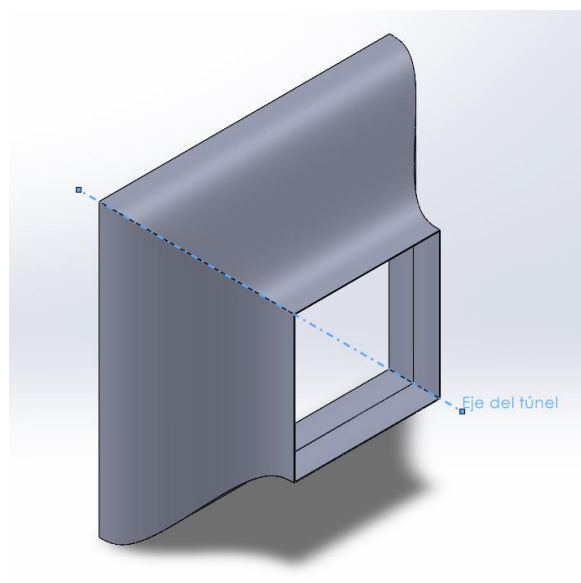


Figura 41. Tobera. Formado CAD.

Tendrá una estructura envolvente que será útil para la prevención de vibraciones durante el desarrollo del ensayo, se ha diseñado previamente también. Se muestra a continuación.

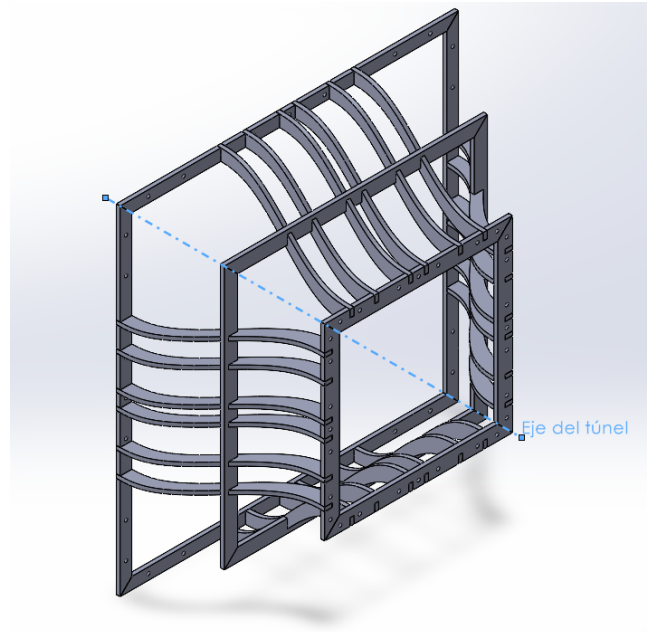


Figura 42. Estructura de la contracción. Formato CAD.

Ensamblando ambas:

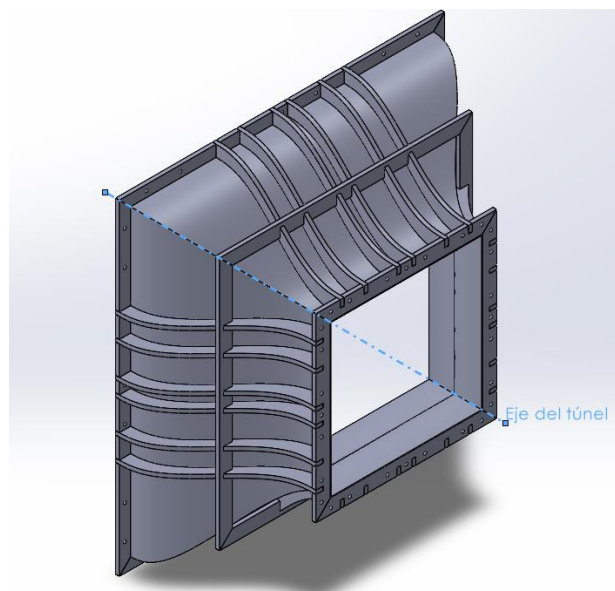


Figura 43. Tobera ensamblada. Formato CAD.

2.3. Zona de ensayo.

Esta será una parte de sección constante y cuadrada de 400x400 mm² en donde se realizarán los análisis deseados. Estará hecha de metacrilato de 1 cm de espesor y tendrá una zona de apertura y cierre con la que se podrá preparar el ensayo. Su sección debe coincidir con la sección de salida de la contracción y con la de entrada del difusor.

Se adjunta a continuación el modelado de la estructura que soporta la sección de ensayo:

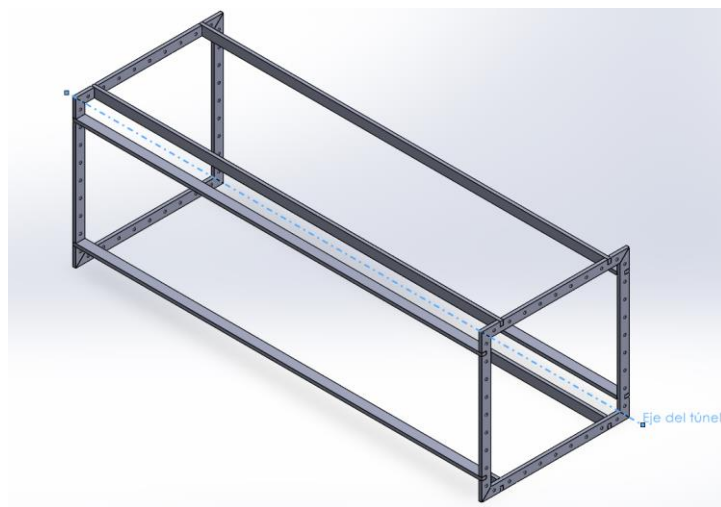


Figura 44. Estructura de la zona de ensayo. Formato CAD.

Junto con su ensamblaje correspondiente:

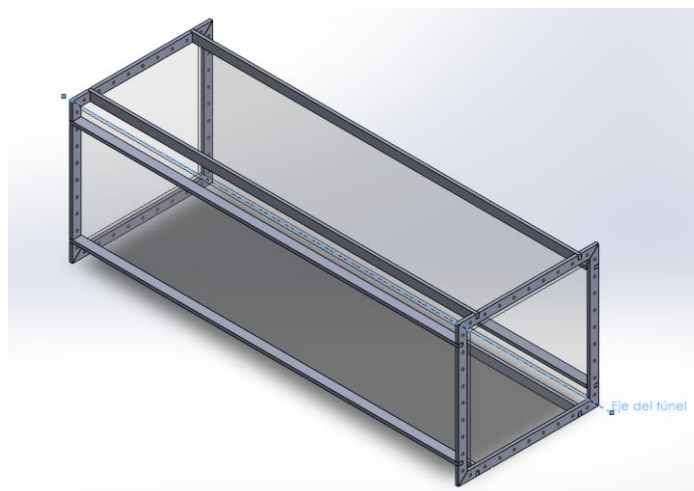


Figura 45. Zona de ensayo. Formato CAD.

2.4. Difusor.

Una zona de aumento de sección (en la que incrementa ligeramente la presión y disminuye la velocidad) de 50 cm de largo. Se cambia desde una sección de 40x40 cm² hasta otra de 46 cm de diámetro, aumentando así el área en 62 cm². Es importante destacar que en el túnel de viento este componente pasará de tener sección cuadrada a circular, por lo que se aplica una técnica de plegado en el diseño para otorgarle dicha forma. La costilla circular que posee al final debe tener las mismas dimensiones que el marco del ventilador tanto en sus diámetros principales como en sus pasantes. Se muestra a continuación:

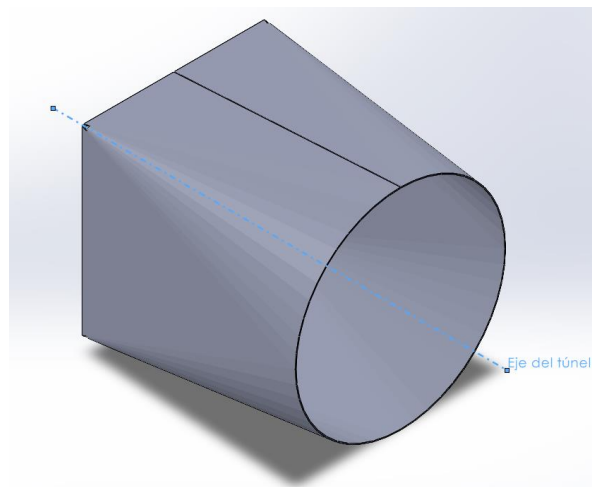


Figura 46. Difusor. Formato CAD.

Su estructura de apoyo es la siguiente:

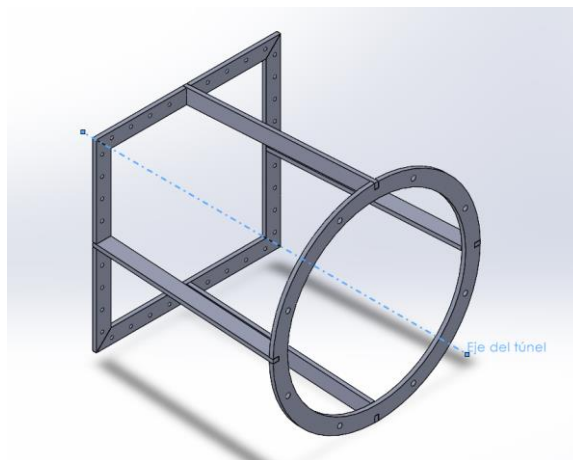


Figura 47. Estructura del difusor. Formato CAD.

Y su ensamblaje completo:

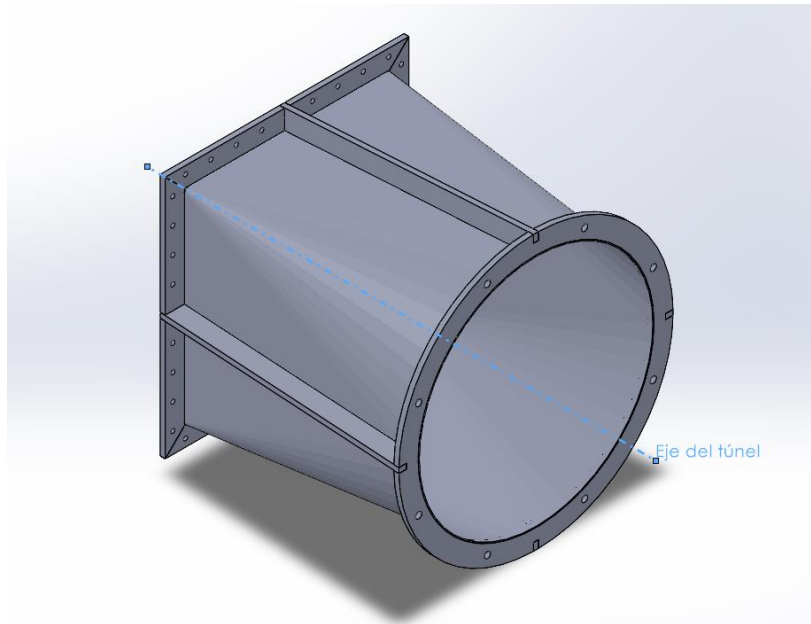


Figura 48. Ensamblaje del difusor. Formato CAD.

2.5. Fleje.

Se trata de la zona de unión entre la salida del difusor y el ventilador, siendo adaptable al cambio de sección y permitiendo así el paso al área circular del ventilador (desde la forma aproximada lograda en el difusor).



Figura 49. Fleje.

2.6. Ventilador.

Es el elemento final del túnel y el encargado de generar una depresión en el mismo causando el movimiento del aire hacia su interior. La velocidad que genera en el aire debe ser adecuada para que el experimento realizado en su interior pueda lograrse correctamente. El seleccionado es un ventilador axial helicoidal de gran robustez de Sodeca, el modelo HCT-45-2T-2/AL IE3 equipado con hélices de aluminio. Acepta motores monofásicos de 230 V y 50 Hz y trifásicos de 230/400 V y 50 Hz que pueden llegar a aportar una potencia de hasta 4 kW y 400/690 V y 50 Hz que son útiles para potencias superiores. El motor de este ventilador en específico es de 2 CV y provoca un ruido máximo de 86 dB. Se adjunta una a continuación:



Figura 50. Ventilador.

Son conocidas además su curva de funcionamiento (que relaciona el caudal del ventilador con la presión obtenida) junto con su ficha técnica:

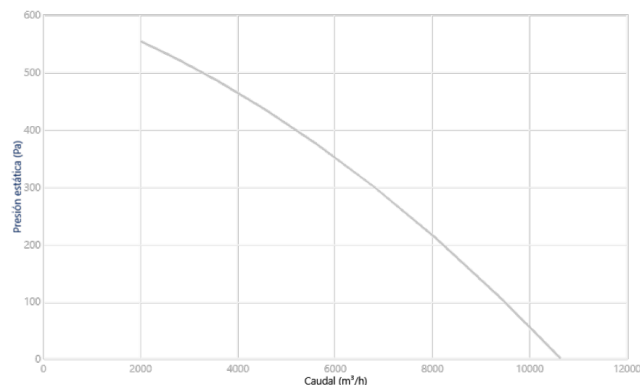


Figura 51. Curva de funcionamiento del ventilador.

$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing D$	E	$\varnothing J$	N
540	500	460	360	12	8x45º

Las dimensiones sin unidades definidas explícitamente se muestran en milímetros (mm). Dimensiones dependientes del motor son aproximadas

Peso aprox. (kg) 35

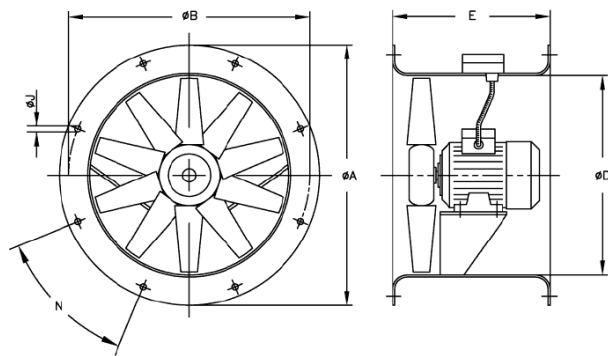


Figura 52. Características geométricas del ventilador.

El ventilador lleva un complemento adicional, un variador de frecuencia, que permite determinar la frecuencia eléctrica de entrada al motor asíncrono pudiendo controlar así la velocidad en el interior de la cámara de ensayo.



Figura 53. Variador de frecuencia.

Este componente incluye en su interior una fuente de alimentación de 12 V y dos ventiladores de pequeño tamaño que son útiles para refrigerar el sistema durante su funcionamiento.



Figura 54. Ventilador del variador.



Figura 55. Fuente de alimentación del variador.

El control de la frecuencia eléctrica se realizará con un mando de control que va conectado con cables al resto el variador.



Figura 56. Mando de control del variador.

La curva de funcionamiento del ventilador mostrada en la figura 51 corresponde con una velocidad de giro de 2850 rpm. Al no conocer la ecuación de esta función, se utiliza la web *PlotDigitizer*, donde es posible obtener puntos aproximados de la gráfica con gran precisión. Empleando Excel es posible introducir estos datos y aproximar a un polinomio de segundo grado, obteniendo la siguiente ecuación:

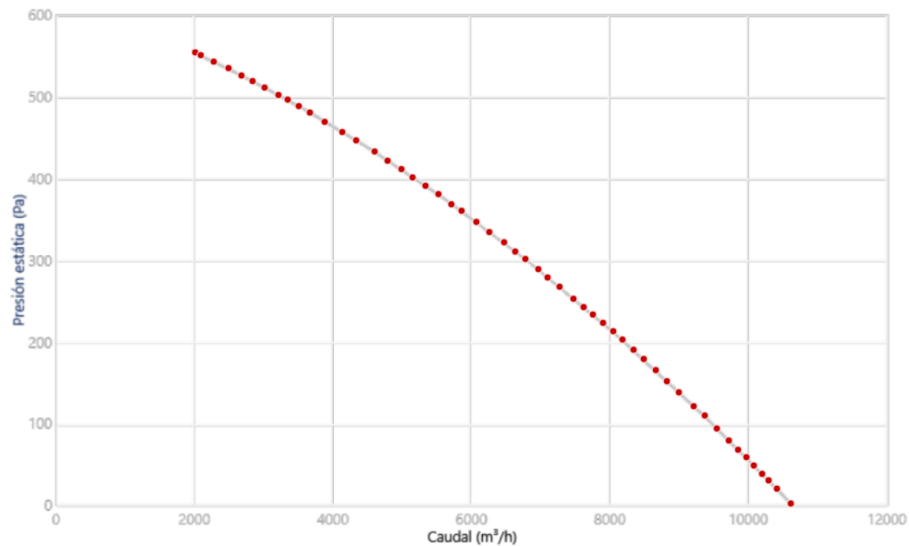


Figura 57. Obtención de los puntos de la curva de funcionamiento con *PlotDigitizer*

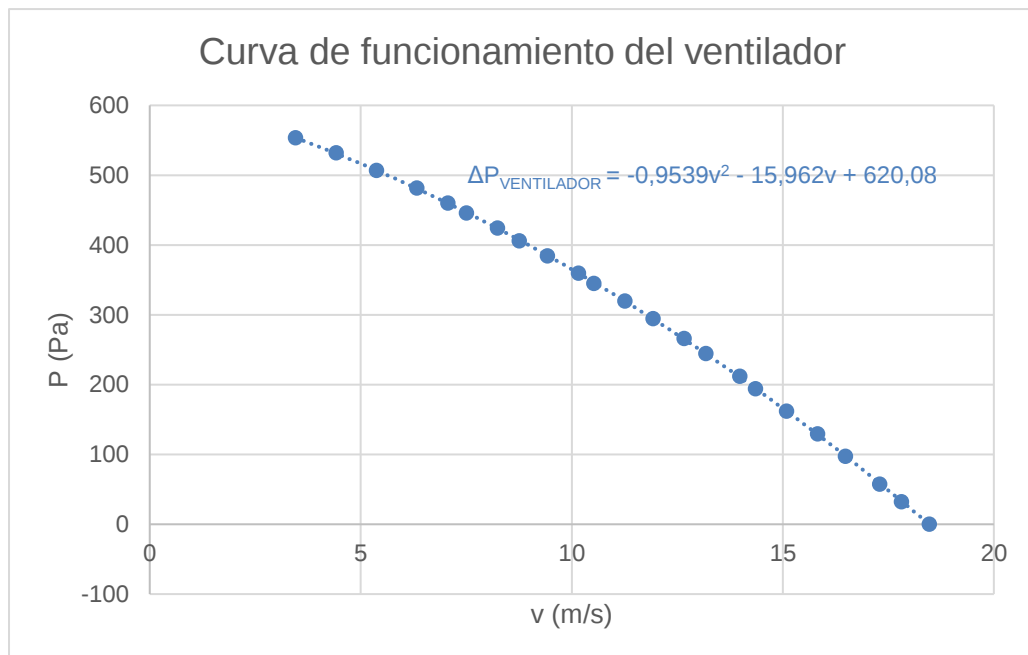


Figura 58. Curva de funcionamiento del ventilador aproximada.

Adicionalmente, se introduce una curva aproximada de pérdidas de carga de la instalación. Para ello se toman algunas hipótesis: se introducen todas las pérdidas como primarias (tomando como nulo el término de las secundarias), además de considerar el túnel de viento como una tubería de sección cuadrada de 400x400 cm² y se consideran nulas las pérdidas de carga en la tobera (porque idealmente este elemento se diseña y construye para cumplir con esa condición). La ecuación para este problema es la siguiente:

$$\Delta P_{\text{VENTILADOR}} = \Delta P_{\text{INSTALACIÓN}} + \Delta P_{\text{GEOMÉTRICA}} \quad (20)$$

Donde la presión del ventilador es la correspondiente a la curva de funcionamiento, la pérdida de carga de la instalación corresponde a las pérdidas primarias explicadas anteriormente y que se aproximarán con la ecuación de Darcy-Weisbach y la pérdida de presión geométrica se debe al cambio de altura entre el punto inicial y el final (nula en este caso).

Conociendo la expresión de la presión del ventilador en función de la velocidad:

$$-0,9539v^2 - 15,962v + 620,08 = \frac{1}{2}\rho v^2 \left(\lambda_{\text{GLOBAL}} \frac{L}{D_h} \right) \quad (21)$$

Donde v es la velocidad, que será de 16 m/s (valor deseado), ρ es la densidad del aire, L es la longitud del tramo analizado y D_h es el diámetro hidráulico, que se calcula como el cuadrado de la longitud entre el cuadruple del área de la sección y el perímetro mojado de esta. λ_{GLOBAL} es el coeficiente que incluye las pérdidas primarias y secundarias.

Con la ecuación 21 es posible calcular el coeficiente de pérdidas de carga globales, que tiene un valor de 0,1319. Por tanto, la ecuación característica de la instalación sería la siguiente:

$$-0,9539v^2 - 15,962v + 620,08 = 0,4706v^2 \quad (22)$$

Finalmente se representan tanto la curva de funcionamiento del ventilador como la de pérdidas recientemente calculada:

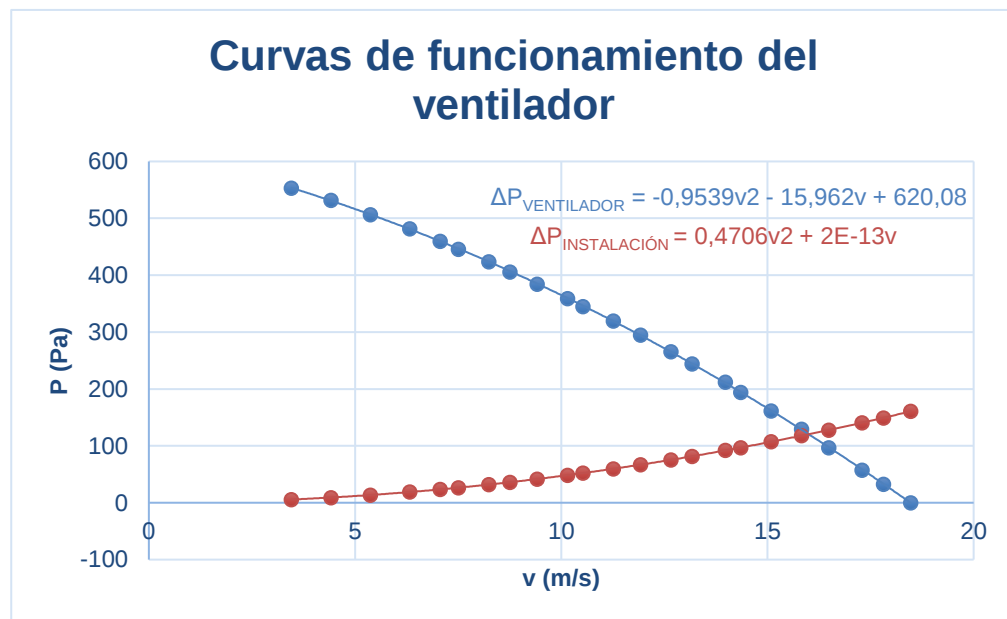


Figura 59. Curvas de funcionamiento del ventilador aproximadas.

3. Simulaciones numéricas.

Antes de construir el túnel de viento, es de vital importancia realizar algunos análisis sobre la zona de contracción, buscando un método predictivo cualitativo con intención de saber la uniformidad de la velocidad en su sección de salida. Para aplicar este estudio se procede a simular numéricamente los distintos diseños de tobera en dos dimensiones, seleccionando una de ellas para simularla posteriormente en tres dimensiones. Después se realizará una simulación en 2D del túnel de viento completo.

En todas las simulaciones numéricas que se mostrarán a continuación se aplicarán varios procedimientos de interés. Primero se comprobará que los flujos de aire son iguales a la entrada y a la salida (cumpliendo así el principio de conservación de la masa), después se aplicará un método Upwind de primer orden de consistencia para favorecer la convergencia de las simulaciones y se realizará lo mismo posteriormente con un método de segundo orden que toma como valor inicial el caso anterior. Finalmente, se calcula el número de Reynolds en todos los casos, para determinar el régimen del flujo.

Se han tomado de modelo varios artículos donde se realizan simulaciones similares tales como (10), (12), (14), (15), (16), (30), (31) (32), (33).

3.1. Selección de la tobera: Simulaciones 2D.

El procedimiento seguido consiste en utilizar una de las curvas de contracción anteriores para comparar los distintos modelos de turbulencia, posibles condiciones de contorno, coeficientes de subrelajación, métodos numéricos, etc. Después se realizará un análisis con la misma configuración para todas las toberas, pudiendo compararlas finalmente. El perfil seleccionado para este estudio es el modelo principal.

3.1.1. *Mallado.*

Aplicando la opción de Meshing de Ansys es posible realizar un mallado de superficie para la tobera. En primer lugar se introduce la curva en un programa de diseño CAD y se crea una superficie con ella, para introducirla en el WorkBench.

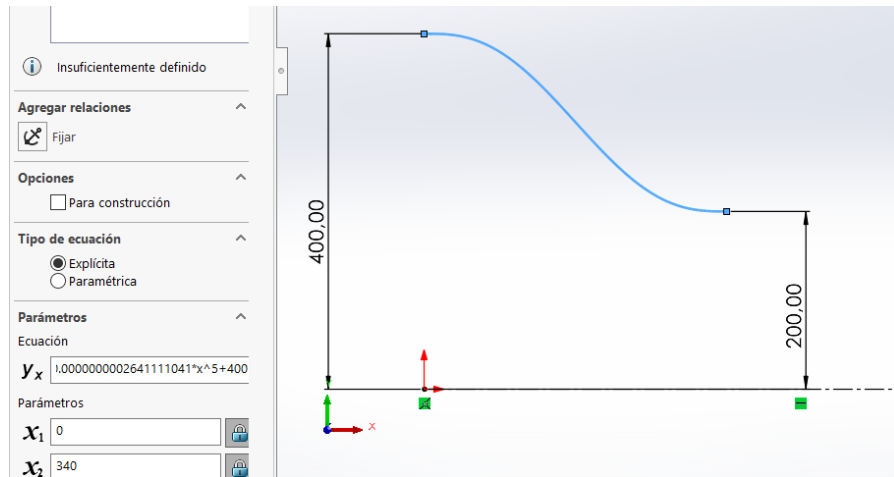


Figura 60. Introducción de curva de contracción en SolidWorks.

Después mediante los comandos Edge Sizing y Face Meshing se puede crear divisiones para indicar el número de mallas en el eje horizontal y vertical además de crear una malla uniforme respectivamente. El resultado del mallado es el siguiente:

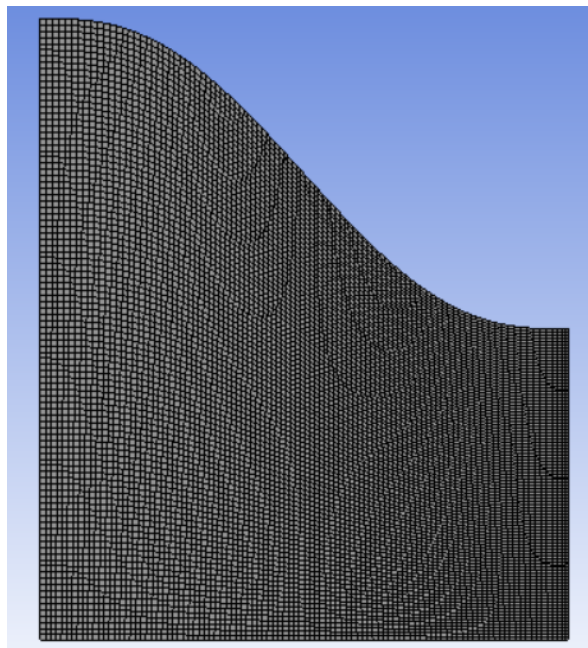


Figura 61. Mallado 1 del Modelo Principal.

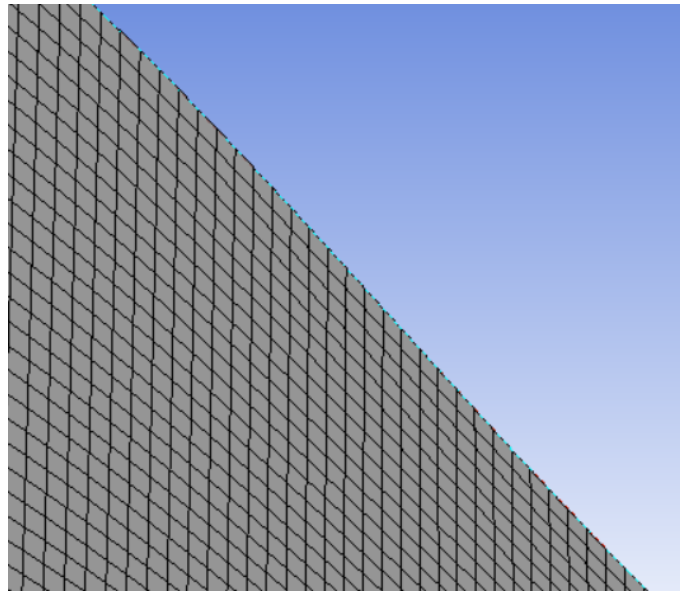


Figura 62. Mallado 1 del modelo principal (zoom).

Se aprecia que el mallado sigue la dirección natural del flujo, tiene una forma uniforme y es de pequeño tamaño (favoreciendo a la precisión de los resultados).

Esta malla se ha realizado indicando un número de 100 divisiones y tiene 20198 caras, 9999 celdas y 10200 nodos. A continuación se comprueba la calidad de la malla:

```
Reading results.
Parallel variables...
Done.

Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 3.400348e-01
  y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 4.000000e-01
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 4.170630e-06
  maximum volume (m3): 1.656921e-05
  total volume (m3): 1.020150e-01
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 1.986398e-03
  maximum face area (m2): 4.156518e-03
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 6.71931e-01 cell 6731 on zone 2 (ID: 4752 on partition: 0) at location ( 1.80377e-01, 2.87187e-01)
Maximum Aspect Ratio = 3.48848e+00 cell 6695 on zone 2 (ID: 3861 on partition: 0) at location ( 2.05985e-01, 2.60256e-01)
```

Figura 63. Comprobación de calidad de la malla 1.

Ansyes Fluent no indica la existencia de ningún problema con el mallado, por lo que tiene una buena calidad.

Para hacer un estudio de sensibilidad de malla, se implementarán dos modelos más con distintos tamaños en las simulaciones 10 y 11 y se comprueba la variación de los resultados.

El siguiente caso será similar al anterior, pero tendrá 50 divisiones, por lo que las celdas serán notablemente más grandes.

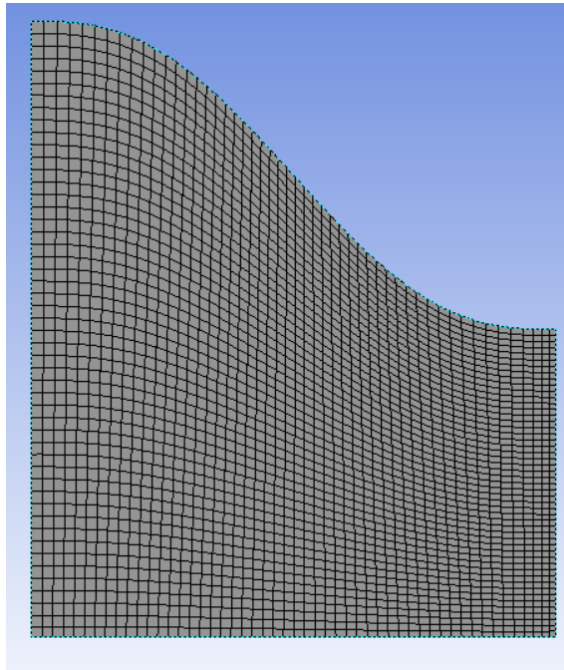


Figura 64. Mallado 2 del modelo principal.

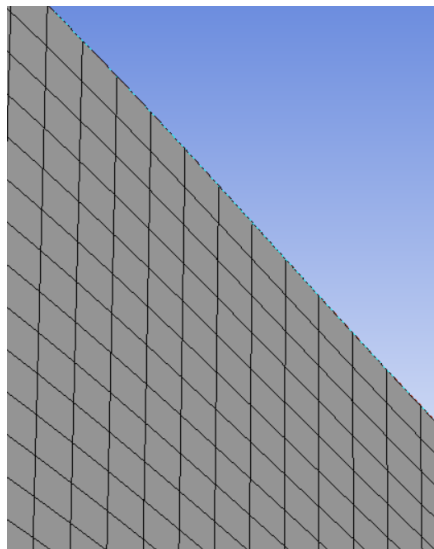


Figura 65. Mallado 2 del modelo principal (zoom).

Esta malla tiene un total de 5201 caras, 2550 celdas y 2652 nodos. A continuación se muestra la calidad de la malla:

```
Reading results.
Parallel variables...
Done.

Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 3.400348e-01
  y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 4.000000e-01
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 1.646388e-05
  maximum volume (m3): 6.671771e-05
  total volume (m3): 1.020144e-01
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 3.944068e-03
  maximum face area (m2): 8.349592e-03
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 6.75843e-01 cell 2521 on zone 2 (ID: 1250 on partition: 0) at location ( 1.79845e-01, 2.86328e-01)
Maximum Aspect Ratio = 3.48475e+00 cell 2516 on zone 2 (ID: 1000 on partition: 0) at location ( 2.08480e-01, 2.56528e-01)
```

Figura 66. Comprobación de calidad de la malla 2.

Nuevamente no existe ningún tipo de error en el mallado de la geometría, por lo que su calidad es buena.

En el último caso se indicará un número de 75 divisiones, un valor intermedio entre los anteriores.

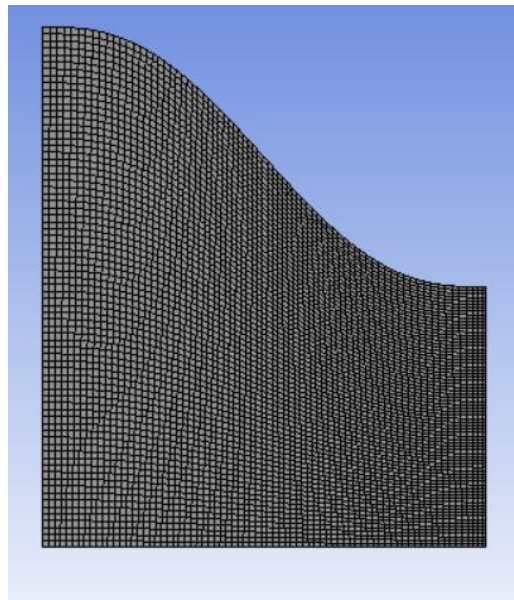


Figura 67. Mallado 3 del modelo principal.

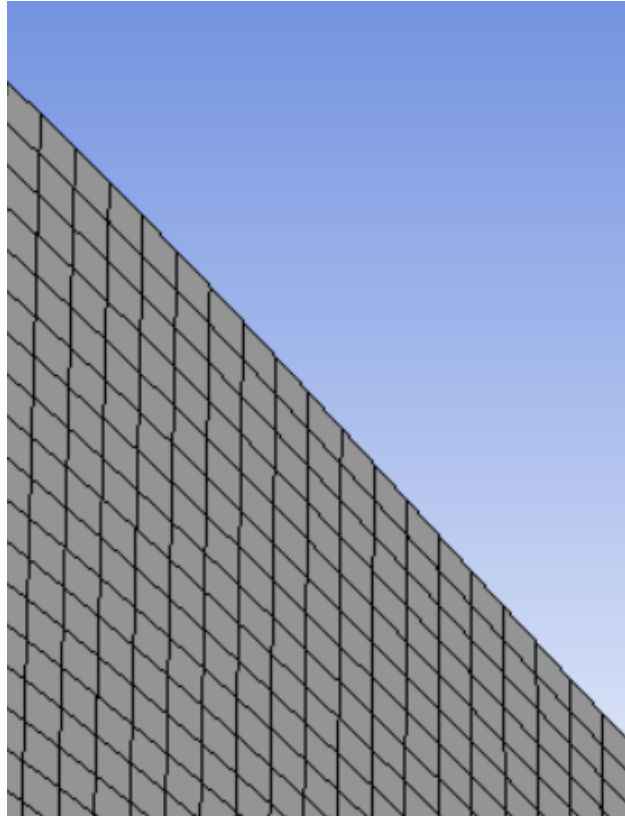


Figura 68. Mallado 3 del modelo principal (zoom).

Esta malla tiene un total de 50914 caras, 25296 celdas y 25619 nodos. A continuación se muestra la calidad de la malla:

```
Preparing mesh for display...
Done.

Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 3.400348e-01
  y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 4.000000e-01
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 7.109635e-06
  maximum volume (m3): 2.937363e-05
  total volume (m3): 1.020147e-01
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 2.625887e-03
  maximum face area (m2): 5.516925e-03
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 6.72672e-01 cell 357 on zone 2 (ID: 2700 on partition: 0) at location ( 1.81774e-01, 2.85203e-01)
Maximum Aspect Ratio = 3.49029e+00 cell 325 on zone 2 (ID: 2175 on partition: 0) at location ( 2.08358e-01, 2.57491e-01)
```

Figura 69. Comprobación de calidad de la malla 3.

3.1.2. Configuración de la simulación y selección de tobera.

El siguiente paso es realizar las simulaciones necesarias con los mallados anteriores para determinar la configuración de la simulación (condiciones de contorno, método numérico, modelo de turbulencia...) que se utilizará con los diferentes modelos matemáticos de perfil de tobera. En el Anexo II se han realizado todos los análisis, siendo la simulación 6 en la que se obtiene un flujo uniforme a la salida de la tobera. Esta incluye condición de presión a la entrada y a la salida, modelo de turbulencia $k-\epsilon$ y *solver* Coupled con Upwind de segundo orden (que toman como condiciones iniciales la solución del método Upwind de primer orden). Después se ha realizado un estudio de sensibilidad de malla en las simulaciones 10 y 11, realizando la simulación 6 con diferentes tamaños de malla, demostrando que se obtiene flujo uniforme a la salida en todos los casos.

Después se realiza la simulación numérica en los diferentes modelos de tobera con el primer formato de malla del apartado anterior y se explica el motivo por el que se descartan algunas de las opciones, siendo la elegida para ser fabricada el modelo principal. Los resultados de este estudio se encuentran en el Anexo III. Es posible extraer información de las soluciones obtenidas exportando los datos a un fichero de texto que puede ser procesado por un script de Matlab. De esta manera se comparan las velocidades a la entrada y a la salida de la contracción, junto con las velocidades horizontales y verticales a la salida.

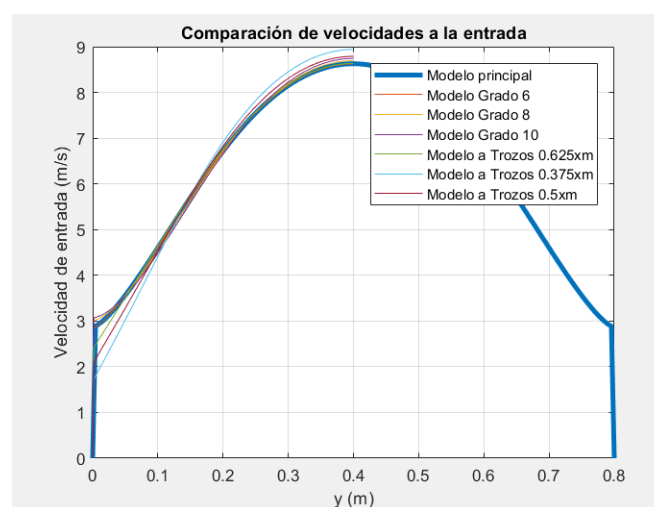


Figura 70. Comparación de velocidades a la entrada de las curvas de contracción.

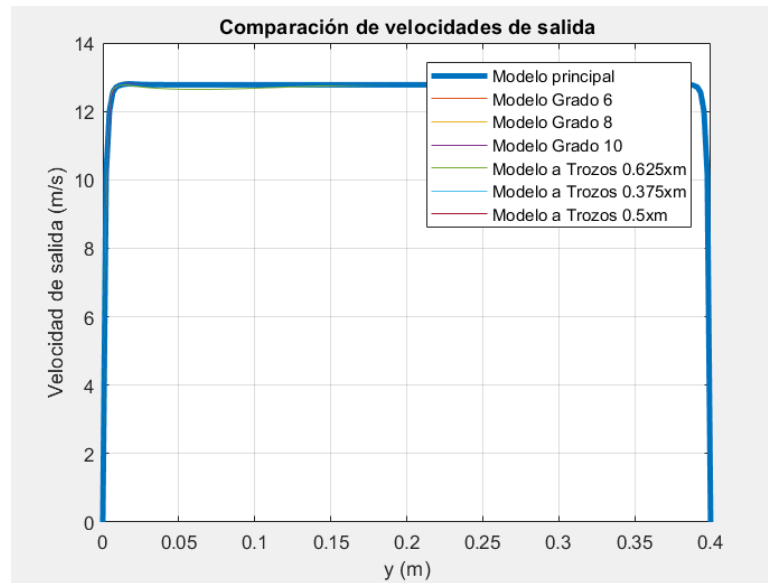


Figura 71. Comparación de velocidades a la salida de las curvas de contracción.

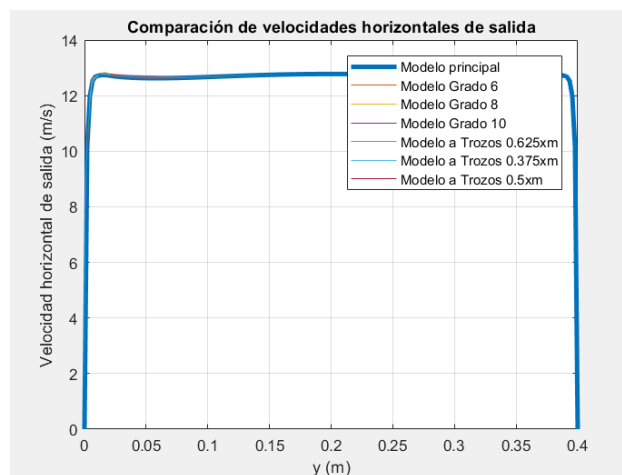


Figura 72. Comparación de velocidades horizontales a la salida de las curvas de contracción.

Tanto en el caso de velocidad a la entrada como velocidad a la salida y velocidad horizontal a la salida, se obtienen resultados muy similares para todas las toberas simuladas. También se puede ver que la velocidad horizontal es similar a la velocidad total a la salida, por lo tanto la componente vertical debe ser pequeña en comparación, se comprueba a continuación.

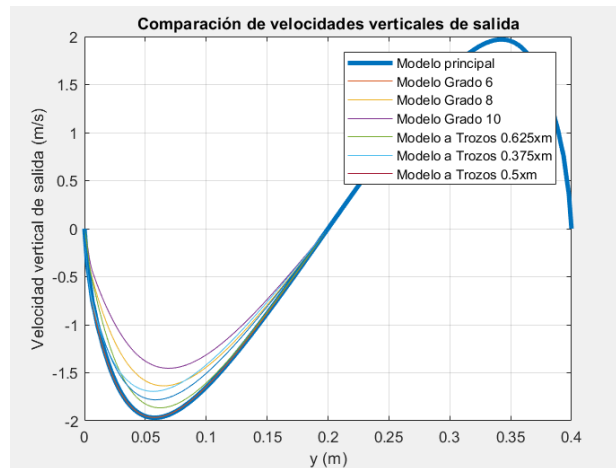


Figura 73. Comparación de velocidades verticales a la salida de las curvas de contracción.

Dado que los modelos que no se han descartado son el modelo principal y el modelo grado 6, se toma la decisión de utilizar el principal, debido a que ambas toberas tienen muchas similitudes y el estudio del caso elegido ha sido más exhaustivo y por tanto más seguro.

Los contornos de velocidad y presión de la tobera seleccionada son:

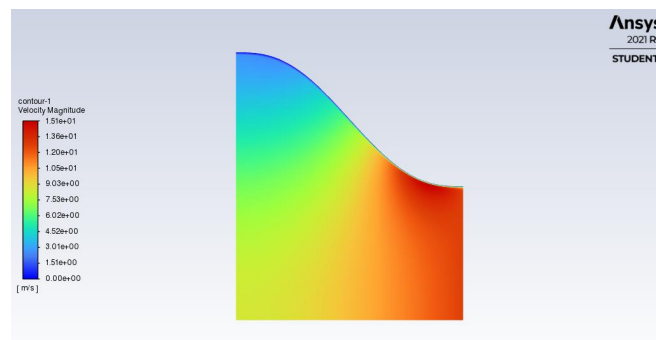


Figura 74. Contorno de velocidad de la tobera elegida.

Se aprecia un aumento de velocidad de entorno a 7 m/s a 15 m/s. Aunque los perfiles de velocidad son variantes en la primera mitad de la tobera, conforme se produce una disminución de sección de esta, la variación de velocidad disminuye, de forma que la velocidad tiene el mismo color a la salida, demostrando que el flujo es uniforme.

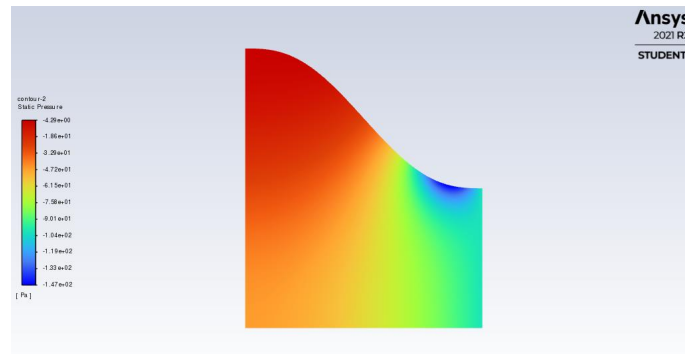


Figura 75. Contorno de presión de la tobera elegida.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 12,777 \cdot 0,4}{0,000017894} = 3,5 \cdot 10^5 \quad (23)$$

Siendo ρ la densidad del fluido, v la velocidad, L la longitud característica y μ la viscosidad dinámica.

En este caso existe una gran presión en la parte inicial de la tobera, disminuyendo y volviéndose uniforme a la salida de la misma. Este efecto es esperable, debido a que el flujo se debe expandir en una tobera convergente (como la de este problema), disminuyendo su presión siempre que la velocidad del aire sea subsónica.

Se adjuntan imágenes de los vectores de velocidad para visualizar con facilidad el flujo en el interior de la tobera:

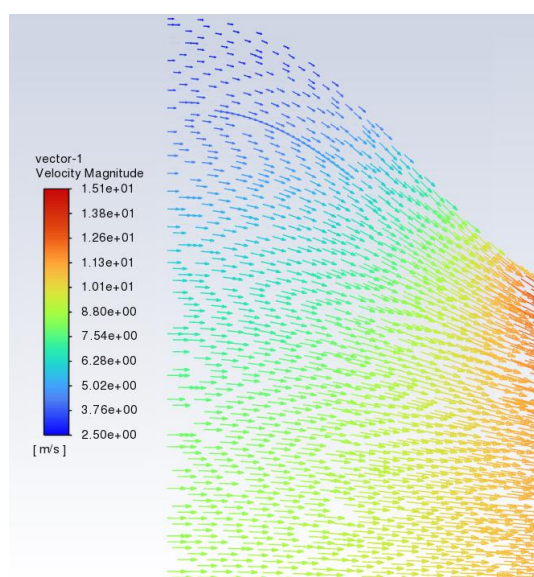


Figura 76. Vectores de velocidad de la tobera elegida. Imagen 1.

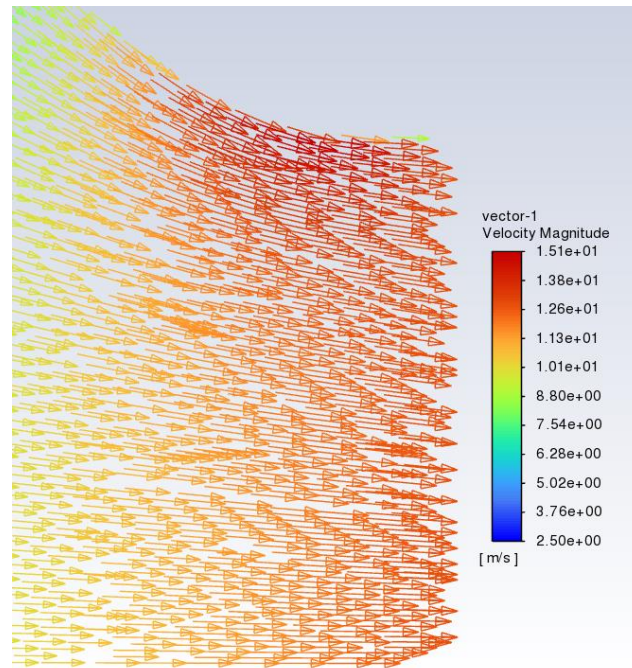


Figura 77. Vectores de velocidad de la tobera elegida. Imagen 2.

En el anexo II se presentan los detalles de las simulaciones de las toberas descartadas.

3.2. Estudio de sensibilidad de malla.

Se precede a comprobar que la solución no depende del tamaño de los elementos de la malla, para ello se utilizará la solución de la tobera elegida con las tres mallas del apartado 3.1.1. Se muestran a continuación:

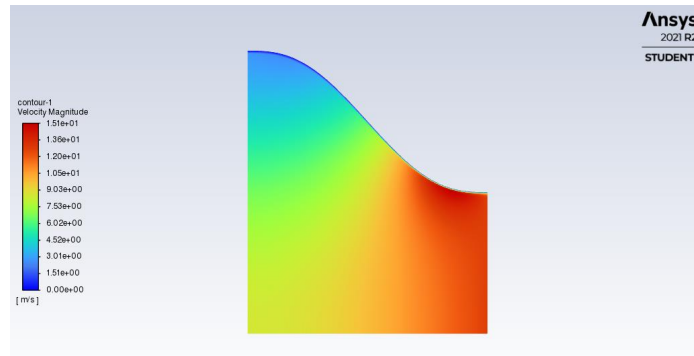


Figura 78. Contorno de velocidad. Malla 1.

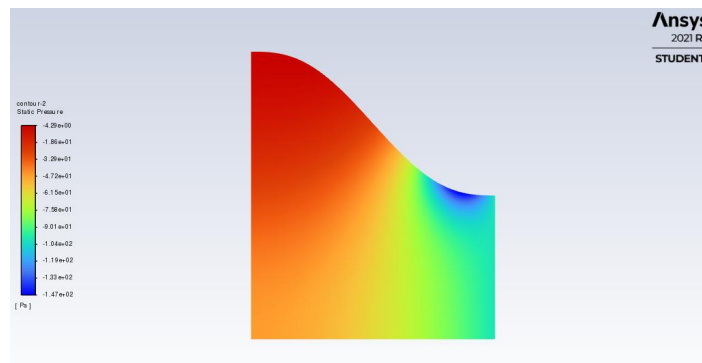


Figura 79. Contorno de presión. Malla 1.

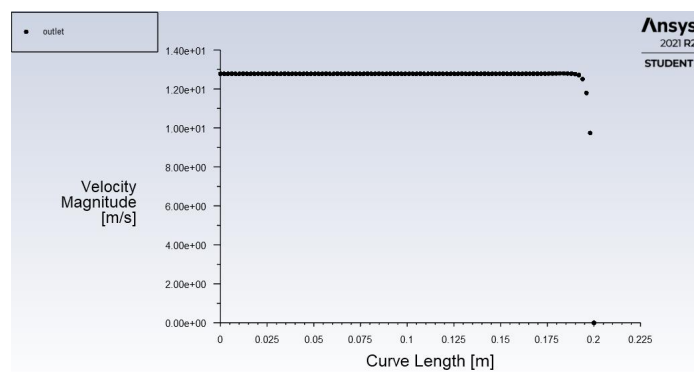


Figura 80. Perfil de velocidad. Malla 1.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (24)$$

Después se realiza la simulación para las mallas 2 y 3:

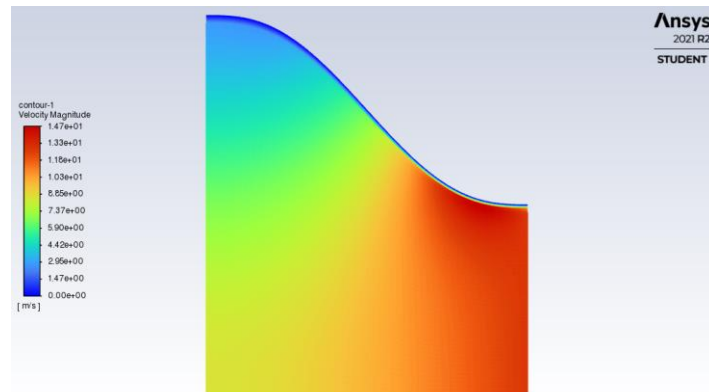


Figura 81. Contorno de velocidad. Malla 2.

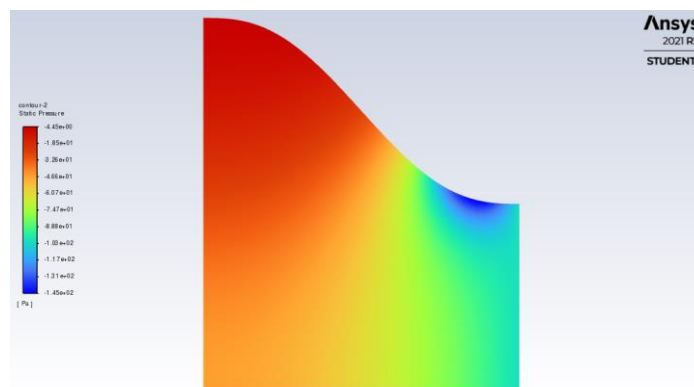


Figura 82. Contorno de presión. Malla 2.

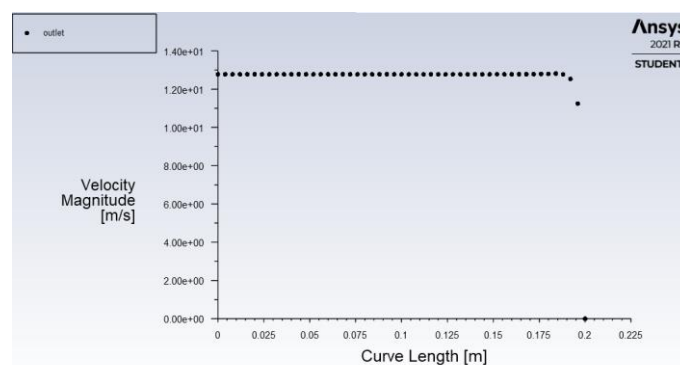


Figura 83. Perfil de velocidad. Malla 2.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (25)$$

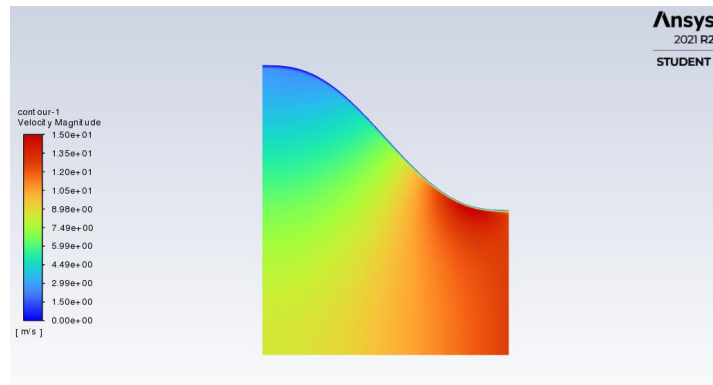


Figura 84. Contorno de velocidad. Malla 3.

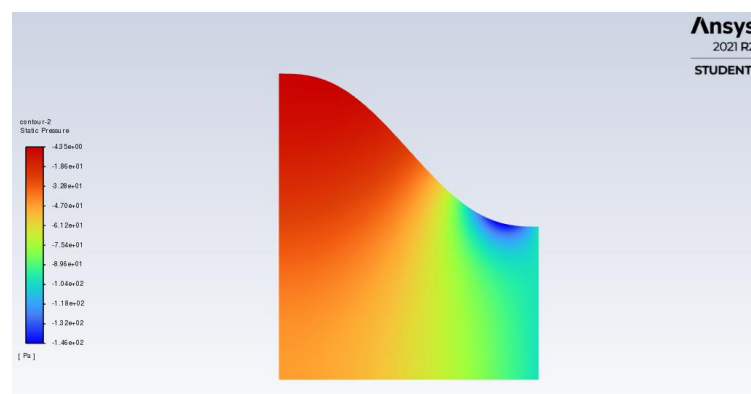


Figura 85. Contorno de presión. Malla 3.

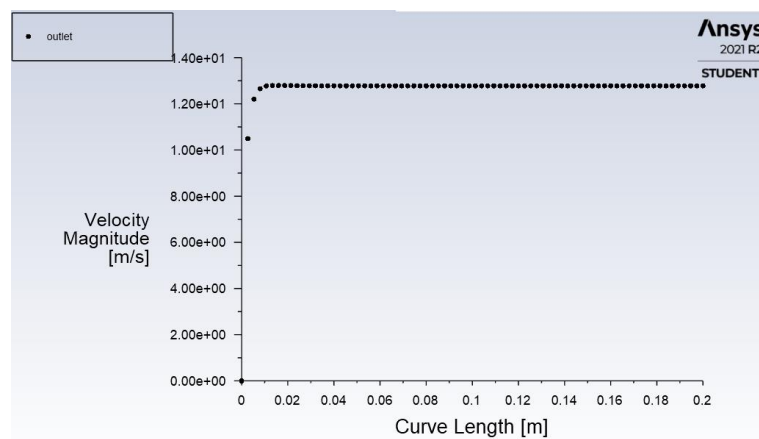


Figura 86. Perfil de velocidad. Malla 3.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (26)$$

Se comprueba que la velocidad es uniforme en todos los casos y los resultados son muy similares, corroborando la independencia de la solución del tamaño de la malla.

Configuración de la simulación				
Nº Malla	Nº Caras	Nº Celdas	Nº Nodos	V _{salida} (m/s)
1	20198	9999	10200	12,7773
2	5201	2550	2652	12,7774
3	50914	25296	25619	12,7773

Tabla 2. Comparación de mallas para la configuración de la simulación.

De igual manera, se demuestra que la velocidad tiene el mismo valor independientemente de la malla elegida.

3.3. Simulación 3D de la tobera.

3.3.1. Mallado 3D de la tobera.

El primer paso para realizar la simulación numérica de la tobera en tres dimensiones es crear un sólido macizo con un programa de CAD (despreciando el espesor del PVC y dejando así una sección de 80 cm x 80 cm a la entrada y de 40 cm x 40 cm a la salida), que servirá para indicar en el mallado que su interior es el fluido operativo del problema. Se realiza a partir de los diseños previos de la tobera, quedando así:

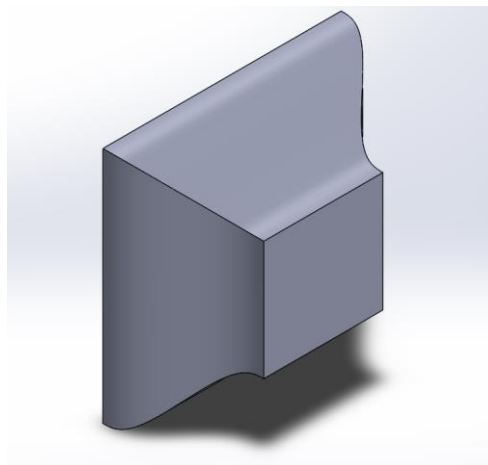


Figura 87. Zona de fluido de la simulación 3D.

Después en el módulo Meshing de Ansys Fluent se procede al mallado de la geometría anterior. Para ello se utiliza una malla cúbica seleccionando la opción de MultiZone del tipo Hexa/Prism. Se utiliza también Edge Sizing, permitiendo crear un total de 80 divisiones en todas las aristas, determinando así la anchura de la malla.

El resultado es el siguiente:

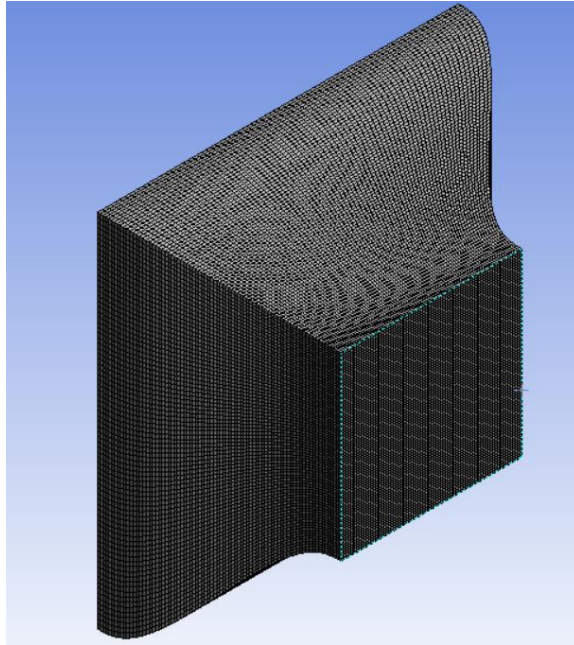


Figura 88. Mallado 1 de la tobera 3D.

Se muestra a continuación una sección de la malla para corroborar que su interior también es adecuado:

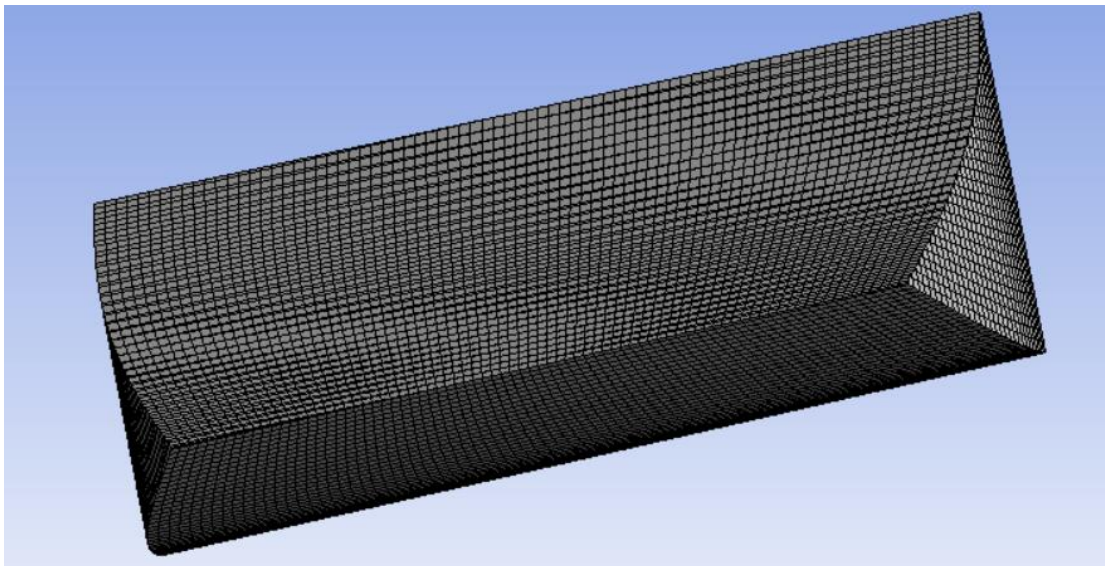


Figura 89. Mallado interior 1 de la tobera 3D.

Esta malla tiene un total de 1555200 caras, 512000 celdas y 531441 nodos y se ha realizado con una división de 80 elementos en cada arista. A continuación se muestra la comprobación de su calidad:

```
Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = -3.182105e-11, max (m) = 3.400048e-01
y-coordinate: min (m) = -4.000000e-01, max (m) = 4.000000e-01
z-coordinate: min (m) = -4.000000e-01, max (m) = 4.000000e-01
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 1.327050e-07
  maximum volume (m3): 5.840094e-07
  total volume (m3): 1.301317e-01
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 2.194270e-05
  maximum face area (m2): 1.000000e-04
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 5.44721e-01 cell 154895 on zone 4 (ID: 6361 on partition: 0) at location ( 1.71587e-01, 2.94567e-01, -2.94567e-01)

Maximum Aspect Ratio = 5.16648e+00 cell 388585 on zone 4 (ID: 505634 on partition: 0) at location ( 1.49373e-01, -3.18530e-01, 3.18530e-01)
```

Figura 90. Comprobación de calidad de la malla tridimensional 1.

Se crea una segunda malla para realizar un estudio de sensibilidad de malla más adelante.

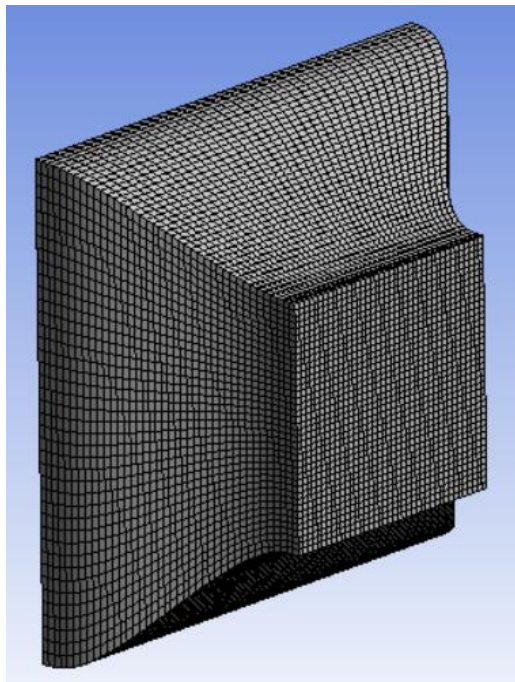


Figura 91. Mallado 2 de la tobera 3D

Nuevamente, se muestra a continuación una sección de la malla para corroborar que su interior también es adecuado:

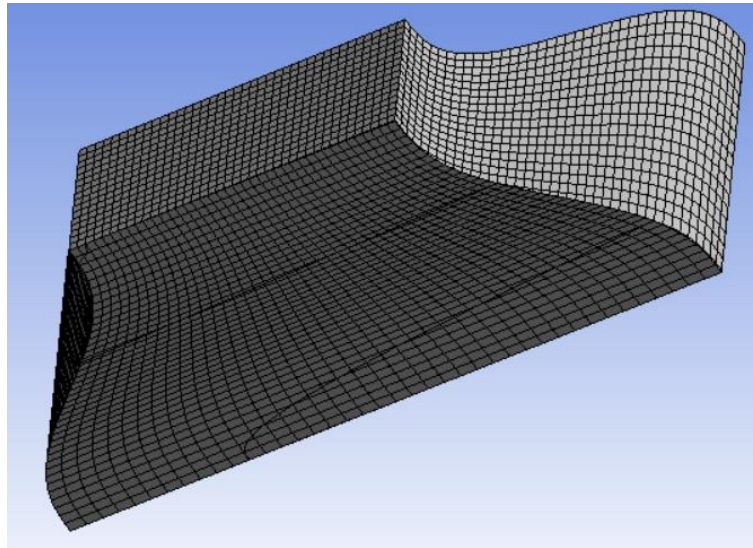


Figura 92. Mallado interior 2 de la tobera 3D.

Esta malla tiene un total de 196800 caras, 64000 celdas y 68921 nodos y se ha realizado con una división de 40 elementos en cada arista. A continuación se muestra la comprobación de su calidad:

```
Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = -3.182105e-11, max (m) = 3.400048e-01
y-coordinate: min (m) = -4.000000e-01, max (m) = 4.000000e-01
z-coordinate: min (m) = -4.000000e-01, max (m) = 4.000000e-01
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 1.062209e-06
  maximum volume (m3): 4.670514e-06
  total volume (m3): 1.301236e-01
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 8.780604e-05
  maximum face area (m2): 4.000000e-04
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 5.49867e-01 cell 3616 on zone 4 (ID: 62421 on partition: 0) at location ( 1.73146e-01, -2.89165e-01, 2.89165e-01)
Maximum Aspect Ratio = 5.17825e+00 cell 3339 on zone 4 (ID: 62417 on partition: 0) at location ( 1.47738e-01, -3.16188e-01, 3.16188e-01)
```

Figura 93. Comprobación de calidad de la malla tridimensional 2.

3.3.2. Ejecución de la simulación 3D.

Después se procede a la configuración de la simulación, utilizando esta un modelo de turbulencia k- ϵ , con una condición de presión tanto a la entrada como a la salida (proporcionando un salto de presión de 100 Pa) al igual que en las simulaciones anteriores en las que se comparan los distintos modelos de toberas.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

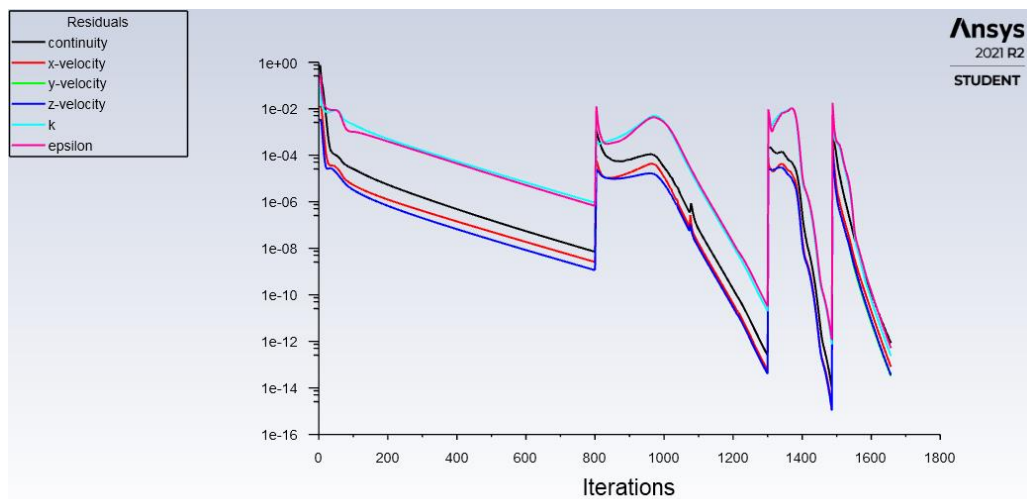


Figura 94. Residuales. Simulación 3D.

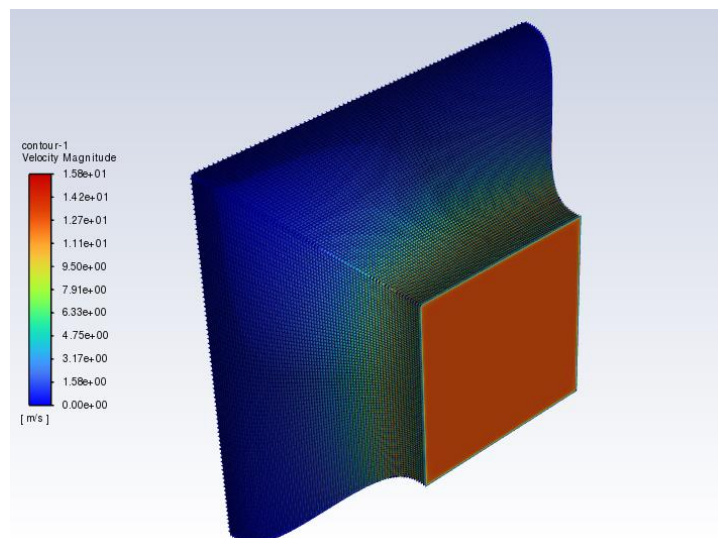


Figura 95. Contorno de velocidad delantero. Simulación 3D.

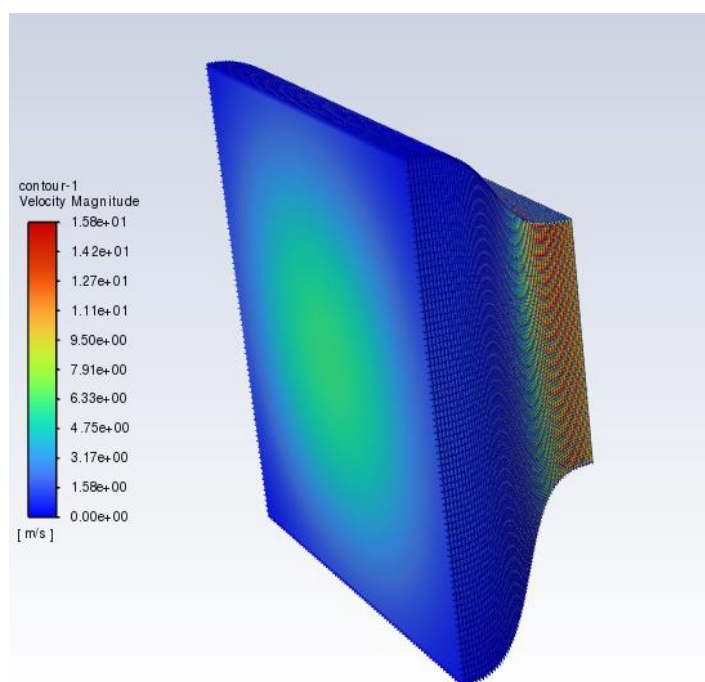


Figura 96. Contorno de velocidad trasero. Simulación 3D.

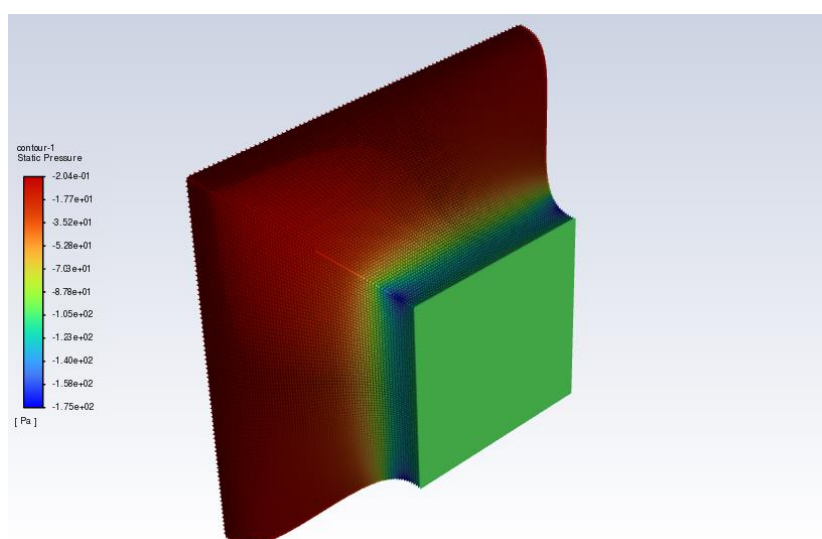


Figura 97. Contorno de presión. Simulación 3D.

$$Re = 3,48 \cdot 10^5 \quad (27)$$

Con un salto de presiones inferior:

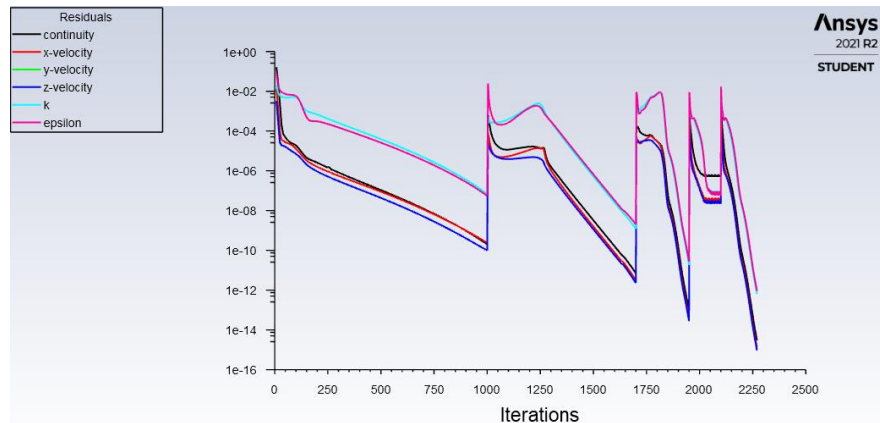


Figura 98. Residuales. Segunda simulación 3D.

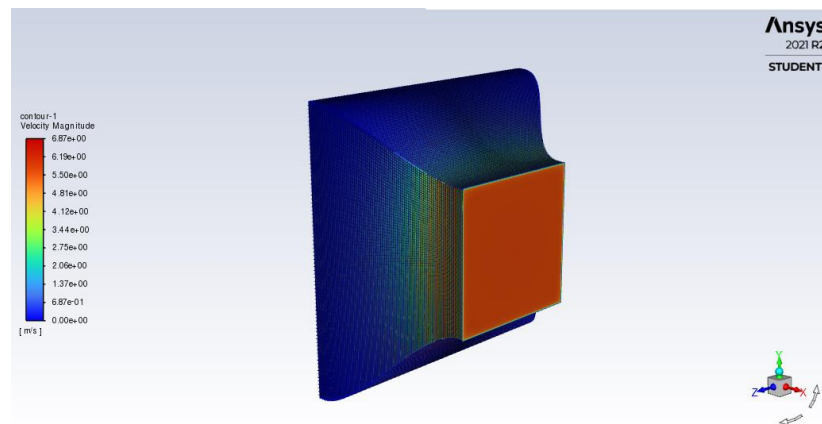


Figura 99. Contorno de velocidad. Segunda simulación 3D.

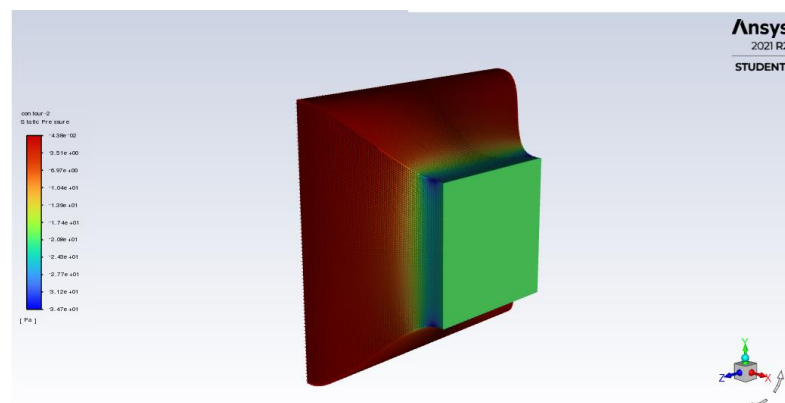


Figura 100. Contorno de presión. Segunda simulación 3D.

$$Re = 1,51 \cdot 10^5 \quad (28)$$

Se puede comprobar que la tobera tiene flujo uniforme en la salida a bajos y altos valores de velocidad.

Se observa cierta similitud en los valores de la velocidad entre las simulaciones con salto de presión de 100 Pa tanto en 2D como en 3D, además de que en todas las simulaciones se obtiene un flujo uniforme a la salida de la tobera, comprobando así con simulaciones de distinto tipo que se consigue el mismo resultado. Sucede lo mismo con la caída de presión, en la simulación tridimensional disminuye la presión y se hace uniforme a la salida (tal y como se indica en su condición de contorno), igual que en las simulaciones bidimensionales.

En estos casos, al tratarse de una simulación 3D, se requiere de una mayor cantidad de recursos computacionales, por lo que el proceso iterativo es notablemente más lento. De hecho, la configuración de la simulación lleva a una solución sin buena convergencia, pero es posible evitar esto modificando el número de Reynolds. Se ha hecho aplicando la simulación con una viscosidad cien veces menor que la del aire, una vez ha convergido ese caso se repite el procedimiento con una viscosidad diez veces menor y finalmente se aplica la viscosidad del problema tomando como valor inicial la solución anterior y usando un método Upwind de primer orden de consistencia para favorecer la convergencia. Después se introduce el método Upwind de segundo orden.

3.3.3. Estudio de sensibilidad de malla de la simulación 3D.

Se realizará la misma simulación (con salto de presión de 100 Pa) con la malla 2 para comprobar que la solución es independiente el tamaño de la malla.

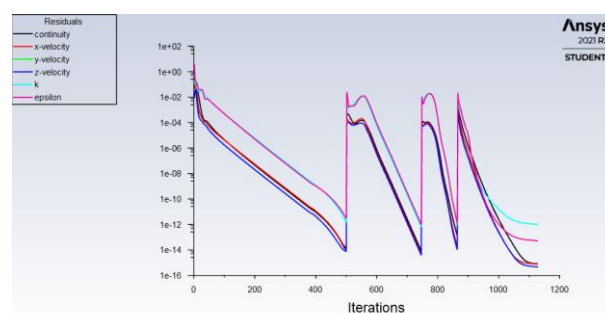


Figura 101. Residuales del estudio de sensibilidad de malla. Simulación 3D.

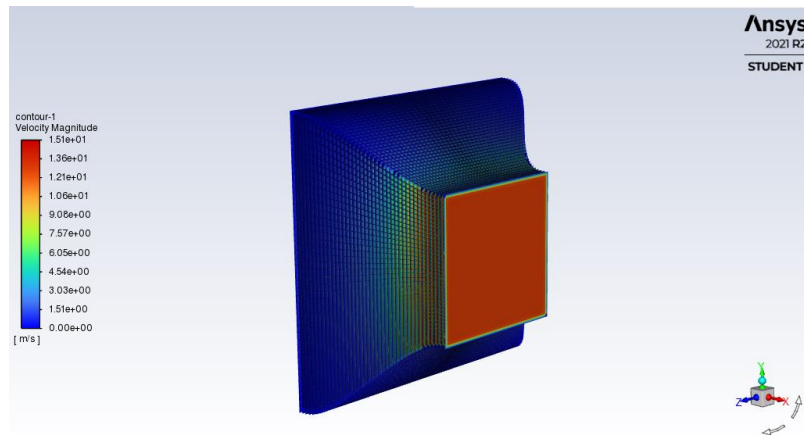


Figura 102. Contorno de velocidad del estudio de sensibilidad de malla.
Simulación 3D.

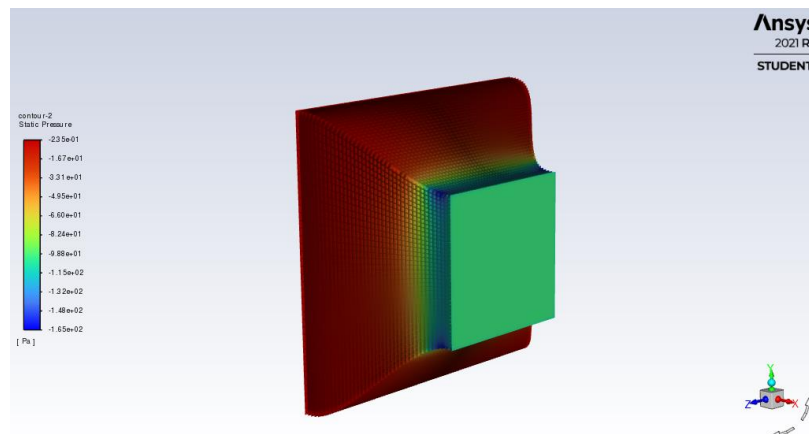


Figura 103. Contorno de presión del estudio de sensibilidad de malla.
Simulación 3D.

$$Re = 3,31 \cdot 10^5 \quad (29)$$

Nuevamente, se demuestra que el flujo es uniforme a la salida independientemente del tamaño de la malla, además de que los valores de velocidad y presión son muy parecidos a los de la primera simulación del apartado 3.3.2. La velocidad en la salida de la tobera varía muy poco al modificar el modelo de mallado, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Simulaciones de la tobera en 3D				
Nº Malla	Nº Caras	Nº Celdas	Nº Nodos	V _{salida} (m/s)
1	1555200	512000	531441	12,7
2	196800	64000	68921	12,3

Tabla 3. Comparación de las mallas de la simulación 3D.

3.4. Simulación 2D del túnel completo.

3.4.1. *Mallado 2D del túnel completo.*

El procedimiento para el mallado del túnel completo es similar a lo realizado para la tobera en 2D. Se importa un fichero CAD en primer lugar que contiene la sección de la entrada, tobera, zona de ensayo y difusor y se procede a la configuración de la malla, cuyo dominio corresponde a la mitad superior del túnel de viento debido a que se impondrá una condición de contorno de simetría para evitar mayores consumo de memoria RAM del ordenador. Se utilizan los comandos Edge Sizing y Face Sizing para seleccionar el número de divisiones en cada lado de la geometría bidimensional y para indicar la uniformidad de la malla y su orientación (la del sentido del flujo). De forma adicional se procede a reducir el espesor de la malla en la capa límite con intención de obtener resultados precisos en la misma. Se muestran ambos mallados a continuación:



Figura 104. Túnel 2D completo. Mallado normal.

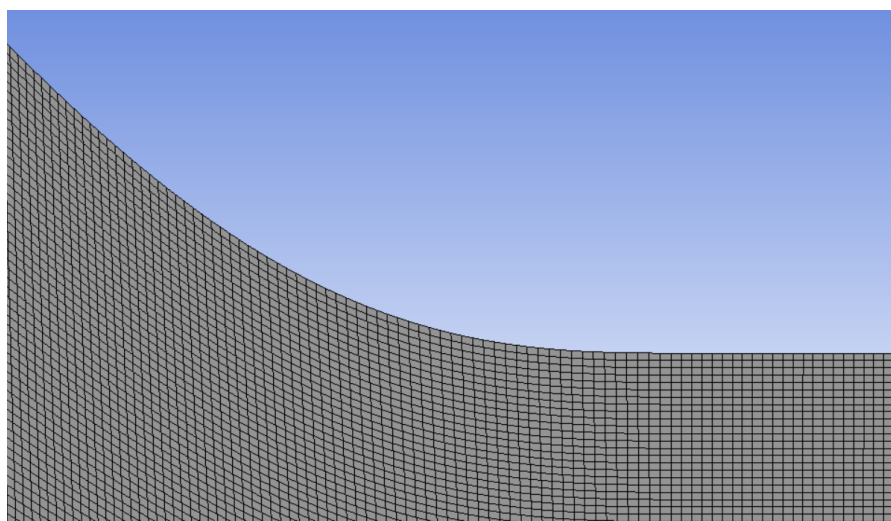


Figura 105. Túnel 2D completo. Detalle de mallado normal.

Esta malla tiene un total de 374919 caras, 186714 celdas y 188206 nodos. La comprobación de su calidad es la siguiente:

```
Domain Extents:  
x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 2.675035e+00  
y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 4.000000e-01  
Volume statistics:  
  minimum volume (m3): 2.624927e-06  
  maximum volume (m3): 6.369636e-06  
  total volume (m3): 6.765165e-01  
Face area statistics:  
  minimum face area (m2): 1.449275e-03  
  maximum face area (m2): 2.898627e-03  
Checking mesh.....  
Done.  
  
Mesh Quality:  
  
Minimum Orthogonal Quality = 6.68532e-01 cell 128280 on zone 5 (ID: 23599 on partition: 0) at location ( 6.81850e-01, 2.85993e-01)  
Maximum Aspect Ratio = 2.94046e+00 cell 128225 on zone 5 (ID: 25669 on partition: 0) at location ( 7.04536e-01, 2.62075e-01)
```

Figura 106. Comprobación de calidad del mallado normal del túnel completo.

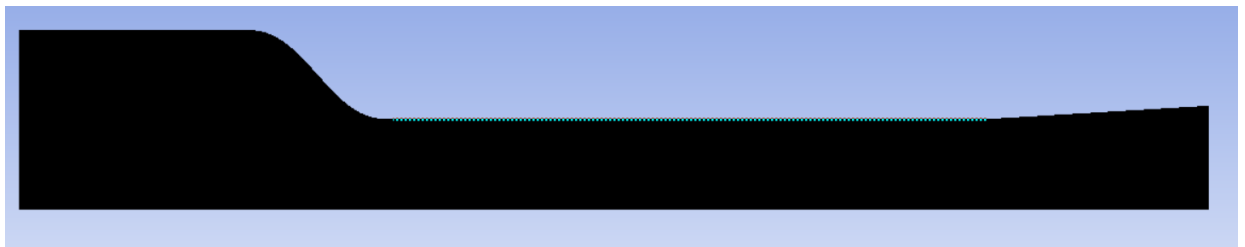


Figura 107. Túnel 2D completo. Mallado de capa límite.

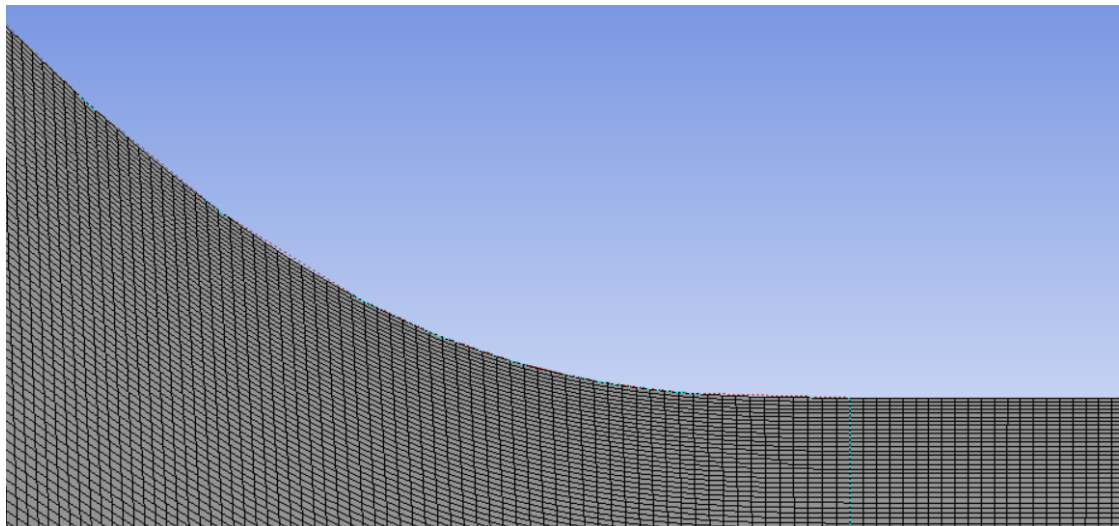


Figura 108. Túnel 2D completo. Detalle de mallado de capa límite.

Esta malla tiene un total de 374919 caras, 186714 celdas y 188206 nodos. La comprobación de su calidad es la siguiente:

```
Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 2.675035e+00
y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 4.000000e-01
Volume statistics:
minimum volume (m3): 1.123348e-06
maximum volume (m3): 1.171487e-05
total volume (m3): 6.765165e-01
Face area statistics:
minimum face area (m2): 5.822493e-04
maximum face area (m2): 5.822493e-03
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 6.67722e-01 cell 122738 on zone 5 (ID: 13939 on partition: 0) at location ( 6.81844e-01, 2.86615e-01)
Maximum Aspect Ratio = 5.40602e+00 cell 122661 on zone 5 (ID: 16837 on partition: 0) at location ( 7.13915e-01, 2.53378e-01)
```

Figura 109. Comprobación de calidad del mallado de capa límite del túnel completo.

3.4.2. Configuración de la simulación del túnel completo.

Para realizar la simulación numérica, se ha aplicado un modelo k-ε Realizable, con condiciones de contorno internas, que son del tipo Porous Jump, indicando la existencia de los filtros. Para ello es necesario calcular la pérdida de carga secundaria que realiza cada uno de estos elementos (expresada en m⁻¹), para ello se utiliza la siguiente correlación (34):

$$Eu = \begin{cases} \left[2,9 - 3,79 \frac{t}{d_h} \beta^{0,4} + 1,79 \left(\frac{t}{d_h} \right)^2 \beta^{0,8} \right] K_{LA} & \frac{t}{d_h} \beta^{0,4} < 0,9 \\ \left(0,876 + 0,069 \frac{t}{d_h} \beta^{0,4} \right) K_{LA} & \frac{t}{d_h} \beta^{0,4} > 0,9 \end{cases} \quad (30)$$

Donde t es el espesor de la rejilla, d_h es el diámetro hidráulico del agujero de la rejilla y β es el diámetro aparente, que se define como la raíz cuadrada del área total de los agujeros entre el área total de la sección de tubería (de la entrada del túnel de viento en este caso). K_{LA} toma el siguiente valor (34):

$$K_{LA} = 1 - \frac{2}{\beta^2} + \frac{2}{\beta^4} \left(1 - \frac{1}{C_c} + \frac{1}{2C_c^2} \right) \quad (31)$$

Y C_c (34):

$$C_c = 0,596 + 0,0031 e^{\frac{\beta}{0,206}} \quad (32)$$

Finalmente, realizando los correspondientes cálculos con un script de Matlab, se obtiene que el valor del coeficiente para la rejilla *honeycomb* es de 0,2883 y el de la rejilla de malla cuadrada es de 4,421.

Después se introducen las condiciones de contorno para este problema, siendo presión atmosférica a la entrada y presión de 120 Pa a la salida junto con la curva de funcionamiento del ventilador mediante la opción Exhaust-Fan. Para introducir la curva se utiliza la ecuación de la figura 58. En ella se ha aplicado un cambio de variable al caudal para transformarlo en velocidad (que es la variable independiente que acepta Fluent) sabiendo que en la sección de salida (donde se ubica el ventilador):

$$Q = v \cdot A = 0,4 \cdot 0,4 \cdot v = 0,16v \quad (33)$$

La ecuación del ventilador es la siguiente:

$$\Delta P_{VENTILADOR} = -0,9539v^2 - 15,962v + 620,08 \quad (34)$$

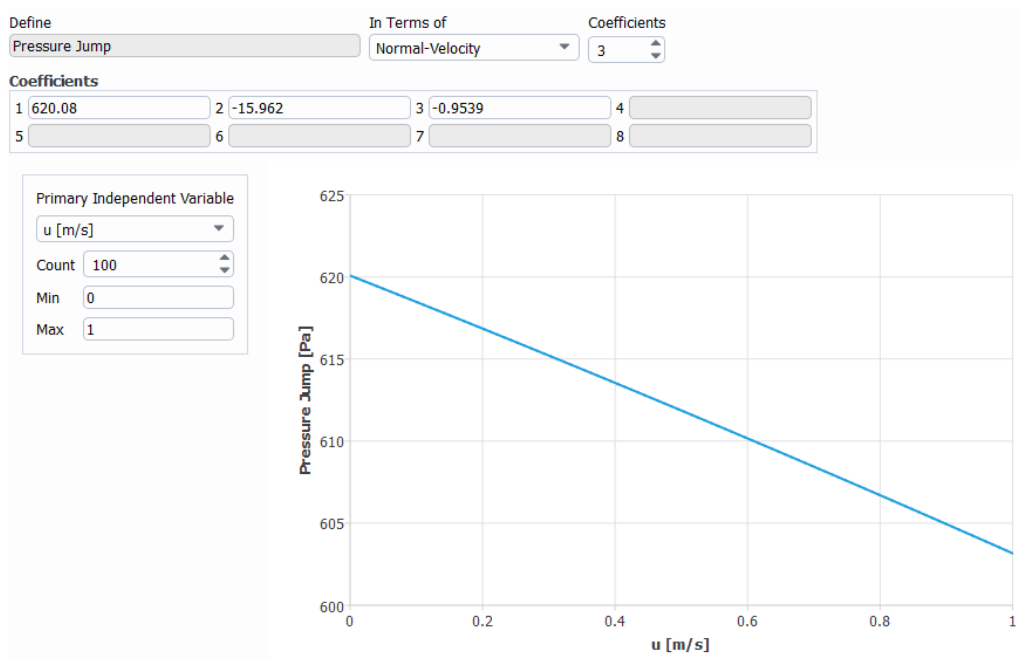


Figura 110. Curva del ventilador en Ansys Fluent.

Finalmente los resultados de ambas simulaciones son los siguientes:

Simulación con mallado normal:

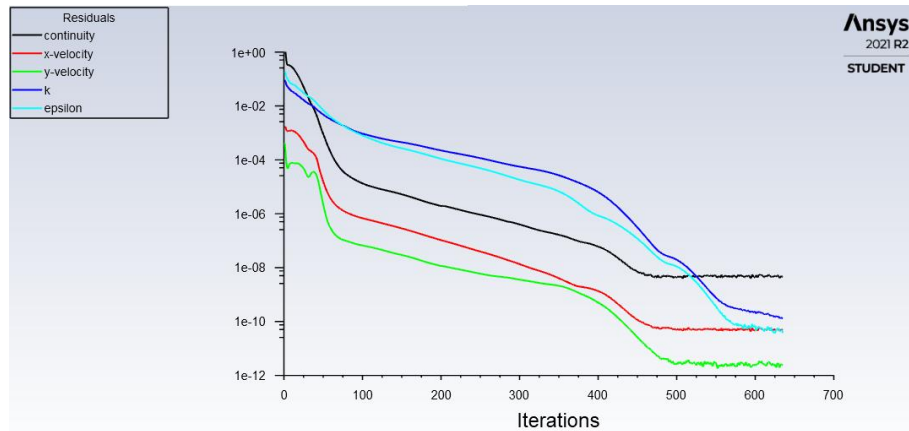


Figura 111. Residuales. Simulación túnel completo con mallado normal.

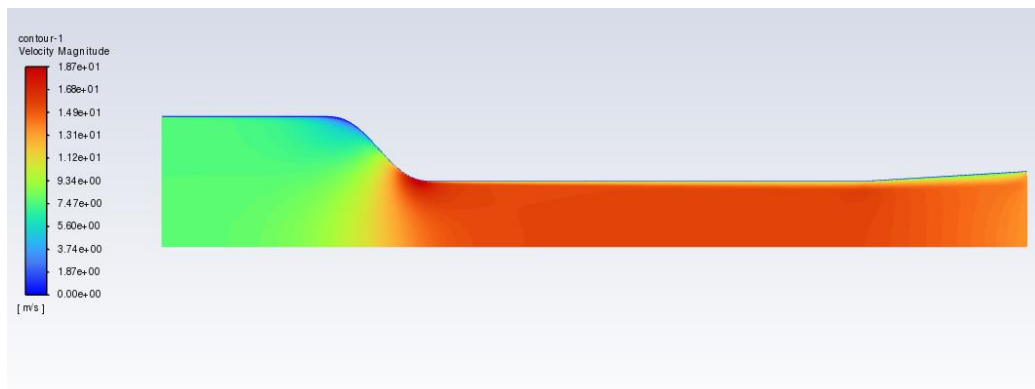


Figura 112. Contorno de velocidad. Simulación túnel completo con mallado normal.

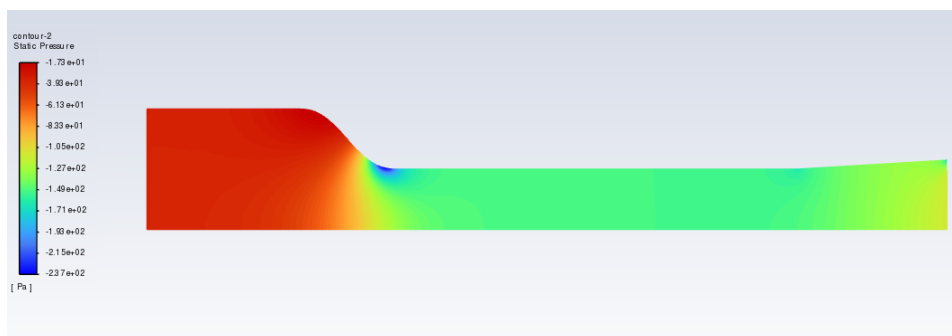


Figura 113. Contorno de presión. Simulación túnel completo con mallado normal.

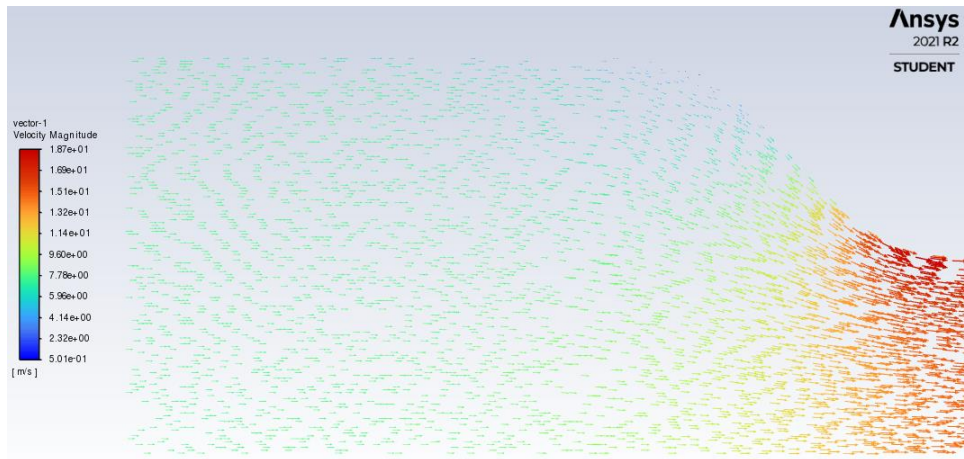


Figura 114. Vectores de velocidad 1. Simulación con mallado normal.

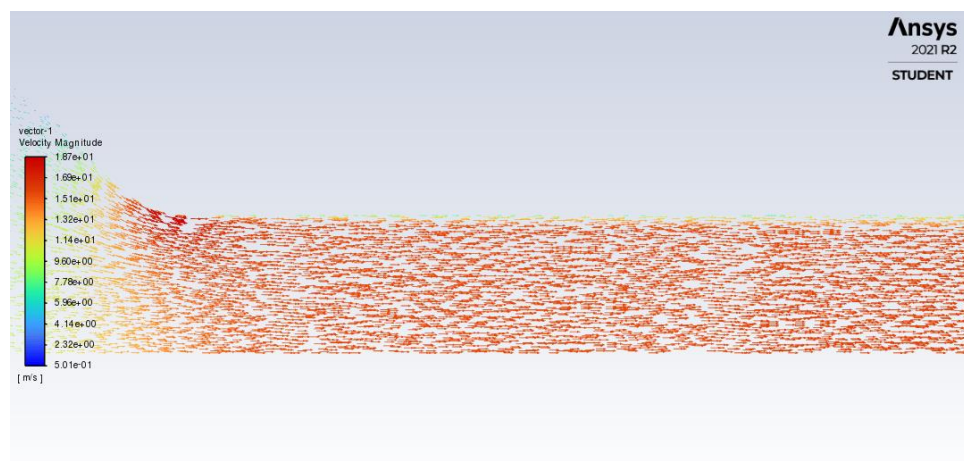


Figura 115. Vectores de velocidad 2. Simulación con mallado normal.

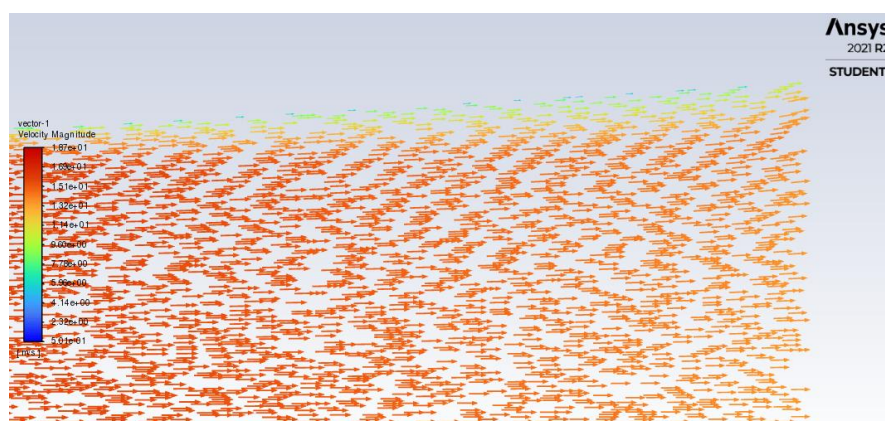


Figura 116. Vectores de velocidad 3. Simulación con mallado normal.

$$Re = 4,38 \cdot 10^3 \quad (35)$$

Los residuales de la simulación indican una buena convergencia, por lo tanto los resultados obtenidos son fiables. El contorno de velocidad muestra valores invariables en las secciones constantes como la entrada o la sección de medida, por lo que el flujo en esas zonas es uniforme. Dicha velocidad aumenta notablemente en su paso por la tobera y disminuye en el difusor, aunque en poca cantidad debido a que el difusor tiene un aumento de sección muy pequeño y no tiene gran longitud. En el contorno de presión se observa una expansión (disminución de presión) en el paso por la tobera y un ligero aumento en el difusor. Gracias a los vectores de velocidad es posible visualizar la dirección del flujo, comprobando de forma cualitativa que este es uniforme a la salida de la tobera y paralelo al eje del túnel en la cámara de ensayo.

Simulación con mallado fino en la capa límite:

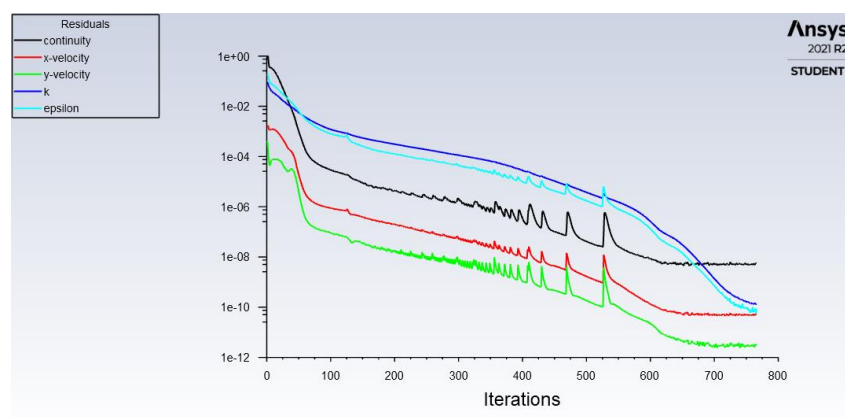


Figura 117. Residuales. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.

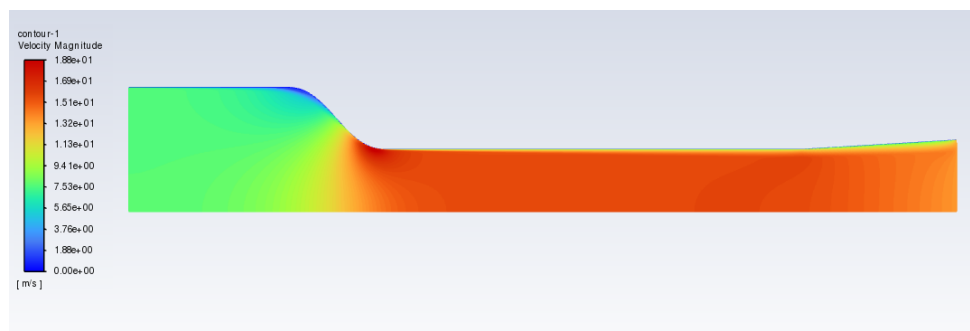


Figura 118. Contorno de velocidad. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.

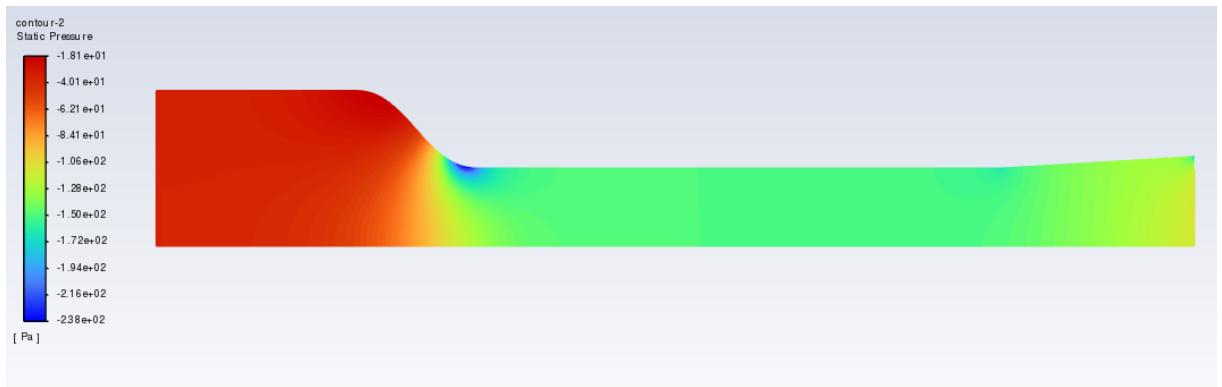


Figura 119. Contorno de presión. Simulación túnel completo con malla final en la capa límite.

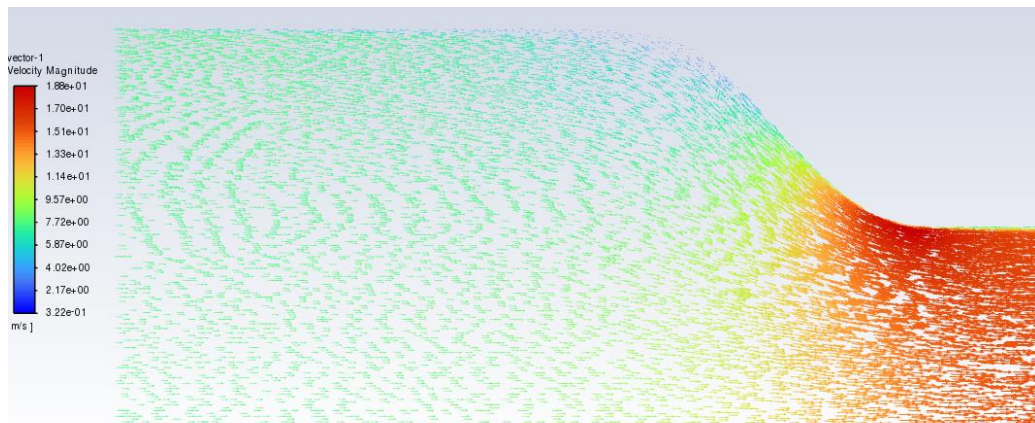


Figura 120. Vectores de velocidad 1. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.

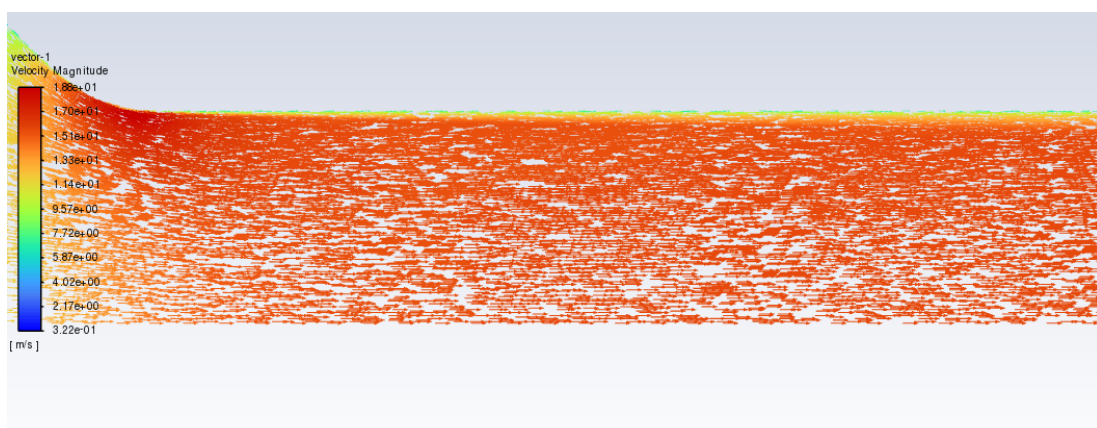


Figura 121. Vectores de velocidad 2. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.

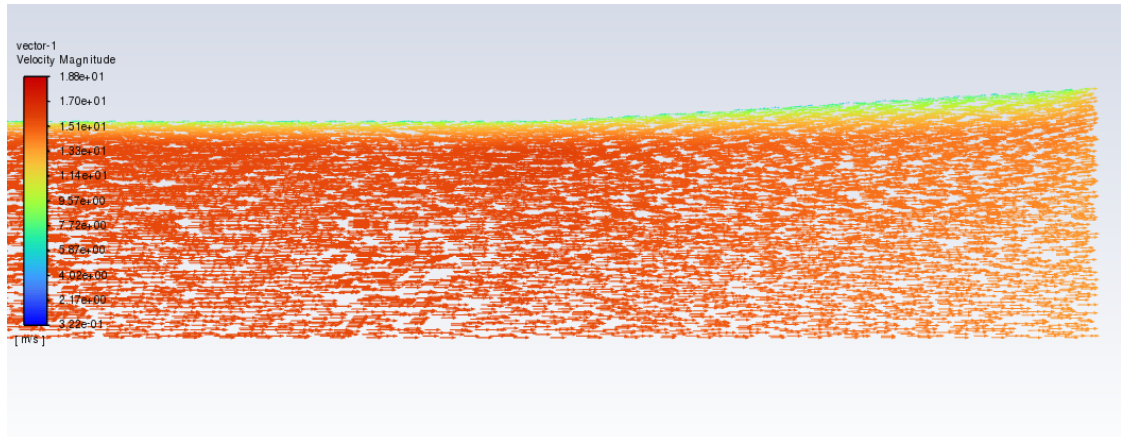


Figura 122. Vectores de velocidad 3. Simulación túnel completo con malla fina en la capa límite.

$$Re = 4,38 \cdot 10^3 \quad (36)$$

Se puede observar una gran similitud entre los resultados obtenidos en ambas simulaciones, por lo que es posible afirmar que los resultados son independientes del mallado realizado. Existe un pequeño desprendimiento de la capa límite en el difusor, pero de tamaño despreciable, además de una pequeña caída de velocidad y un aumento de presión en el mismo. El flujo es uniforme en la sección de ensayo, lo que indica que el estudio previo de la tobera es correcto y los resultados de los experimentos realizados en el túnel de viento son fiables.

La velocidad a la salida del túnel de viento es muy similar independientemente del mallado, tal y como se indica en la siguiente tabla:

Simulaciones del túnel completo en 2D				
Nº Malla	Nº Caras	Nº Celdas	Nº Nodos	V _{salida} (m/s)
1	374919	186714	188206	13,46
2	374919	186714	188206	13,48

Tabla 4. Comparación de las mallas de las simulaciones 2D del túnel completo.

4. Construcción del túnel.

El túnel de viento construido es el siguiente:



Figura 123. Túnel de viento finalizado. Vista posterior.

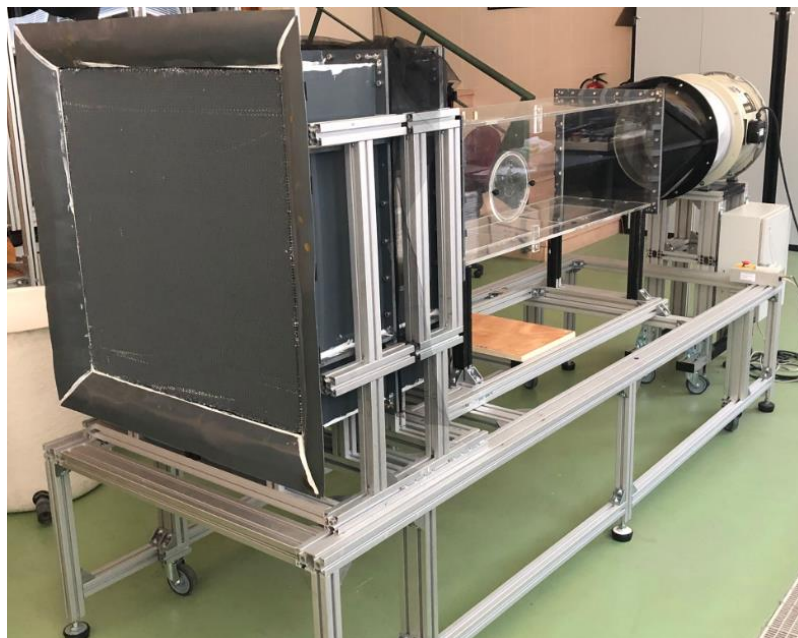


Figura 124. Túnel de viento finalizado. Vista anterior.

Los materiales con los que estará construido el túnel de viento son fundamentalmente metacrilato y PVC, aunque se utilizarán perfiles metálicos de aluminio para crear una estructura que soporte el túnel en su parte inferior y lateral.

Es importante construir el túnel de forma que sea transportable, es por ello que en su parte inferior llevará unas patas rodadas y con apoyos, que podrán ajustarse manualmente permitiendo el traslado del túnel completo o su apoyo a gusto del usuario. También se fabricará de forma que sea desmontable, pudiendo deshacer las uniones atornilladas que unen los componentes para favorecer el transporte y almacenamiento cuando no sea necesario su uso.

Las láminas de PVC y metacrilato son las siguientes:



Figura 125. Láminas de metacrilato y PVC.

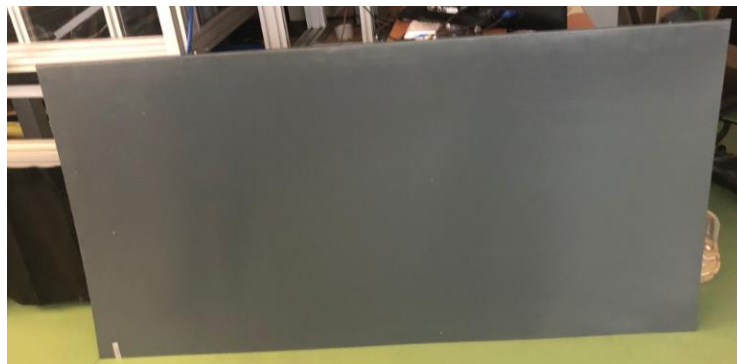


Figura 126. Láminas de PVC.

Se trata de láminas de gran tamaño difíciles de cortar, por lo que se aplicará el método de corte con chorro de agua para la mayoría de los componentes. Este consiste en la aplicación de un chorro muy fino de agua a gran velocidad que puede cortar distintos materiales y es muy aplicado en técnicas de mecanizado. Es un proceso en frío, por lo tanto el PVC no se ve afectado por el calor que se generaría con otros métodos de corte, además de que no existen tensiones residuales. Sin embargo, es bastante más caro que otros métodos por su alto consumo de electricidad y por el tiempo de espera que se requiere para su uso.

4.1. Soporte inferior.

Se utilizan barras de perfil de aluminio de 45x45 mm y de 45x90 mm que permiten soportar el peso de los distintos componentes del túnel de viento. Son las siguientes:

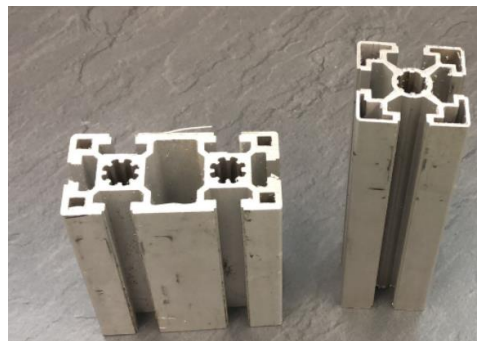


Figura 127. Perfiles del soporte.

Algunas barras se pueden unir mediante escuadras que ejercen de nervios entre ellas. Es posible atornillarlas fijando así los perfiles:



Figura 128. Conexión de barras con escuadras.

Aunque también pueden aprovecharse los huecos de los perfiles para atornillar directamente la unión entre dos barras con un conjunto tornillo y tuerca M8.



Figura 129. Unión atornillada de las barras.

Por otro lado, debido a la necesidad de apoyo y transporte del túnel de viento, se añaden unas patas que elevan la cámara de ensayo a una altura de 1 m.

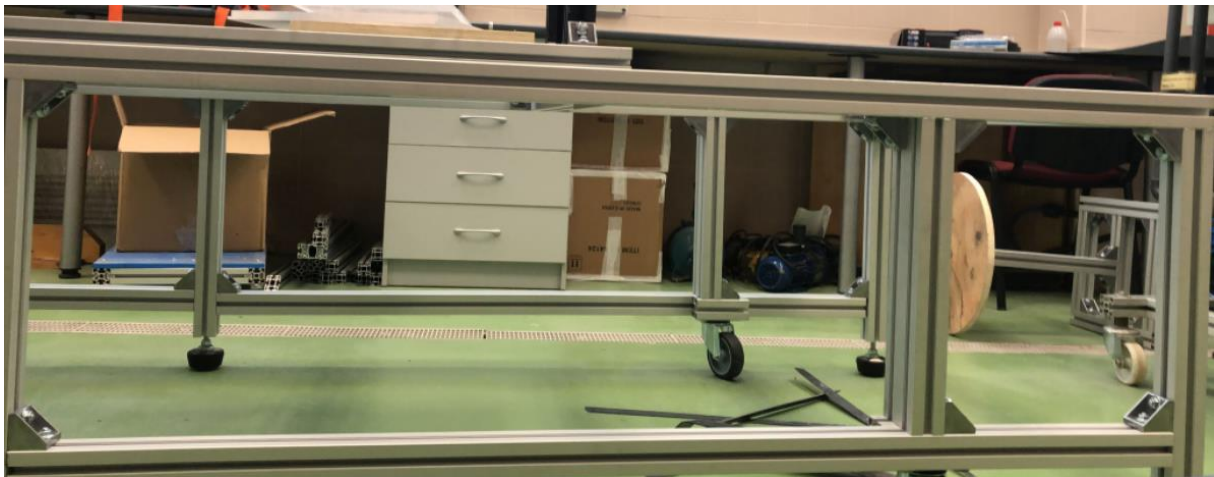


Figura 130. Patas del soporte.

Como se puede observar en la imagen anterior, existen dos tipos de patas, unas con apoyo fijo y otras con ruedas, que pueden elevarse ligeramente para permitir un apoyo estable o el movimiento (en caso de que se transporte). Se muestran a continuación con más detalle:



Figura 131. Apoyo inferior.



Figura 132. Rueda inferior.

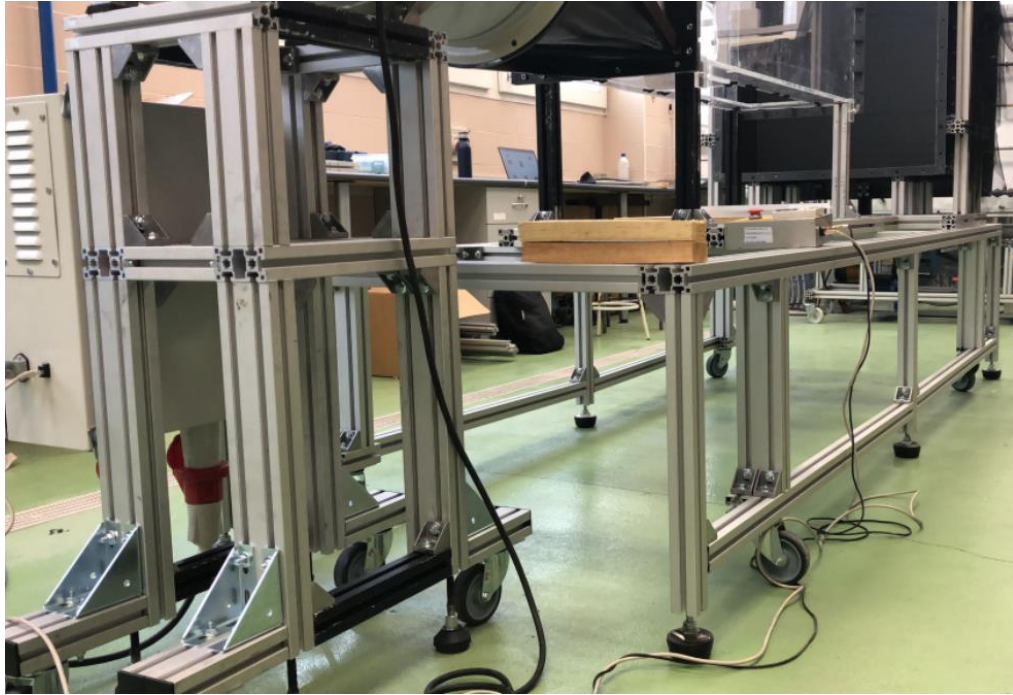


Figura 133. Soporte completo.

4.2. Entrada.

Se compone de cuatro láminas de PVC de 30 cm de ancho y otras cuatro de 20 cm de ancho que se recortan manualmente. También tiene las mismas costillas de apoyo mostradas en la descripción del túnel junto con cuatro paneles doblados al principio que favorecen la entrada de aire, reduciendo así las pérdidas de carga. Estos paneles se han hecho aplicando calor, que permite deformar el material con más facilidad.



Figura 134. Paneles iniciales.

La estructura que rodea a los paneles interiores es:



Figura 135. Refuerzos de la entrada.

Ensamblado queda de la siguiente forma:

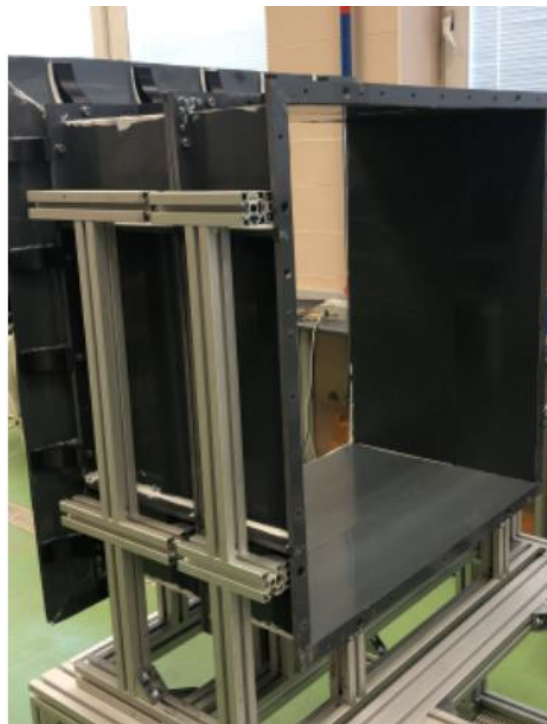


Figura 136. Entrada construida.

Después se corta el filtro de malla rectangular con las dimensiones de la entrada y se colocan este y el filtro *honeycomb*.



Figura 137. Filtro de tela.



Figura 138. *Honeycomb* introducido en la entrada.



Figura 139. Rejilla de malla rectangular introducida en la entrada.

4.3. Contracción.

Está conformada por cuatro láminas de PVC junto con las costillas de la estructura. Estas últimas se han elaborado mediante el corte por chorro de agua y las láminas mediante doblado en caliente, debido a que debe reducirse lo máximo posible el error entre el diseño y el modelo real en la tobera para disminuir al mínimo posible las pérdidas de carga antes de la cámara de ensayo. De forma adicional se han atornillado las costillas entre sí para dar una rigidez mayor y evitar así las vibraciones en los ensayos. Se adjuntan a continuación las imágenes de la construcción de la contracción:



Figura 140. Perfil de contracción plano.

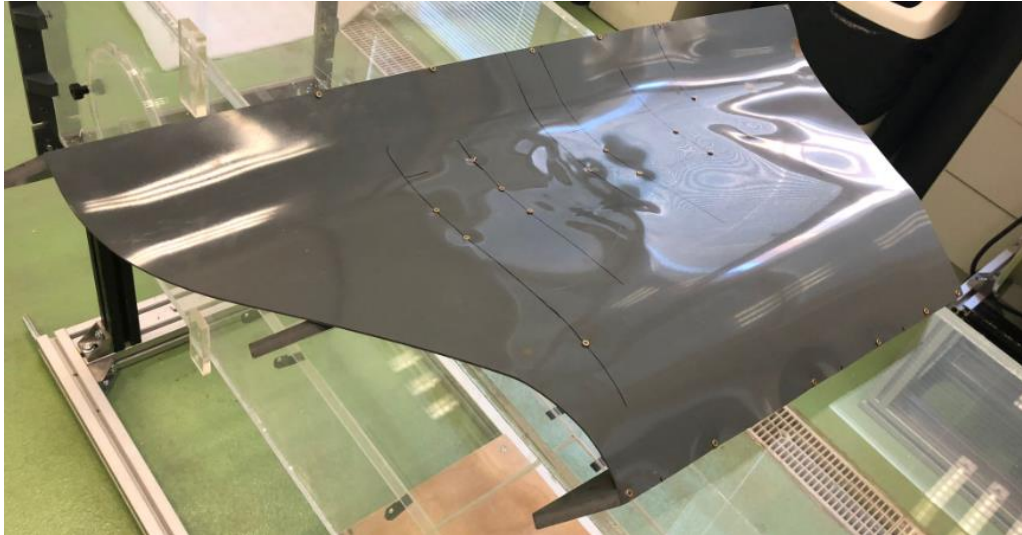


Figura 141. Perfil de contracción doblado.

Para realizar el doblado de la figura anterior es necesario aplicar calor con un soplete para aumentar la deformación de la lámina de PVC. Después se utilizará como molde el marco 3 de la contracción (cuyo plano se adjunta en la figura 214 del anexo I), que tiene la forma de la curva de contracción calculada en apartados anteriores. Después, se colocan unos tornillos que permiten que el perfil se mantenga con esa forma.

Para hacer la estructura de la tobera se realizan agujeros y se atornillan las costillas curvas con las rectas de la siguiente forma:



Figura 142. Uniones atornilladas en las costillas de la tobera.



Figura 143. Estructura de la tobera finalizada.

Juntando todos los elementos:



Figura 144. Tobera construida.

Después de aplicar el doblado en la placa de PVC utilizada para la tobera, aparecen unas irregularidades en su superficie (causadas por los tornillos en su interior), que serán eliminadas aplicando material que tapaná los tornillos y otras zonas irregulares, siendo lijadas posteriormente. Una vez se haya realizado esto, se pintará la superficie inferior de la tobera consiguiendo así una superficie lisa en su interior.

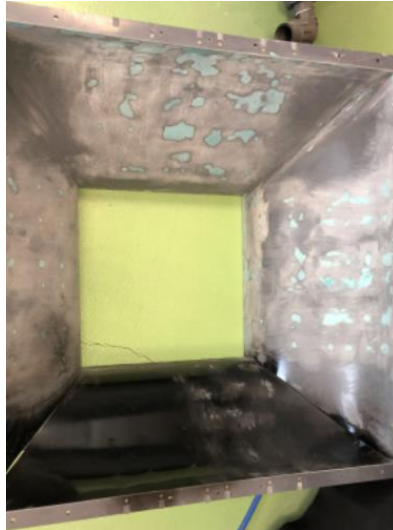


Figura 145. Tobera lijada.



Figura 146. Tobera pintada.



Figura 147. Tobera finalizada.

4.4. Sección de medida.

Tiene cuatro láminas de metacrilato de 1 cm de espesor que ha sido recortado también con el corte por chorro de agua. Se caracteriza por tener una compuerta en la parte lateral y otra en la inferior para poder acceder al ensayo y colocar el material o extraerlo con facilidad. También tiene cuatro patas inferiores que sirven como soporte y para colocar su sección de entrada a la altura de la sección de salida de la tobera y de entrada del difusor. Se muestra a continuación:

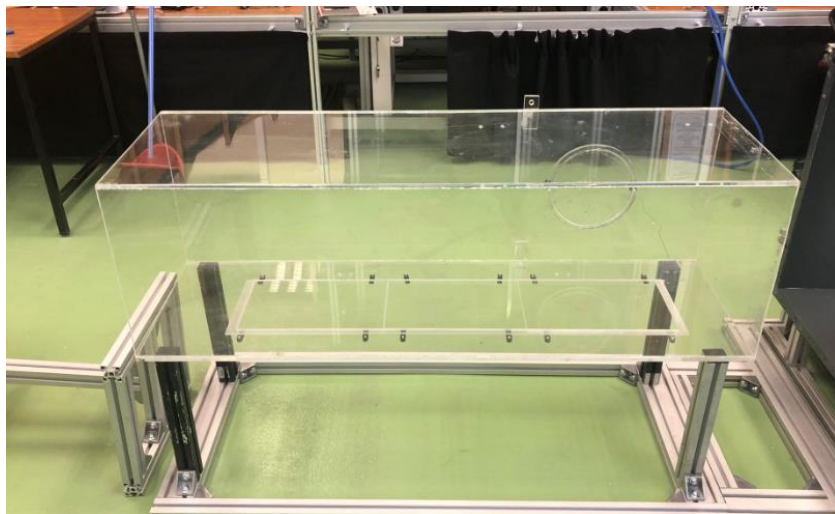


Figura 148. Sección de medida construida.

Después se colocan los marcos de entrada, salida. Estos poseen unas piezas adicionales que sirven para permitir un mayor agarre al metacrilato.



Figura 149. Marco de la zona de ensayo.

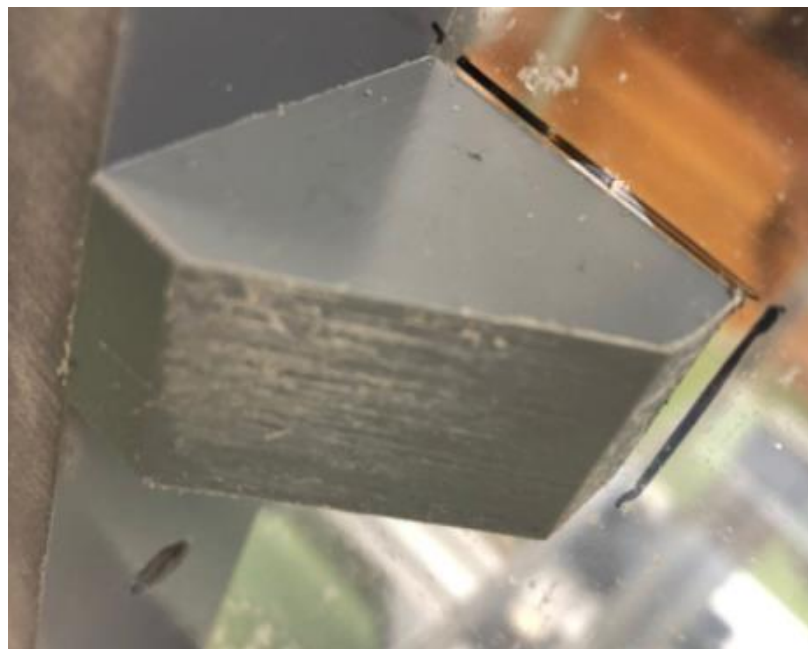


Figura 150. Piezas adicionales.

La compuerta lateral es redonda y está compuesta por un agujero y una tapadera que puede acoplarse con unos tornillos para acceder con facilidad a la cámara interior, mientras que la inferior utiliza unos cierres que permiten el agarre de la tapadera inferior.



Figura 151. Tapadera lateral de la zona de ensayo.



Figura 152. Compuerta lateral de la zona de ensayo.

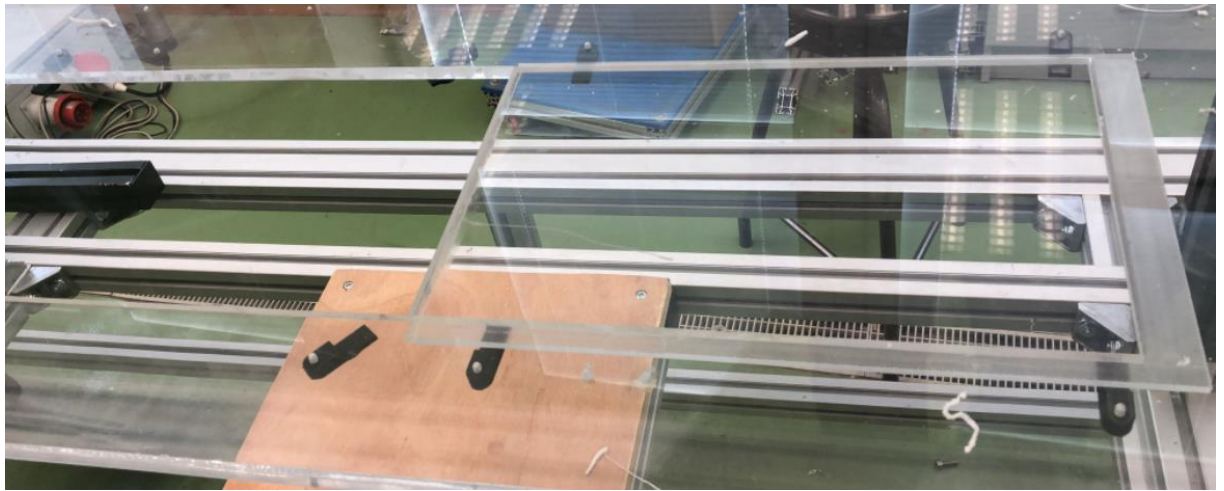


Figura 153. Compuerta inferior y cierres.

Después se crea una nueva compuerta en la zona superior con agujeros que pueden ser cubiertos por unos tapones junto con unos agujeros en una de las compuertas inferiores. La finalidad de esto es poder introducir aparatos de medida en el interior de la cámara de ensayo tales como anemómetros de hilo caliente o tubos de Pitot.



Figura 154. Compuerta superior de la sección de medida.

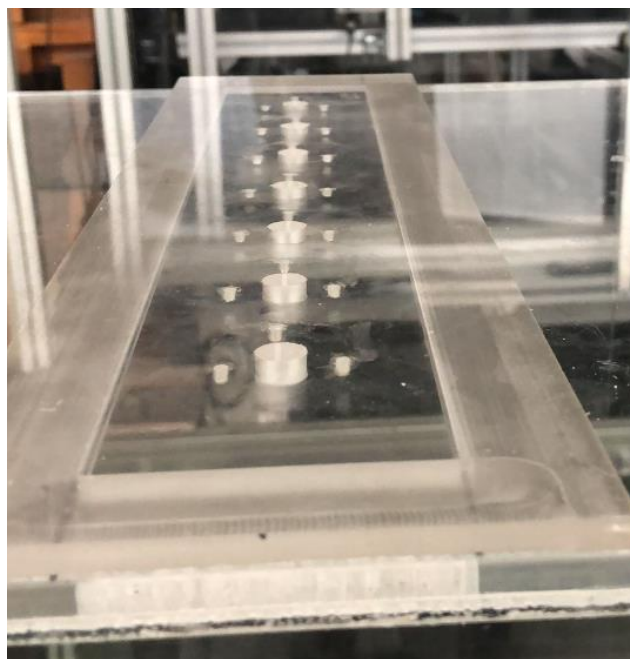


Figura 155. Agujeros de la compuerta superior.

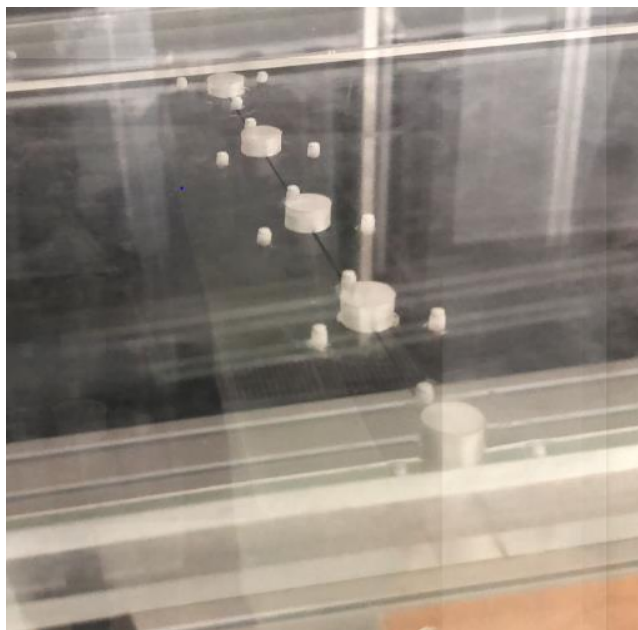


Figura 156. Agujeros de la compuerta inferior.



Figura 157. Tapones de los agujeros de las compuertas.

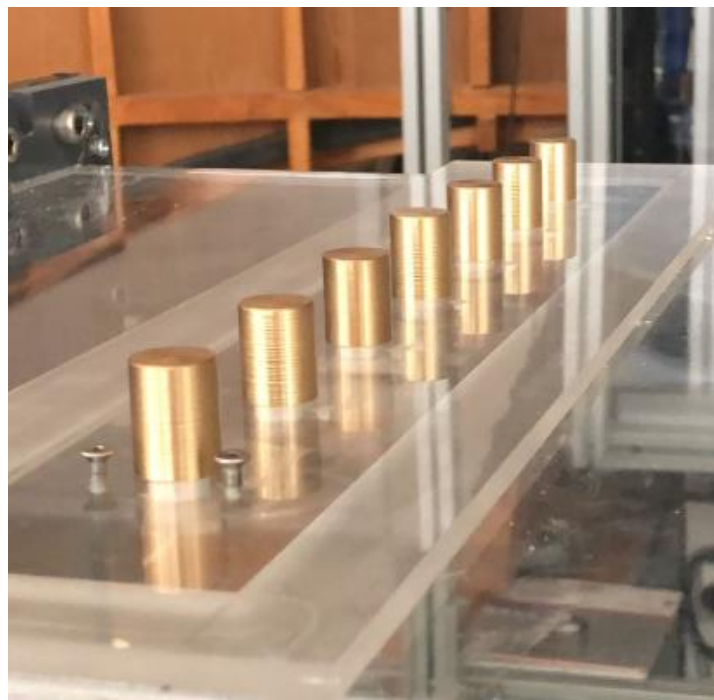


Figura 158. Agujeros de la compuerta superior tapados.

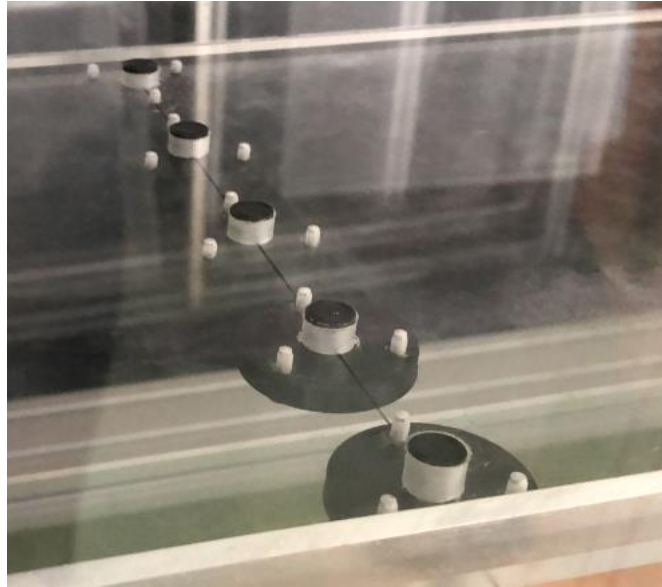


Figura 159. Agujeros de la compuerta inferior tapados.

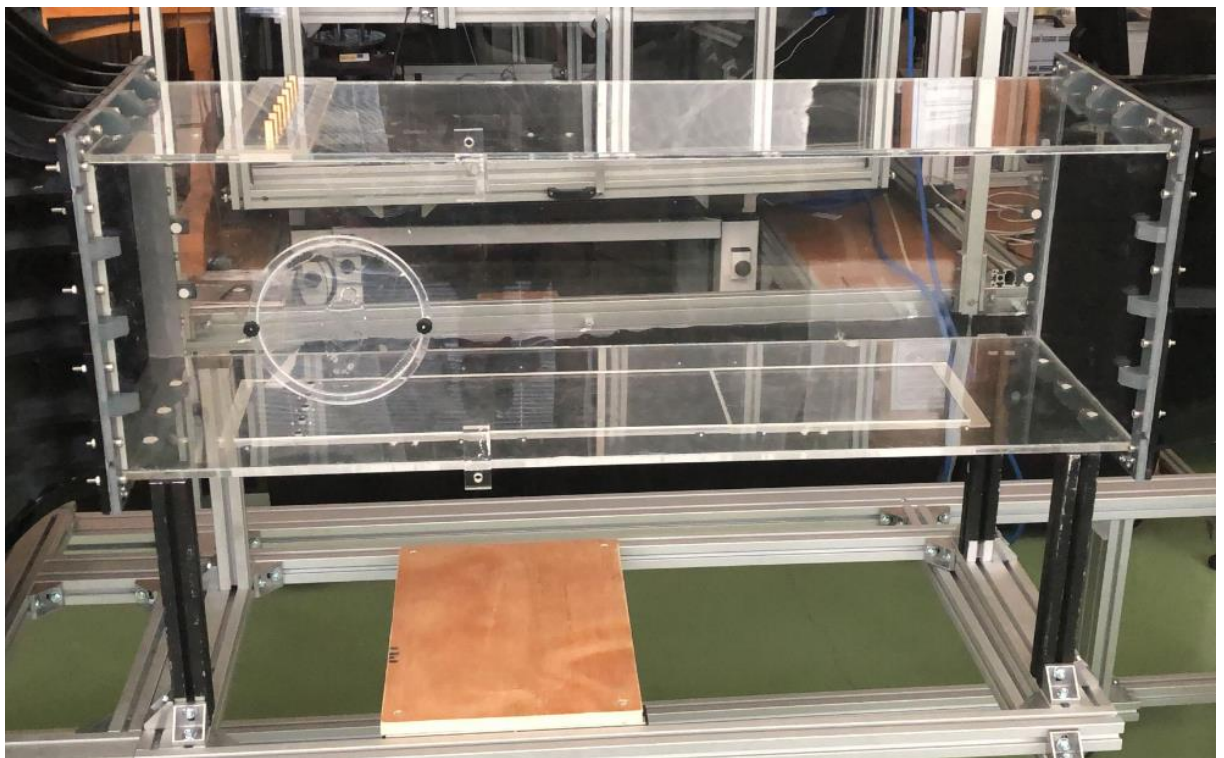


Figura 160. Sección de medida finalizada.

4.5. Difusor.

El primer paso es realizar el corte de los componentes principales para ensamblarlos después (todos los cortes de este componente se realizan en el corte por chorro de agua).



Figura 161. Triángulos del difusor.



Figura 162. Costillas del difusor.



Figura 163. Marco redondo del difusor.

En esta última pieza es importante que las dimensiones del radio interior y exterior junto con la posición y diámetro de los pasantes coincida con los correspondientes al marco del fleje y el ventilador.

Después se unirán cuatro de los triángulos con la estructura del difusor, quedando de la siguiente manera:

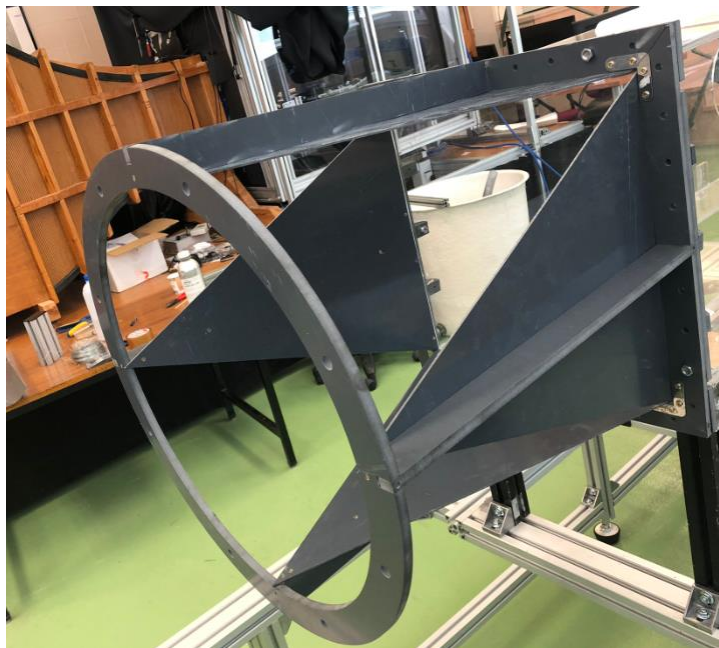


Figura 164. Unión de estructura y triángulos.

Y los cuatro triángulos restantes se doblarán en caliente, siendo los que permitan el cambio de geometría en la sección de cuadrada a circular.



Figura 165. Triángulo doblado.

Para realizar bien el doblado se ha creado un soporte compuesto por perfiles que forman la sección cuadrada de salida de la zona de ensayo y una plataforma redonda de madera con las dimensiones de salida del difusor, que han servido como molde para conseguir la forma redonda deseada.

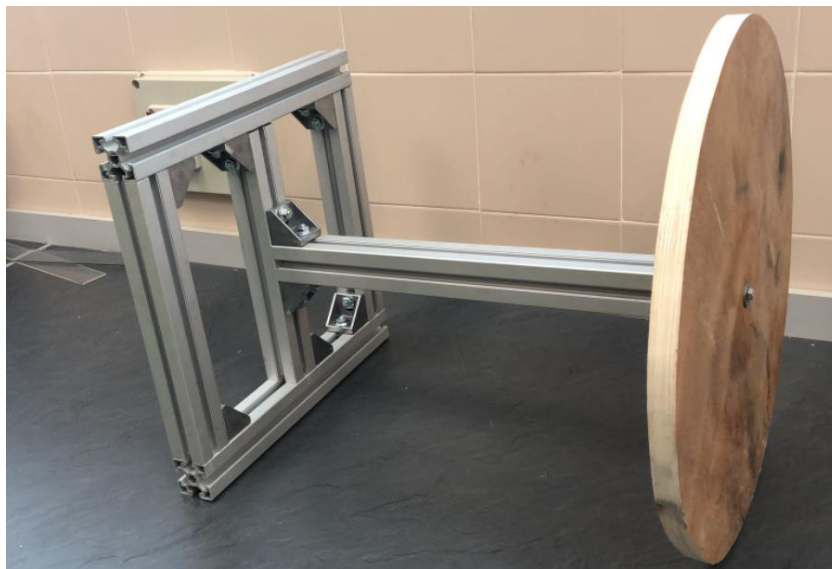


Figura 166. Molde para los triángulos doblados.

Una vez se han obtenido todas las piezas, estas se unen y se tapan los huecos, añadiendo material que será lijado y pintado posteriormente para no afectar negativamente a la rugosidad superficial del difusor.



Figura 167. Difusor con material añadido y lijado.

El difusor terminado es el siguiente:

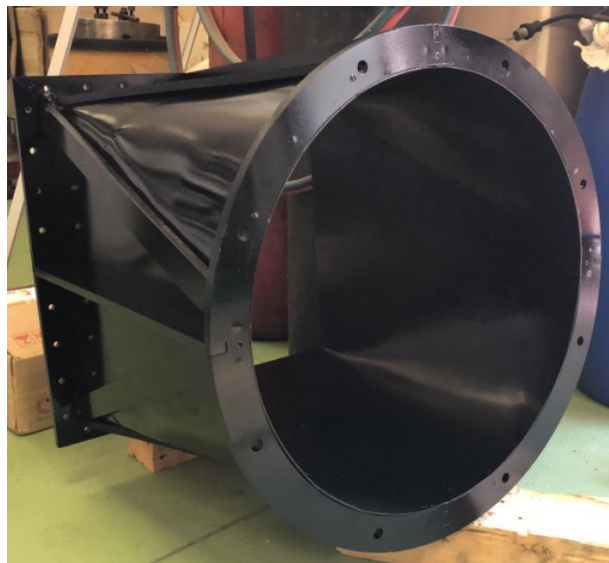


Figura 168. Difusor terminado.

4.6. Fleje y ventilador.

El fleje y el ventilador no requieren de una fabricación previa al tratarse de materiales pedidos a empresas externas. Sin embargo es necesario realizar una configuración importante para adaptar la potencia del ventilador a la deseada en el ensayo. Para ello se puede aprovechar que el ventilador funciona con un motor asíncrono de corriente eléctrica, el cual puede ir conectado con un variador que permite cambiar la frecuencia de entrada para conseguir reducir la potencia mediante un mando de control externo. Para ello se realizan las conexiones de arranque en estrella del motor del ventilador:

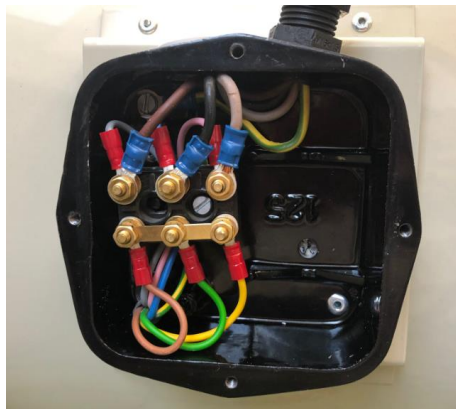


Figura 169. Conexiones para arranque en estrella.

El esquema de fuerza para el ventilador es el siguiente:

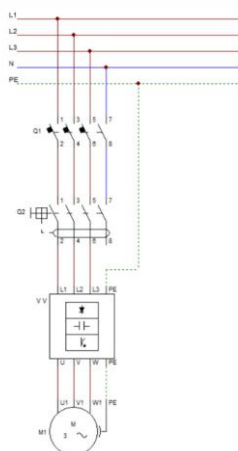


Figura 170. Esquema de fuerza del ventilador.

Después, se crea una estructura de soporte para el ventilador, en la que se acoplará el variador con los elementos anteriormente mencionados:

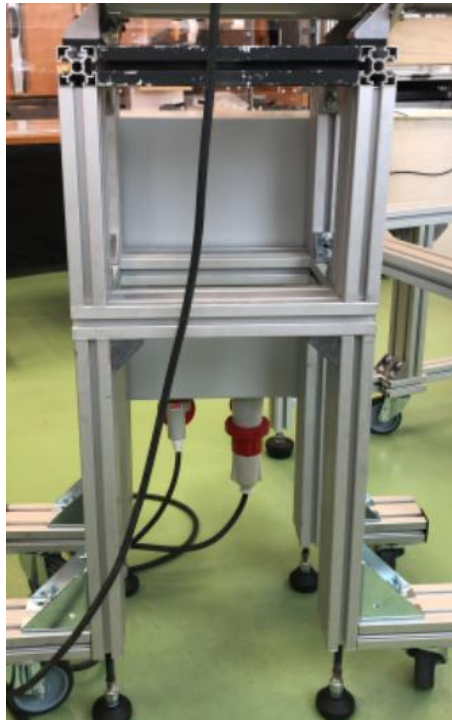


Figura 171. Soporte del ventilador.



Figura 172. Variador acoplado al soporte.

Finalmente, debe adaptarse el ventilador para que su eje sea coincidente con el del resto de componentes del túnel de viento, esto es importante para que las medidas de velocidad en la cámara de ensayo sean correctas.

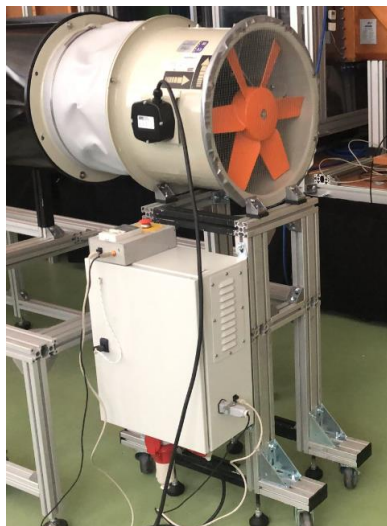


Figura 173. Ventilador y fleje adaptados.

4.7. Presupuesto.

Una vez terminado el túnel, se ha elaborado un presupuesto que incluye el coste material del trabajo. Se ha utilizado la herramienta Presto para ello, dividiendo el problemas en varios apartados (planchas, ventilador, variador, rejillas, perfilería, herraje y mano de obra). Se obtienen los siguientes resultados:

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
01	Planchas							
0001	u Plancha PVC Gris 2000x1000x2 mm Plancha de 2 mm de espesor que será recortada mediante el método de corte por chorro de agua y utilizada para los componentes principales del túnel (entrada, tobera y difusor).							
						3,00	44,62	133,86
0002	u Plancha PVC Gris 2000x1000x10 mm Plancha de PVC de 1 cm de espesor que se utiliza para las costillas de soporte del túnel de viento.							
						1,00	176,00	176,00
0003	u Pl. Metacrilato XT 1523x2050x10 mm Plancha de metacrilato transparente utilizada para la cámara de ensayo.							
						2,00	238,00	476,00
TOTAL 01								785,86

Figura 174. Presupuesto de las planchas.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
02	Ventilador							
0004	u Ventilador 1003066 HCT-45-2T-2/AL IE3 Ventilador helicoidal tubular. Versión PL, equipado con hélice de plástico y motor monofásico de 230 V y 50 Hz.							
						1,00	661,68	661,68
0005	u Accesorio elástico con bridas. BAC-450-1007124 Fleje anterior al ventilador que permite el ajuste a la sección del mismo desde el difusor.							
						1,00	205,21	205,21
TOTAL 02.....								866,89

Figura 175. Presupuesto del ventilador.

Presupuesto Túnel de Viento								
CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
03	Variador							
0006	u Variador Regulador que permite el control y variación de la frecuencia eléctrica de entrada al motor del ventilador y determina así la potencia del mismo.							
						1,00	1.200,00	1.200,00
0007	u Ventilador Axial Sunon de 60x60x20 mm 12 V dc, 1.71W, caudal 25.5 cfm, IP Ventilador de pequeño tamaño instalado en el interior del variador que permite evitar sobra calentamiento de los elementos en su interior.							
						2,00	12,40	24,80
0008	u Fuente de alimentación de montaje en carril DIN RS PRO, 1 salida 12 Vdc 1.2A 15 W Fuente de alimentación de 12 V de corriente continua que permite el funcionamiento de elementos en el interior del variador.							
						1,00	19,45	19,45
TOTAL 03.....								1.244,25

Figura 176. Presupuesto del variador.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
04	Rejillas							
0009	ud Alunid 3000-D1/4 56 L800 W800 PT150 EXP Rejilla tipo honeycomb en forma de panel de abeja que acondiciona el flujo de aire a la entrada del túnel de viento.							
						1,00	603,79	603,79
0010	ud Rejilla de tela Rejilla de tela posterior al honeycomb que permite acondicionar por segunda vez el flujo y introducir una turbulencia controlada en este.							
						1,00	6,00	6,00
TOTAL 04.....								609,79

Figura 177. Presupuesto de las rejillas.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
05	Perfilería							
0011	m Perfil pesado 45x90, aluminio anodizado natural Perfill de 45x90 mm para soporte del túnel de viento.							
						17,20	46,81	805,13
0012	m Perfil básico 45x45 aluminio anodizado natural Perfil de 45x45 mm para soporte del túnel de viento.							
						30,03	18,39	552,25
TOTAL 05.....								1.357,38

Figura 178. Presupuesto de la perfilería.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
06	Herraje							
0013	u Conjunto tornillo cabeza martillo 8.8 M8x25 +tuerca M8 Conjunto de tornillo y tuerca para unión de barras transversales del soporte.					200,00	0,35	70,00
0014	u Escuadra aluminio fundido 42x42x42 Elemento de unión que ejerce función de nervio.					100,00	1,73	173,00
0015	u Escuadra acero zincado 100x100x30 Elemento de unión que ejerce función de nervio.					25,00	3,00	75,00
0016	u Pletina de unión perfiles serie 45 Pletina utilizada para unir los perfiles.					30,00	1,83	54,90
0017	u Fijación ajustable M12, perfil 45 Elemento de unión para los perfiles.					50,00	3,65	182,50
0018	u Apoyos fijos Parte inferior del soporte del túnel de viento que lo mantiene estático.					10,00	2,75	27,50
0019	u Ruedas móviles Parte inferior del túnel de viento que permite su movimiento.					6,00	7,60	45,60
TOTAL 06.....								628,50

Figura 179. Presupuesto del herraje.

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
07	Mano de obra							
0020	h Operario					306,00	7,67	2.347,02
TOTAL 07.....								2.347,02

Figura 180. Presupuesto de mano de obra.

El presupuesto de mano de obra se ha calculado considerando un salario bruto de 16560 €/año y una jornada de 6 horas con horario de 8:30 a 14:30. Por tanto se trabaja un total de 306 horas y cada hora tiene un valor de 7,67 €.

Finalmente:

RESUMEN DE PRESUPUESTO

Presupuesto Túnel de Viento

CAPÍTULO	RESUMEN	IMPORTE	%
01	Planchas	785,86	10,02
02	Ventilador	866,89	11,06
03	Variador	1.244,25	15,87
04	Rejillas	609,79	7,78
05	Perfilería	1.357,38	17,31
06	Herraje	628,50	8,02
07	Mano de obra	2.347,02	29,94
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL		7.839,69	

Asciende el presupuesto a la expresada cantidad de SIETE MIL OCHOCIENTOS TREINTA Y NUEVE EUROS con SESENTA Y NUEVE CÉNTIMOS

Figura 181. Resumen de presupuesto.

Como se puede observar, el precio alcanza el orden de los miles de euros, sin embargo, para el gran consumo de material y recursos que se ha necesitado, es bajo en comparación a las expectativas, demostrando así que los túneles de viento abiertos tienen esta ventaja en comparación con los cerrados. El precio en el mercado de un túnel de estas características es alrededor de los 30.000 euros.

5. Calibración del túnel.

Se llevarán a cabo dos ensayos en este trabajo, el primero de ellos consiste en la calibración del túnel de viento, tomando un punto concreto y midiendo la velocidad que se genera en la cámara de ensayo para distintas frecuencias del variador que está conectado al motor asíncrono del ventilador.

El segundo ensayo consiste en medir la velocidad para una frecuencia del variador concreta en diferentes puntos de una misma sección y comprobar si el flujo es uniforme a la salida de la tobera como se demostró en las simulaciones numéricas y que el aire que entra a la sección de medida tiene las características deseadas.

5.1. Calibración del túnel de viento.

5.1.1. Calibración con anemómetro de hilo caliente.

Se utilizará un anemómetro de hilo caliente que será colocado gracias a unos agujeros de la sección de medida. El objetivo de este experimento es crear una función que relacione la frecuencia y la velocidad para que el usuario del túnel pueda determinar sus condiciones de funcionamiento fácilmente. Se adjunta a continuación unas imágenes del montaje realizado:



Figura 182. Monitor del anemómetro de hilo caliente.



Figura 183. Colocación de varilla del anemómetro de hilo caliente.



Figura 184. Varilla del anemómetro de hilo caliente en el interior del túnel.

El anemómetro de hilo caliente se caracteriza por tener cierta variación en su medida, por lo que para conseguir los resultados de la figura anterior se ha tomado el valor máximo y mínimo medido para cada frecuencia y se ha calculado su valor medio.

vmin /m/s)	vmax (m/s)
0,98	1
1,45	1,47
3,06	3,08
4,67	4,69
6,34	6,36
8,01	8,03
9,67	9,69
11,28	11,3
12,9	12,92
14,5	14,54
16,03	16,07

Tabla 5. Valores máximos y mínimos medidos con anemómetro de hilo caliente.

Los resultados son:

f (Hz)	v (m/s)
3,5	0,99
5	1,46
10	3,07
15	4,68
20	6,35
25	8,02
30	9,68
35	11,29
40	12,91
45	14,52
50	16,05

Tabla 6. Resultados de calibración con anemómetro de hilo caliente.

Y los ajustes:

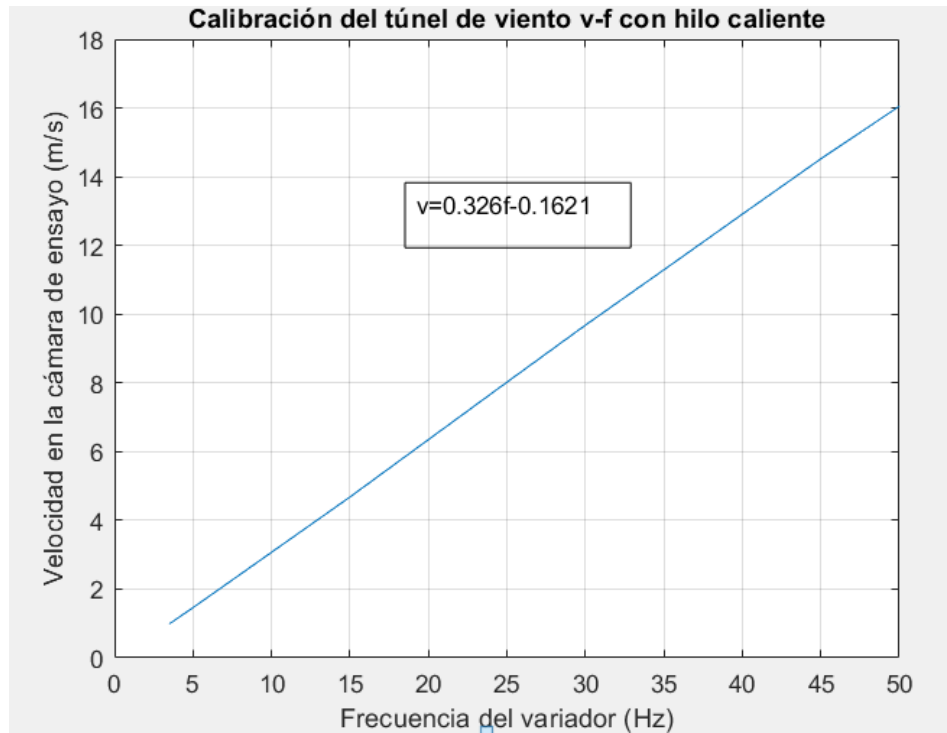


Figura 185. Gráfica v-f con anemómetro de hilo caliente.

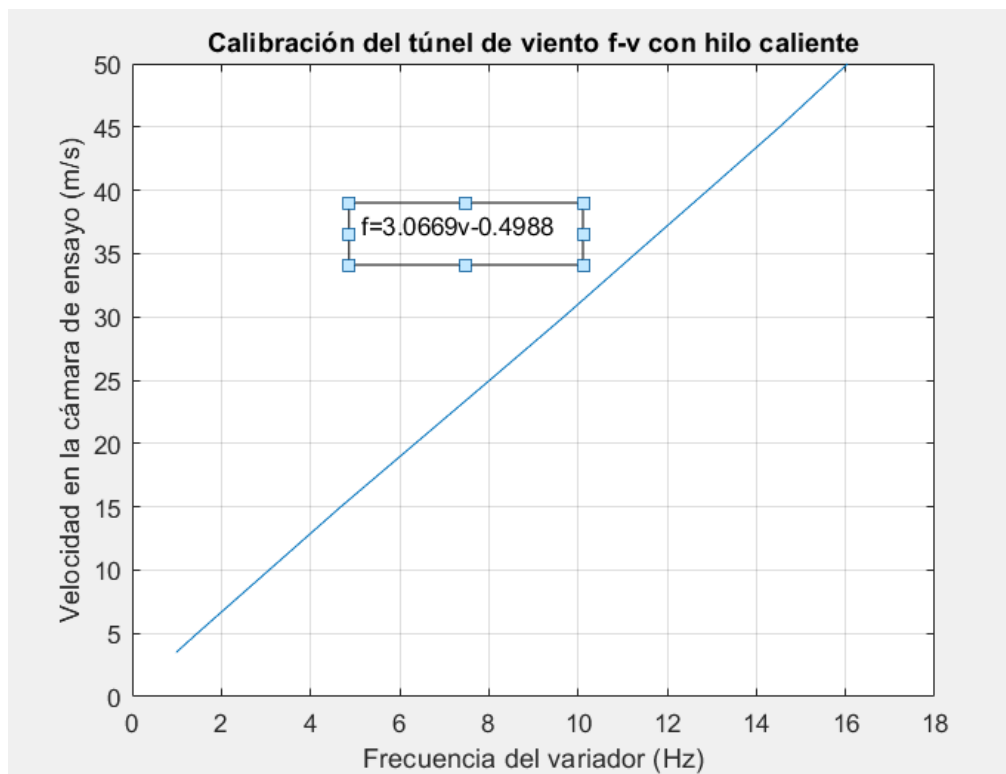


Figura 186. Gráfica f-v con anemómetro de hilo caliente.

Gracias a la función *fitlm* es posible calcular el valor de R^2 , siendo igual a la unidad, por lo que el ajuste lineal es perfecto. Gracias a este ajuste es posible calcular con facilidad la frecuencia del variador que debe seleccionarse para obtener una velocidad deseada en la cámara de ensayo. Con este ensayo existe la posibilidad de hallar la información deseada gráficamente con la representación gráfica de las figuras 185 y 186, mediante interpolación con los datos de la tabla 6 y mediante sustitución con el ajuste lineal calculado.

La calibración ha permitido obtener las siguientes ecuaciones:

$$v = 0,326f - 0,1621 \quad (37)$$

$$f = 3,0669v - 0,4988 \quad (38)$$

5.1.2. Calibración con tubo de Pitot.

Se realiza un procedimiento similar al anterior, en el que se coloca el tubo de Pitot en un agujero de la sección de medida y se analizan diferentes frecuencias para hallar sus velocidades asociadas. Cabe destacar que es más fiable el resultado obtenido en este caso debido a que el tubo de Pitot es más preciso que el anemómetro de hilo caliente y el montaje es más sofisticado. Se muestra a continuación:



Figura 187. Calibración de túnel de viento con tubo de Pitot.

La instalación tiene un multiplexor MPS4264 de Scanivalve (se mostrará en la figura 189), que es un componente electrónico con 64 puertos de entrada de datos que trabajan con sensores piezoeléctricos (en este caso se utilizan las salidas de presión estática y dinámica del tubo de Pitot como entrada al multiplexor), que se conecta al ordenador mediante un cable Ethernet para procesar los resultados obtenidos. Dicha conexión se manipula mediante el software MPSLink, que permite abrir un fichero con extensión .csv y escribir sobre él los datos medidos durante un periodo de dos minutos para cada punto analizado. Se adjunta a continuación una captura de pantalla del programa utilizado y del multiplexor:



Figura 188. Software MPSLink.



Figura 189. Multiplexor.

El multiplexor utiliza Multiplexión por División de Frecuencia (FDM) para comunicarse con el ordenador, que tiene como principal ventaja una disminución del ruido en los resultados obtenidos, debido a que trabaja a una gran frecuencia, mientras que otros aparatos de medida como el anemómetro de hilo caliente tiene una mayor variación de las velocidades (al tratarse de un medidor de menor calidad).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

f (Hz)	v (m/s)
3,5	1,0977
5	1,3024
10	3,1238
15	4,7299
20	6,4889
25	8,1704
30	9,8325
35	11,4961
40	13,1209
45	14,6899
50	16,3519

Tabla 7. Resultados de calibración con tubo de Pitot.

Estos datos son valores medios de un conjunto de velocidades medidas para cada frecuencia durante dos minutos. Se muestra un ejemplo a continuación:

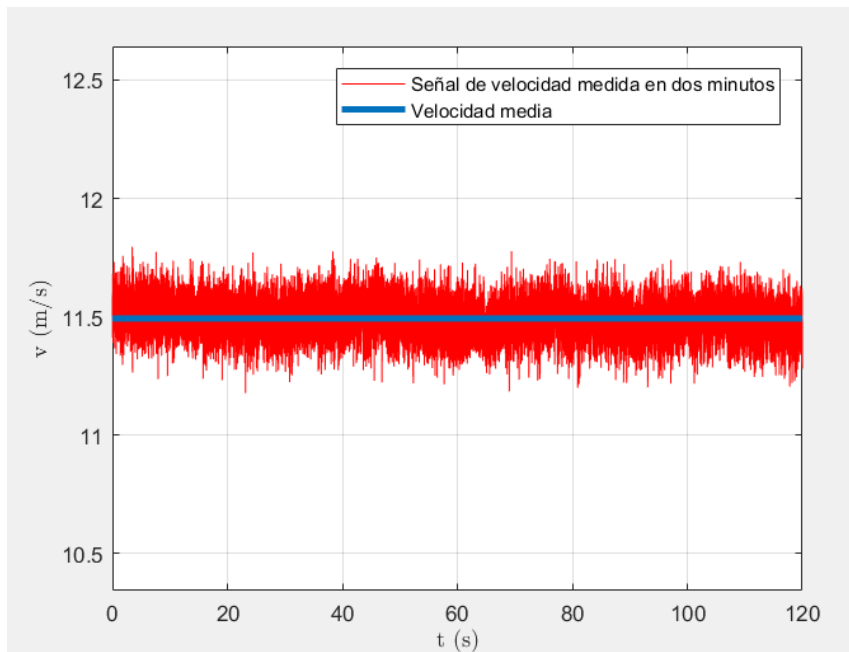


Figura 190. Ejemplo de velocidad media medida con tubo de Pitot.

Y los ajustes:

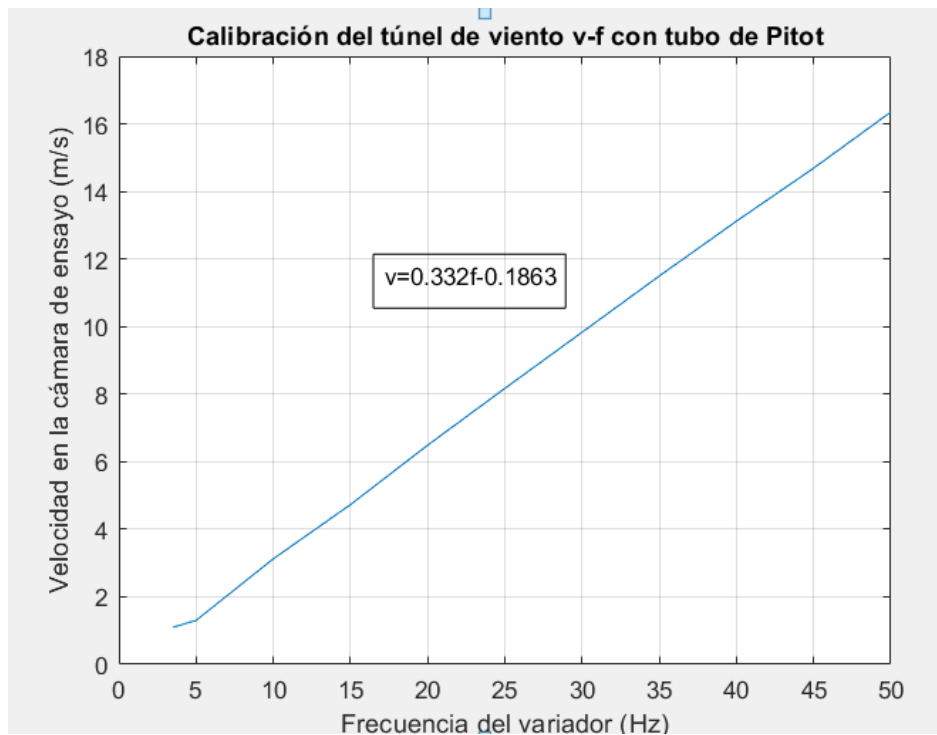


Figura 191. Diagrama v-f con tubo de Pitot.

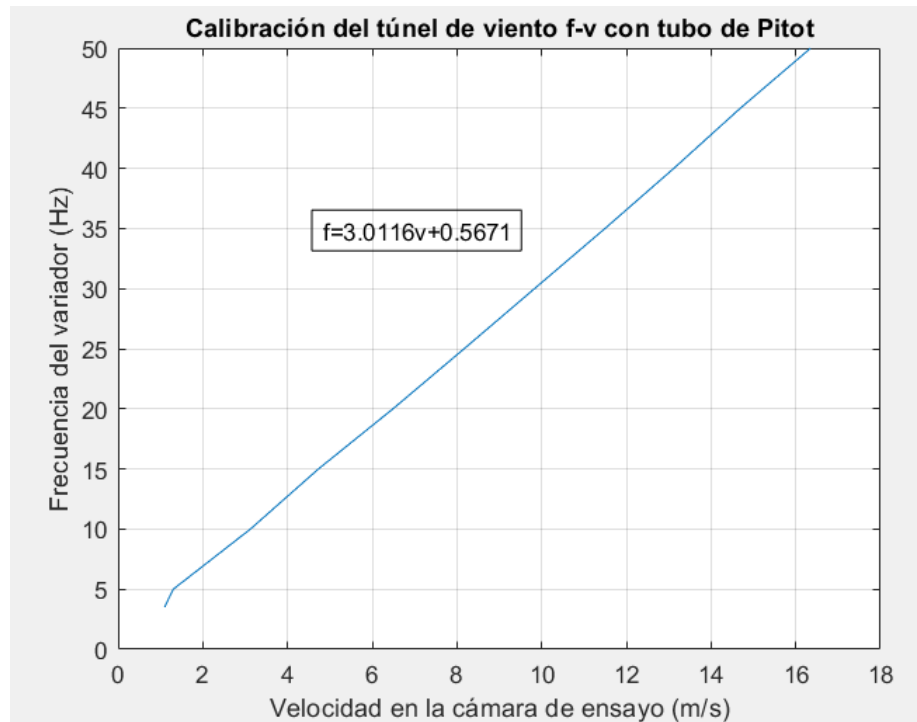


Figura 192. Diagrama f-v con tubo de Pitot.

La calibración ha permitido obtener las siguientes ecuaciones:

$$v = 0,332f - 0,1863 \quad (39)$$

$$f = 3,0116v + 0,5671 \quad (40)$$

Representando los resultados de ambos aparatos de medida en un mismo gráfico:

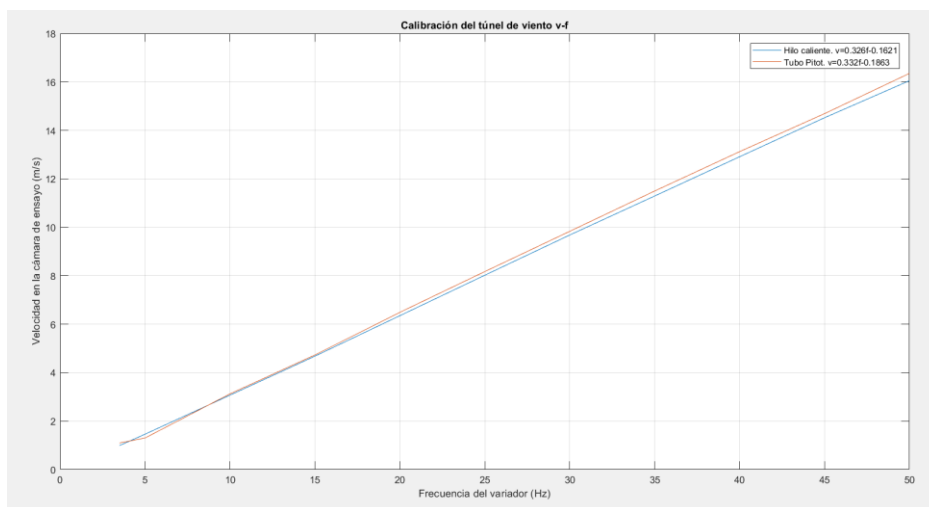


Figura 193. Comparación de gráficas v-f con ambos aparatos de medida.

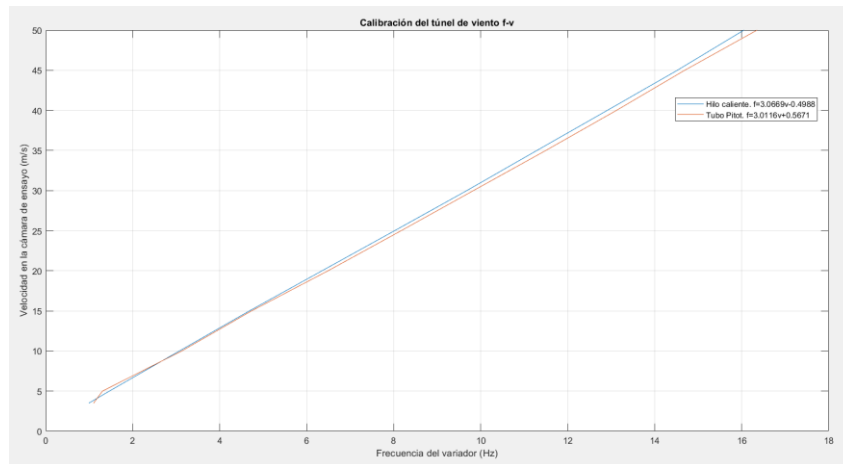


Figura 194. Comparación de gráficas f-v con ambos aparatos de medida.

Se aprecia que las rectas tienen pendiente muy similar en ambos casos, generando un error algo mayor conforme aumenta la frecuencia del variador. Sin embargo, es posible afirmar que este error entre ambas funciones es pequeño. La recta más fiable es la obtenida con el tubo de Pitot, debido a que mide la velocidad con mayor exactitud gracias al multiplexor.

El error relativo entre ambos aparatos de medida es:

f (Hz)	Errores de velocidad (%)
3,5	8,90
5	12,87
10	1,40
15	0,84
20	1,99
25	1,72
30	1,45
35	1,71
40	1,53
45	1,02
50	1,72

Tabla 8. Errores relativos para las frecuencias medidas.

El error máximo es de un 12,87% para una frecuencia de 5 Hz, debido a que a frecuencias bajas los aparatos de medida son más imprecisos. Para valores de frecuencia superiores a 5 Hz, el error relativo siempre es menor que el 2%, lo cual indica una gran similitud entre ambos estudios.

5.2. Comprobación de uniformidad de flujo.

En este caso se utiliza el tubo de Pitot con el mismo montaje que en el caso anterior. Sin embargo, se analizará una única frecuencia del variador y se medirán varias alturas de todos los agujeros disponibles en la cámara de ensayo, justo a la entrada de la misma.

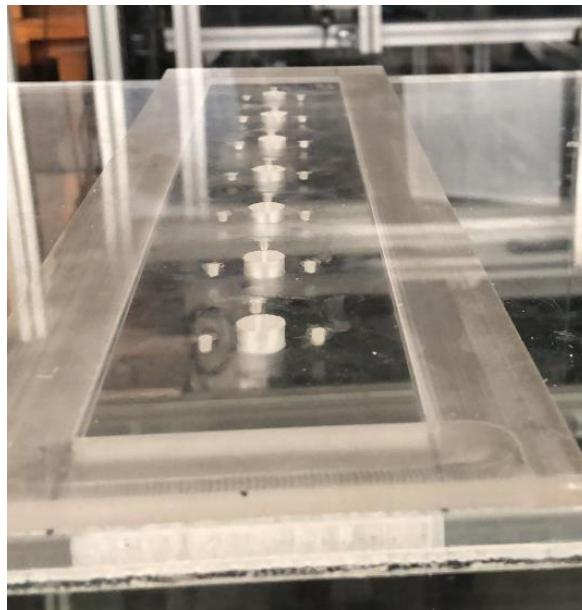


Figura 195. Agujeros superiores (1-7).

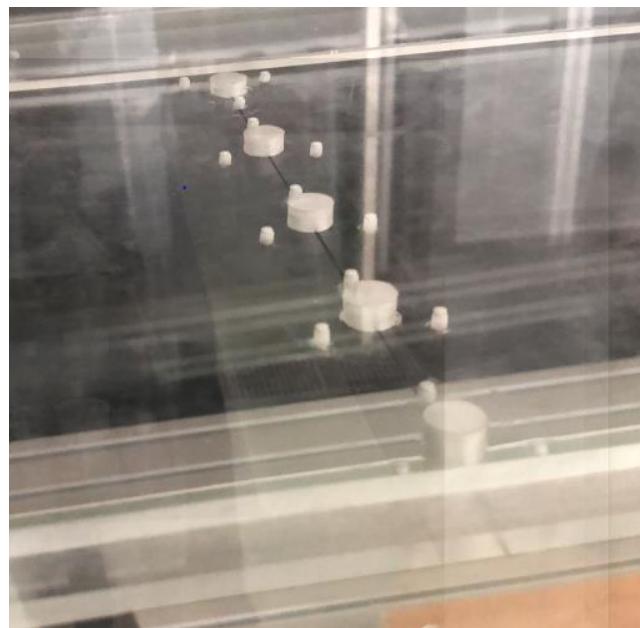


Figura 196. Agujeros inferiores (2-6).

Se adjunta a continuación un esquema con los puntos de medida:

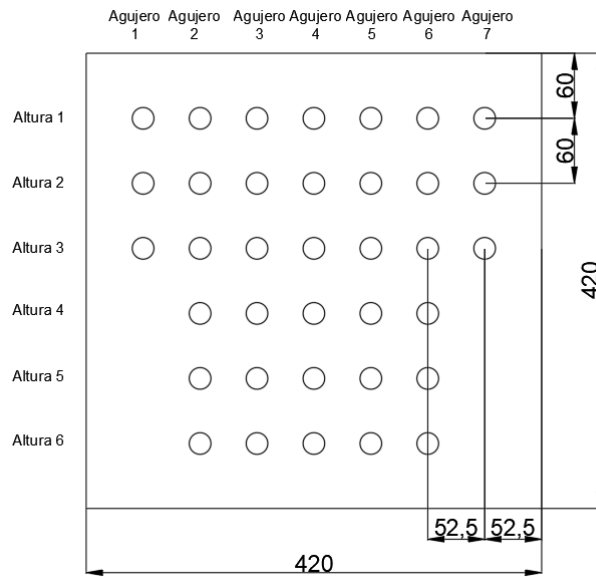


Figura 197. Esquema de los puntos de medida.

Gracias a esto se puede conocer la velocidad de varios puntos a la salida de la tobera y se puede comparar sus velocidades. El procedimiento será utilizar los agujeros del 1 al 7 con diferentes alturas, de la 1 a la 6, creando una matriz de velocidades con la que se puede comprobar si el flujo es uniforme o no. En este informe se explicará con detalle el análisis realizado con un punto, mientras que el resto de datos de adjuntarán en el anexo IV.

El montaje utilizado para medir la velocidad realiza medidas de presión estática y dinámica en distintos instantes de tiempo durante dos minutos, por lo que es posible representar la evolución de dicha velocidad durante esa cantidad de tiempo. Por otro lado, se determina la velocidad media, que será el valor representativo del experimento, y se calculará la intensidad turbulenta, que es el cociente entre la desviación estándar de las velocidades medidas por el tubo de Pitot y la velocidad media (es un indicador de la fluctuación de la velocidad respecto de su valor medio). Su ecuación es:

$$IT(\%) = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \cdot 100 \quad (41)$$

Donde σ_v es la desviación estándar de la velocidad y $\bar{v}$ es la media de la velocidad.

La variación temporal de la velocidad es la siguiente:

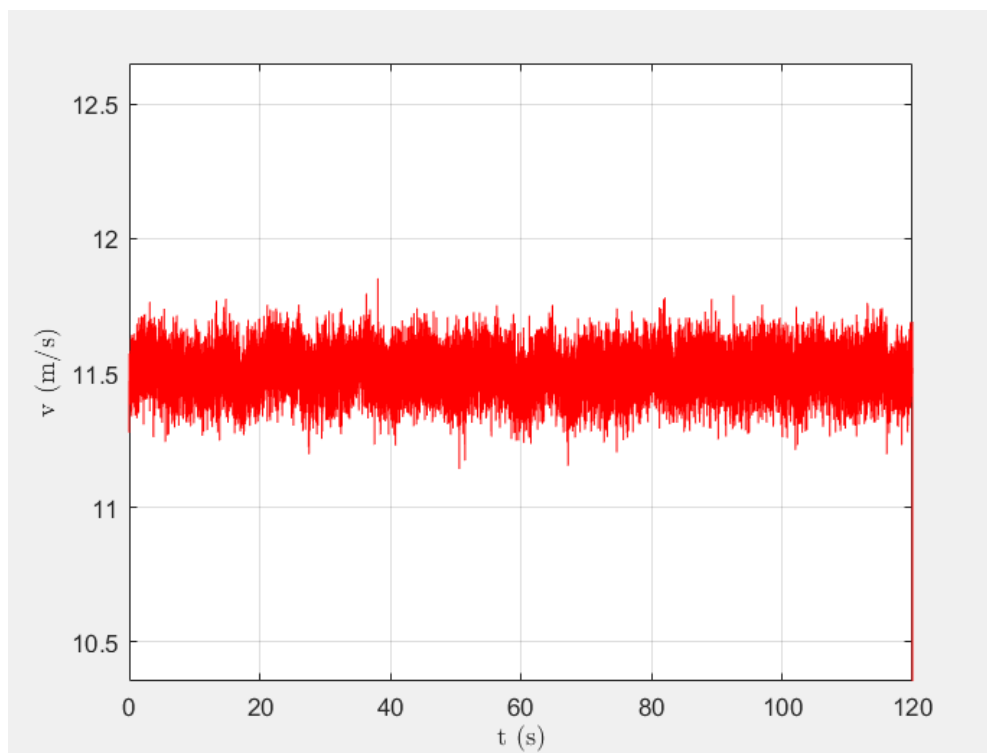


Figura 198. Velocidades del agujero 4 con altura 3

Realizando un zoom en algunas partes:

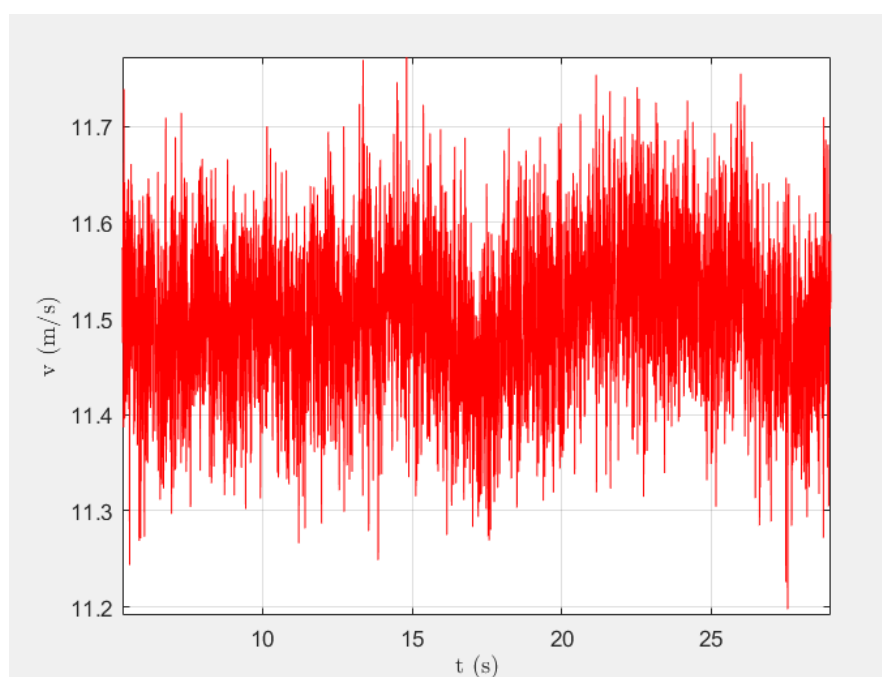


Figura 199. Velocidades del agujero 4 con altura 3. Zoom 1.

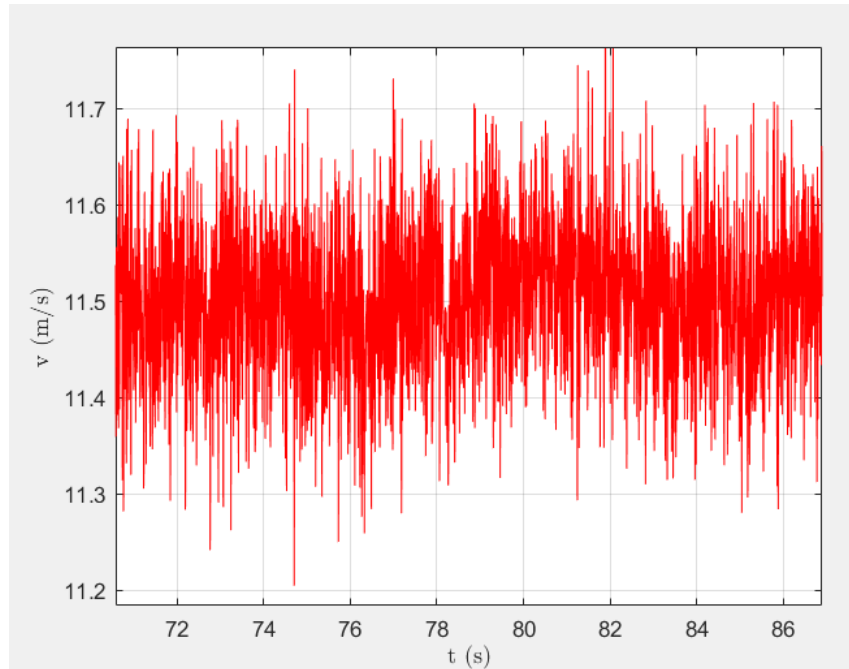


Figura 200. Velocidades del agujero 4 con altura 3. Zoom 2.

Se puede apreciar en las imágenes anteriores que los datos están acotados en una franja pequeña, por lo que la variación de velocidad en cada medida es pequeña. También se observan algunas oscilaciones similares a las funciones senoidales, por lo que es posible calcular la frecuencia con la que se producen estos cambios en la velocidad. Son los siguientes:

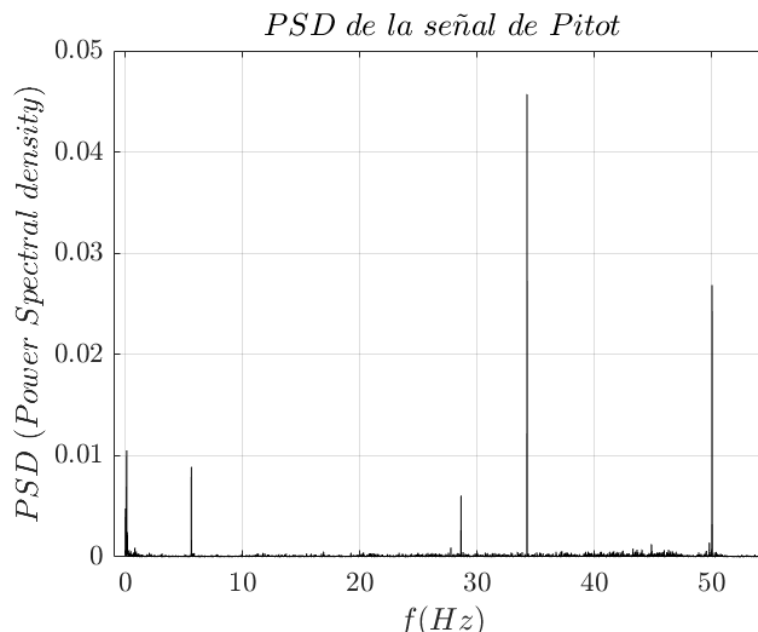


Figura 201. Picos de frecuencia en la medida de velocidad.

En la imagen anterior se observa por ejemplo un gran pico de 35 Hz y otros de menor magnitud.

En este caso la velocidad media toma un valor de 11,5028 m/s y la intensidad turbulenta es de un 0,9421%.

Las matrices de velocidad media y de intensidad turbulenta son:

	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3	Agujero 4	Agujero 5	Agujero 6	Agujero 7
Altura 1	11,6602	11,6244	11,5776	11,5776	11,5892	11,5987	11,6612
Altura 2	11,6283	11,5964	11,5414	11,5511	11,5464	11,6339	11,6362
Altura 3	11,6027	11,5702	11,5348	11,5028	11,497	11,562	11,5972
Altura 4	x	11,5403	11,5485	11,4926	11,4842	11,5009	x
Altura 5	x	11,5914	11,5549	11,5712	11,5247	11,5987	x
Altura 6	x	11,6407	11,6045	11,6216	11,6025	11,6056	x

Tabla 9. Matriz de velocidades medias.

	Agujero 1	Agujero 2	Agujero 3	Agujero 4	Agujero 5	Agujero 6	Agujero 7
Altura 1	0,6704	0,6774	0,6888	0,6888	0,6838	0,7051	0,981
Altura 2	0,9399	0,6871	0,694	0,6898	0,6917	0,697	0,937
Altura 3	0,9531	0,6745	0,6973	0,9421	0,9691	0,7167	0,9678
Altura 4	x	0,704	0,7085	0,6961	0,9732	0,9878	x
Altura 5	x	0,7799	0,6969	0,6854	0,9463	0,7051	x
Altura 6	x	0,6843	0,6945	0,6814	0,9469	1,1453	x

Tabla 10. Matriz de intensidades turbulentas.

El resto de resultados están reflejados en el anexo IV.

Se procesan los datos de velocidad e intensidad turbulenta de las tablas 9 y 10 mediante un script de Matlab, calculando el contorno de ambas variables en la sección analizada:

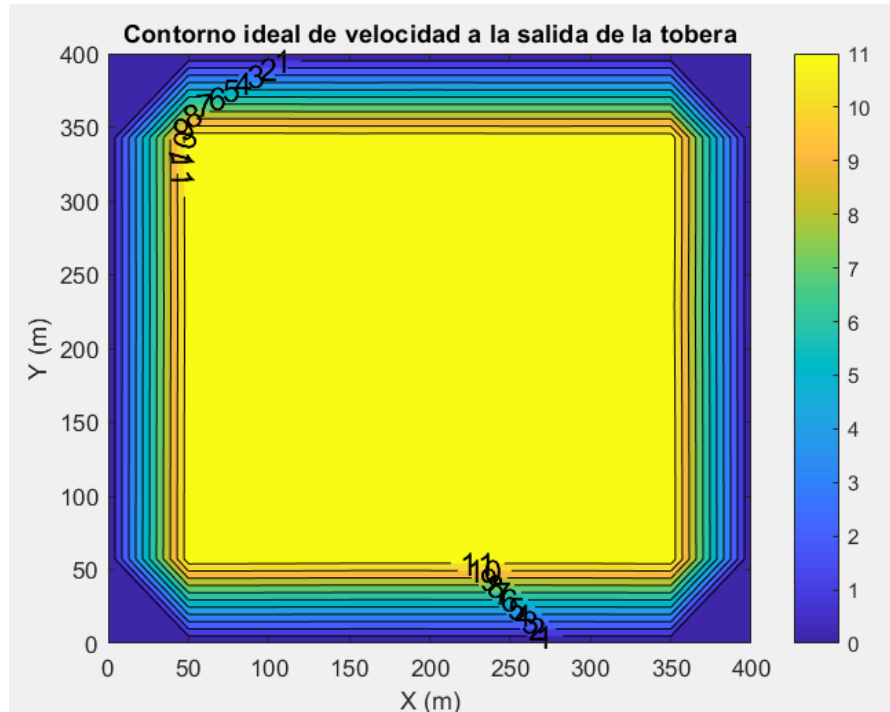


Figura 202. Contorno de velocidad medido a la salida de la tobera.

Para conseguir un resultado más visual, se han creado puntos adicionales coincidentes con la superficie de la cámara de ensayo en los que se considera nula la velocidad, para comprobar la variación de velocidad entre el centro y los extremos. Se puede observar que el resultado es similar al de la salida de la tobera de las simulaciones 3D que aparecen en las figuras 95, 99 y 102. El cuadrado amarillo representa una zona mayoritaria con la misma velocidad, es decir, con flujo uniforme.

Si se realiza un zoom de la figura anterior para que no aparezca la velocidad en la pared:

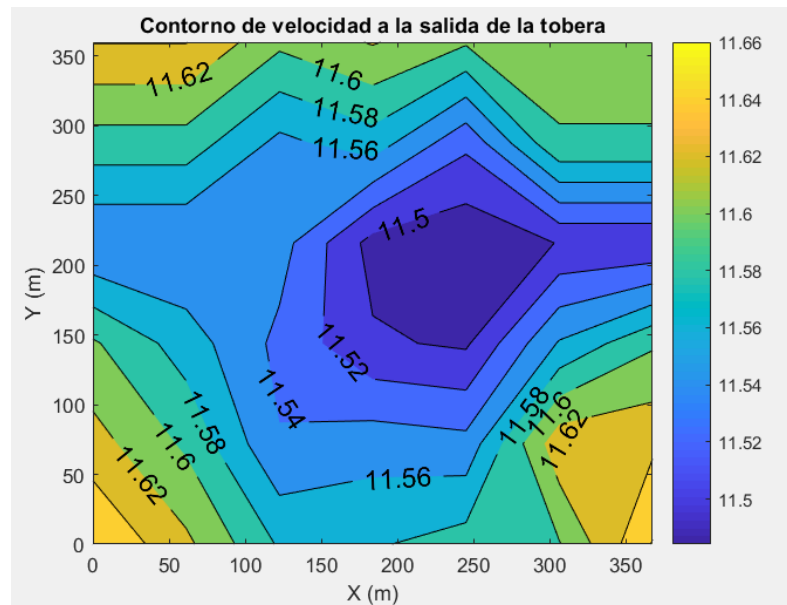


Figura 203. Contorno real de velocidad a la salida de la tobera.

Se aprecia una mayor semejanza de resultados en la zona central y en el centro de la zona superior, inferior, izquierda y derecha mientras que existe algo de variación en las esquinas. Sin embargo, el valor máximo es de 11,66 m/s y el mínimo de 11,5 m/s, lo que implica un cambio de velocidad muy pequeño en toda la sección. Gracias a esto es posible afirmar que la tobera construida ofrece un flujo uniforme a su salida.

El contorno de intensidad turbulenta en la zona de medida es el siguiente:

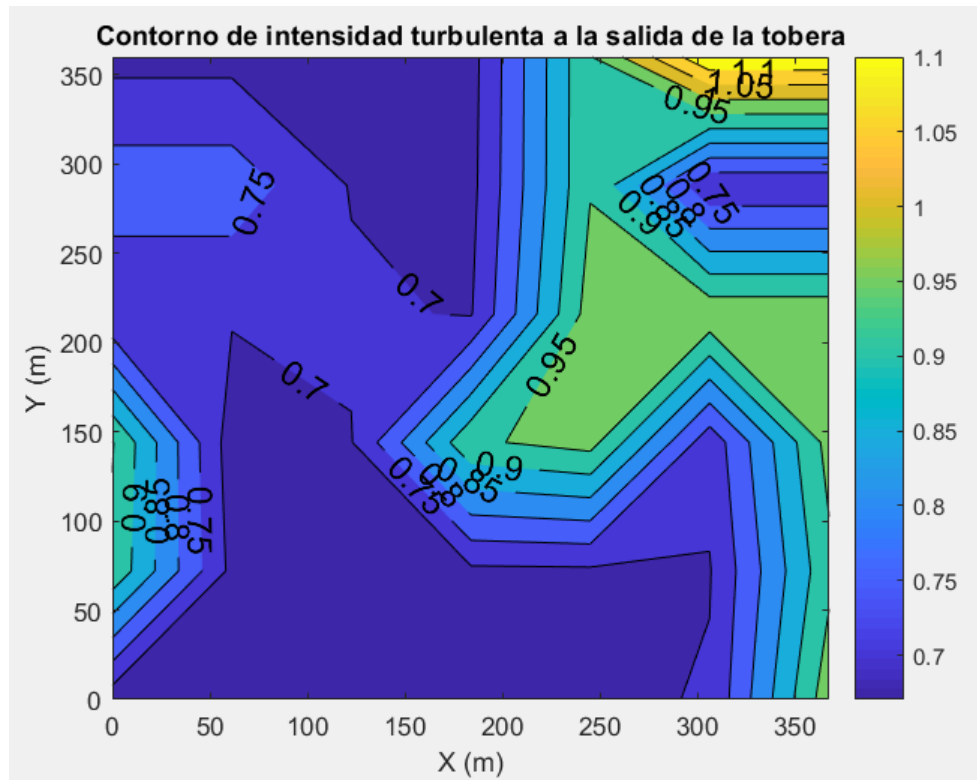


Figura 204. Contorno de intensidad turbulenta a la salida de la tobera.

En la mayoría de la sección la intensidad turbulenta es de aproximadamente 0,7%, aunque en algunas partes de su derecha se produce un aumento a valores de entorno a 0,95%, alcanzando el máximo en la esquina superior derecha de 1,1%.

6. Conclusiones y trabajo futuro.

Existen varias reflexiones esenciales para hacer después de realizar este trabajo. La primera de ellas es la importancia del modelado 3D mediante programas de CAD. En el túnel de viento existen muchas piezas que deben encajar de forma exacta, tales como las costillas y los marcos de los diferentes elementos, las secciones en el paso de la tobera a la cámara de ensayo y el difusor, etc; siendo todo esto revisado sin necesidad de construir previamente gracias al diseño en 3D. Es por tanto destacable que esta primera etapa es decisiva en ahorro de tiempo y dinero (un buen diseño será capaz de evitar problemas en el futuro, y equivocarse en esta etapa puede tener más consecuencias negativas que en adelante).

Por otro lado, el diseño de la tobera es la parte más importante de todo el túnel de viento, debido a que debe conseguirse un flujo uniforme a la salida de la misma y para eso es necesario un estudio previo muy detallado. En este aspecto es fundamental aplicar simulaciones numéricas a distintos modelos de contracción, para poder determinar su comportamiento ante un salto de presión que genere velocidades estándar y pequeñas. Gracias a la Mecánica de Fluidos Computacional es posible reducir mucho los costes de la construcción de un túnel de viento, debido a que si no se utilizara, sería necesario fabricar varios modelos de tobera para ensayarlos y elegir el más adecuado, mientras que todo ese proceso ha podido llevarse a cabo desde un ordenador.

Al calibrar el túnel de viento, se ha comprobado que la relación entre la frecuencia seleccionada en el variador y la velocidad en la sección de ensayo es lineal, siendo sencillo para el usuario del túnel predecir con alto grado de exactitud la velocidad en el túnel de viento.

En el estudio de comprobación de uniformidad de flujo se ha determinado que la variación de velocidad en distintos puntos de la sección de salida de la tobera es muy pequeña, siendo este el objetivo inicial a lograr. Por lo tanto se puede afirmar que se ha logrado el objetivo de este proyecto con éxito.

El análisis realizado en este proyecto debe ampliarse realizando nuevos ensayos de calibración del túnel de viento con aparatos de medida como el tubo de Pitot para diferentes velocidades de giro del ventilador (especialmente más pequeñas, que es cuando se pueden generar mayores perfiles de velocidad en la cámara de ensayo) y comprobar si se alcanza la misma conclusión que en este trabajo. En caso negativo, se puede modificar la zona de admisión, añadiendo nuevos filtros, o incluso volver a diseñar y construir una nueva tobera que funcione en esas condiciones de trabajo. También se puede modificar la intensidad turbulenta producida mediante la colocación de diferentes obstáculos en la zona de admisión, para lo cual el túnel se ha preparado en su fase de diseño.

Si el túnel de viento funciona adecuadamente para un alto rango de velocidades, es posible ser utilizado para otras investigaciones, tales como prácticas docentes, realización de Trabajos Fin de Grado o Trabajos Fin de Máster, y también para estudios de investigación aerodinámicos.

7. Anexos.

7.1. Anexo I. Planos de los componentes del túnel de viento.

7.1.1. Entrada.

Entrada.

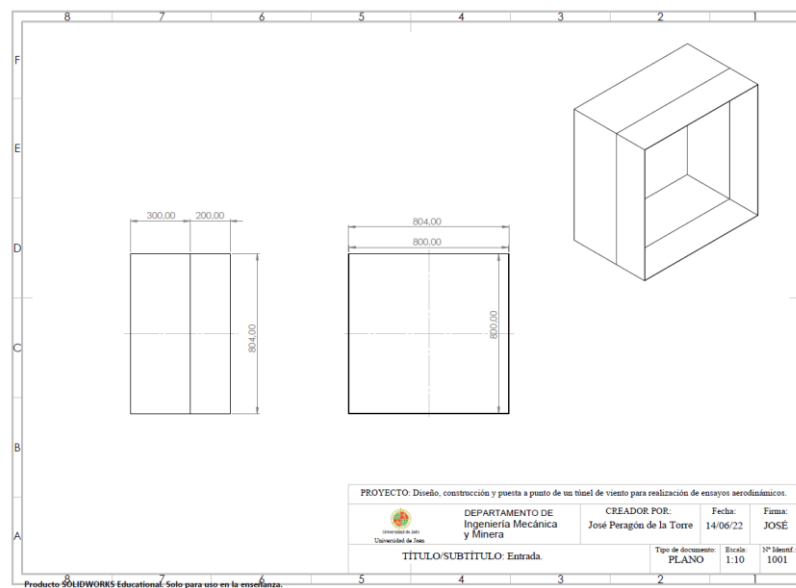


Figura 205. Plano de entrada.

Marco 1.

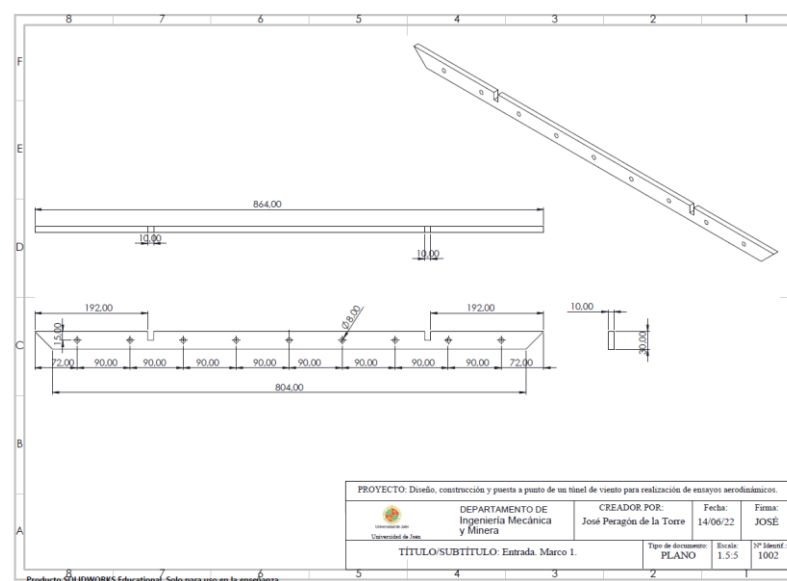


Figura 206. Plano de entrada. Marco 1.

Marco 2.

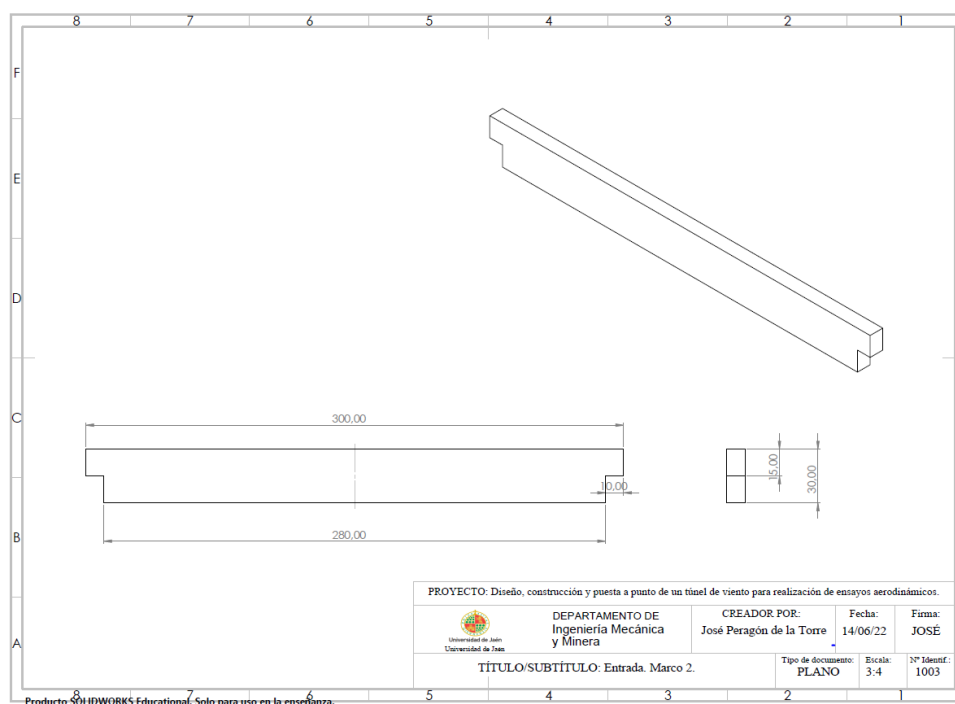


Figura 207. Plano de entrada. Marco 2.

Marco 3.

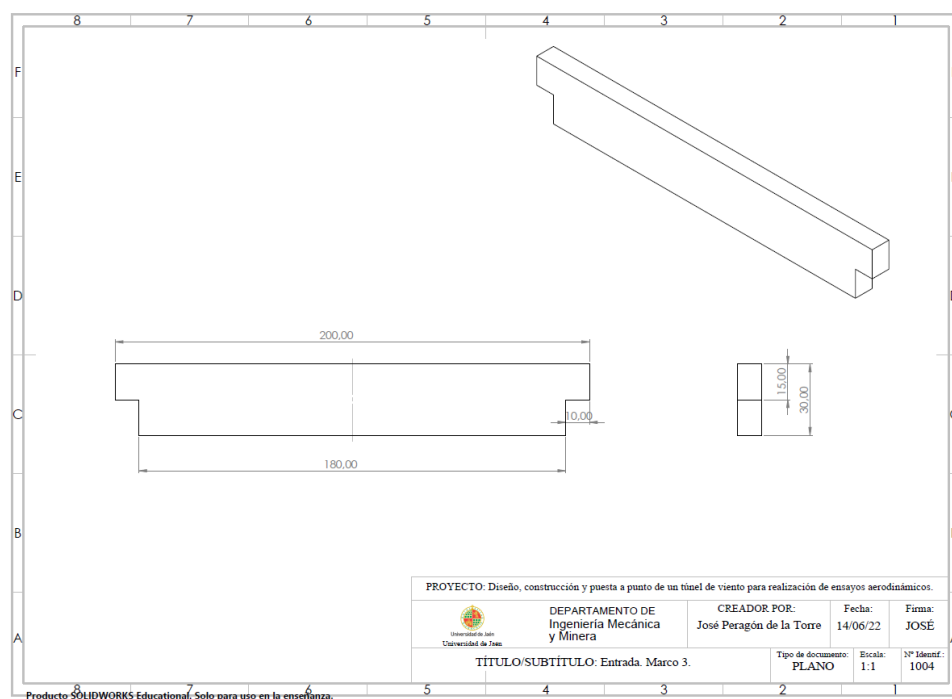


Figura 208. Plano de entrada. Marco 3.

Ensamblaje.

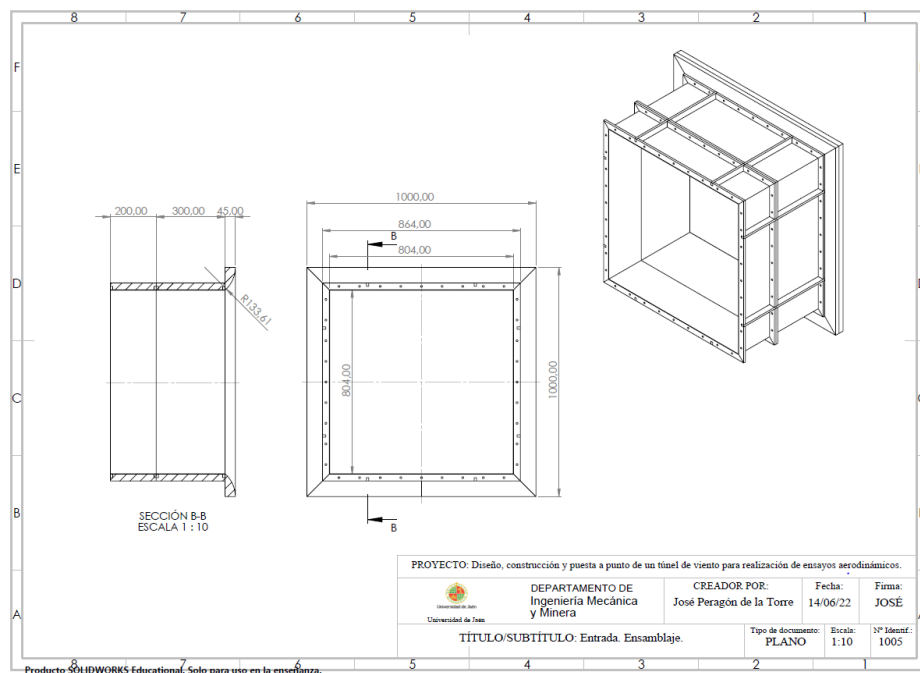


Figura 209. Plano de entrada. Ensamblaje.

7.1.2. Contracción.

Tobera.

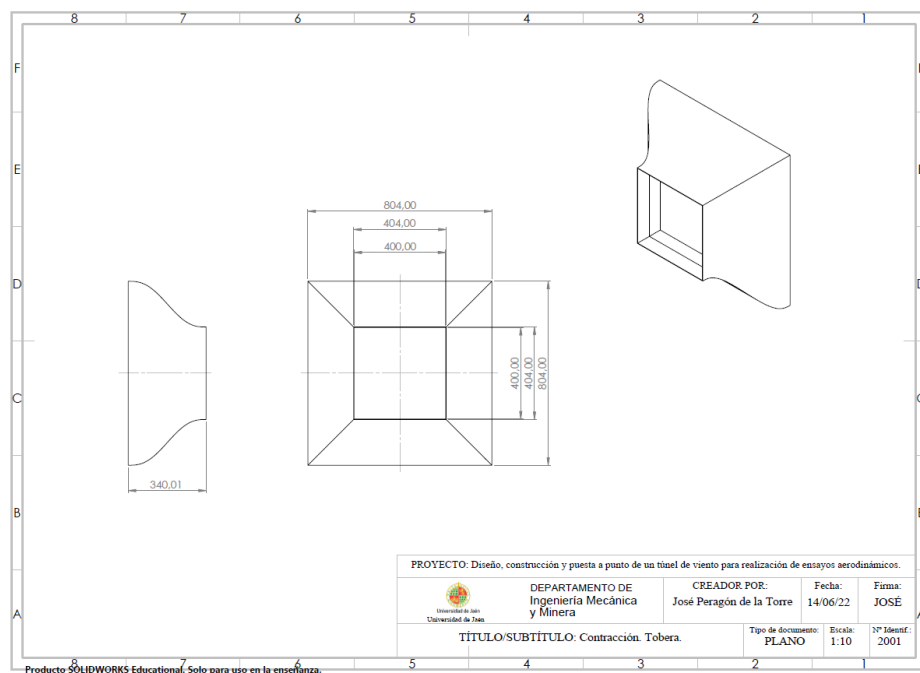


Figura 210. Plano de contracción. Tobera.

Marco 1.

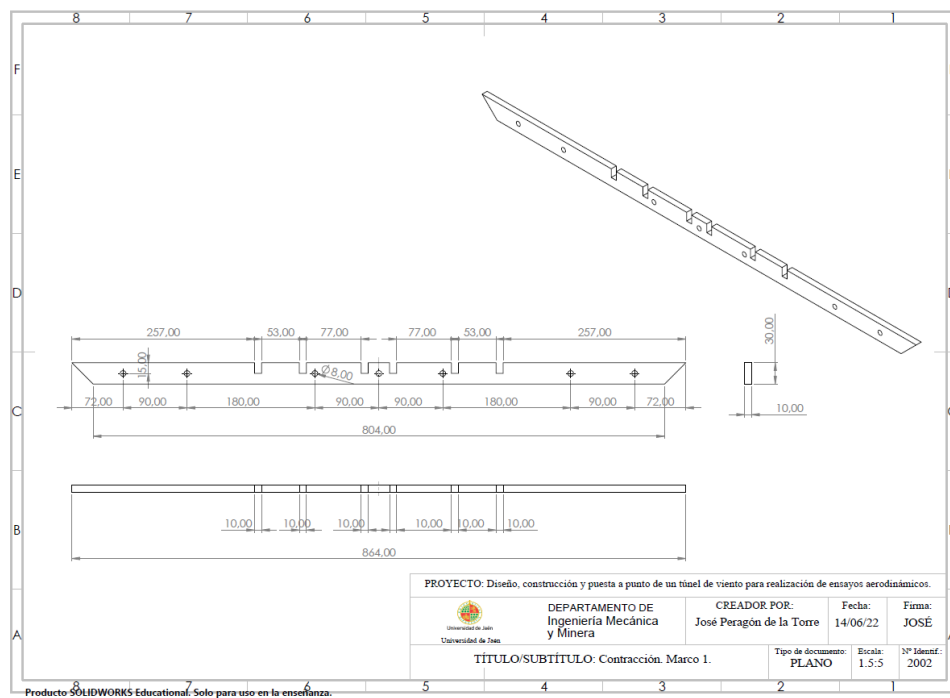


Figura 211. Plano de contracción. Marco 1.

Marco 2.

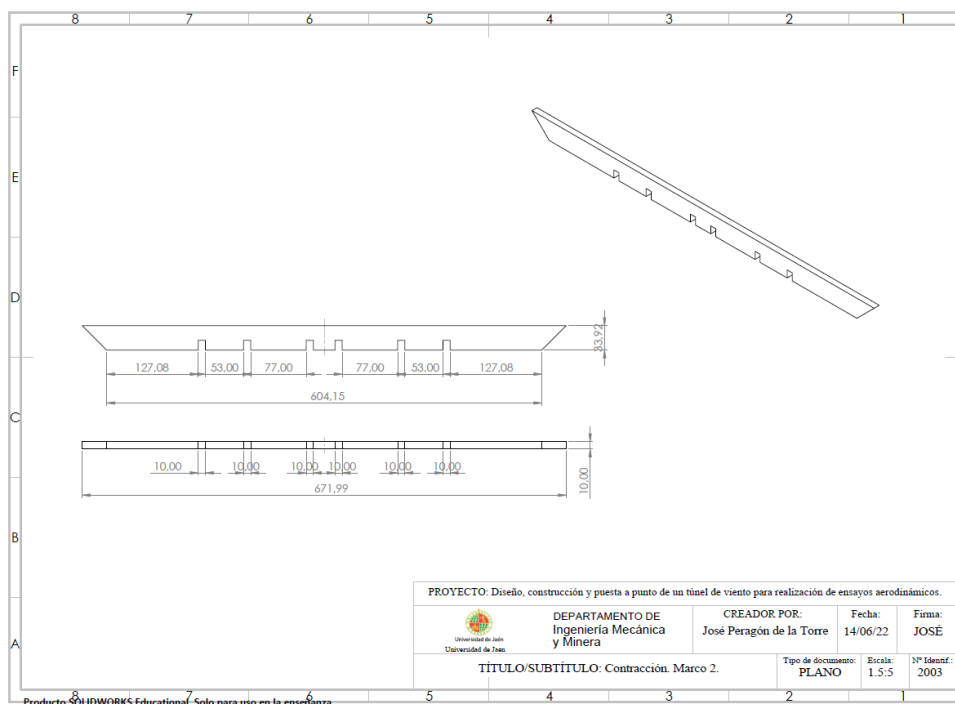


Figura 212. Plano de contracción. Marco 2.

Marco 3.

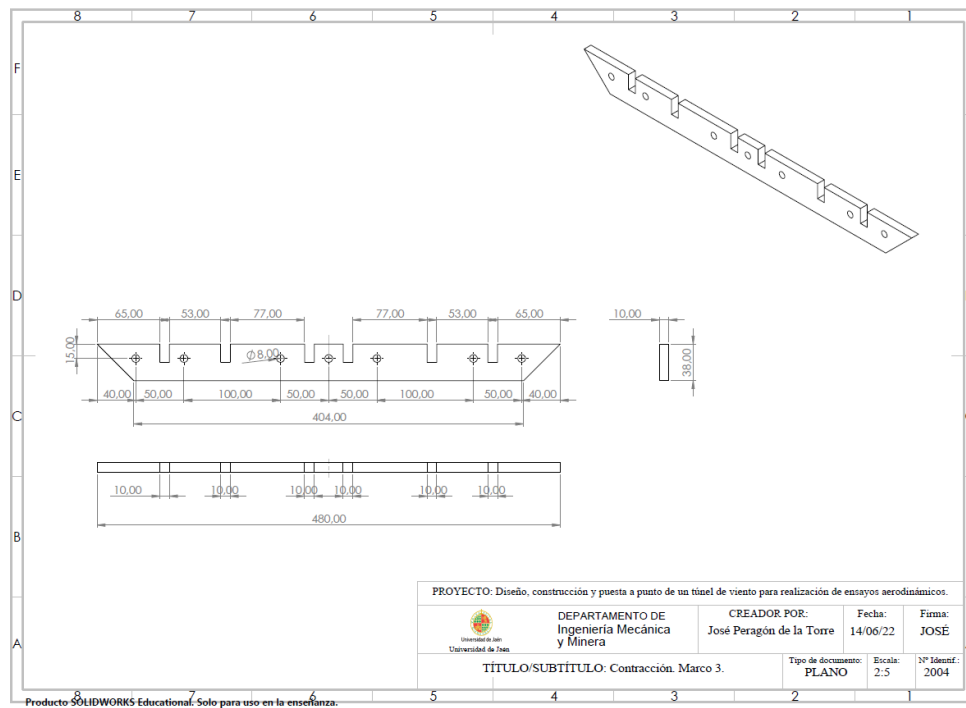


Figura 213. Plano de contracción. Marco 3.

Marco 4.

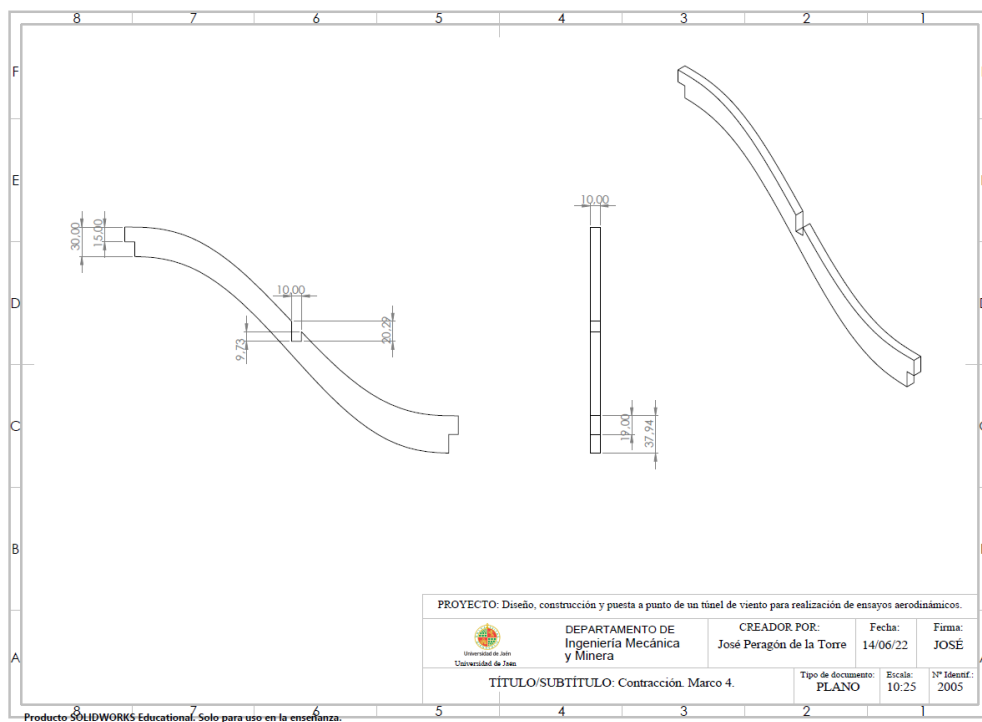


Figura 214. Plano de contracción. Marco 4.

Ensamblaje.

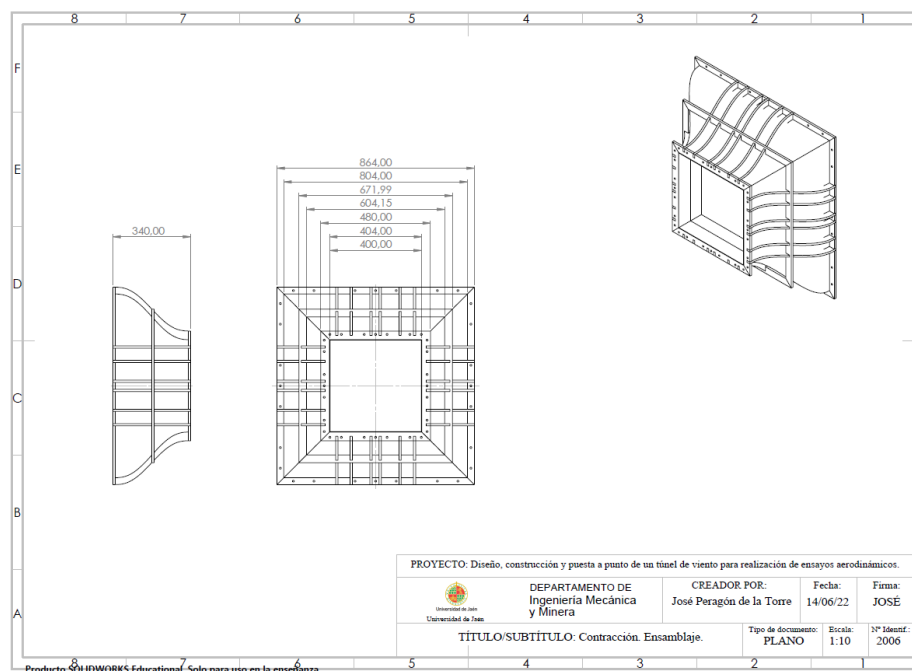


Figura 215. Plano de contracción. Ensamblaje.

7.1.3. Sección de medida.

Sección de medida.

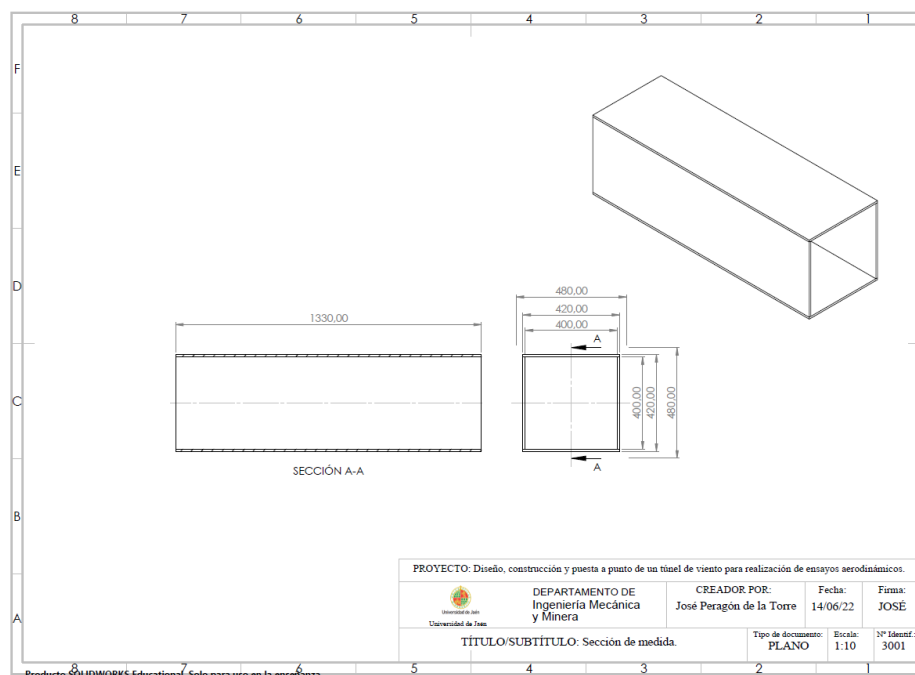


Figura 216. Plano de sección de medida.

Marco 1.

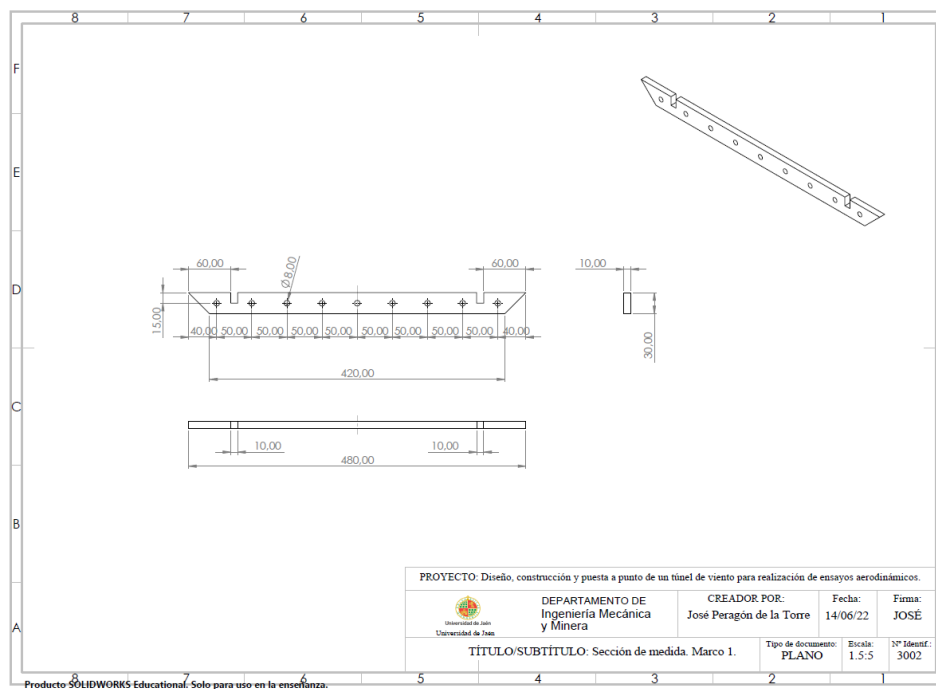


Figura 217. Plano de sección de medida. Marco 1.

Marco 2.

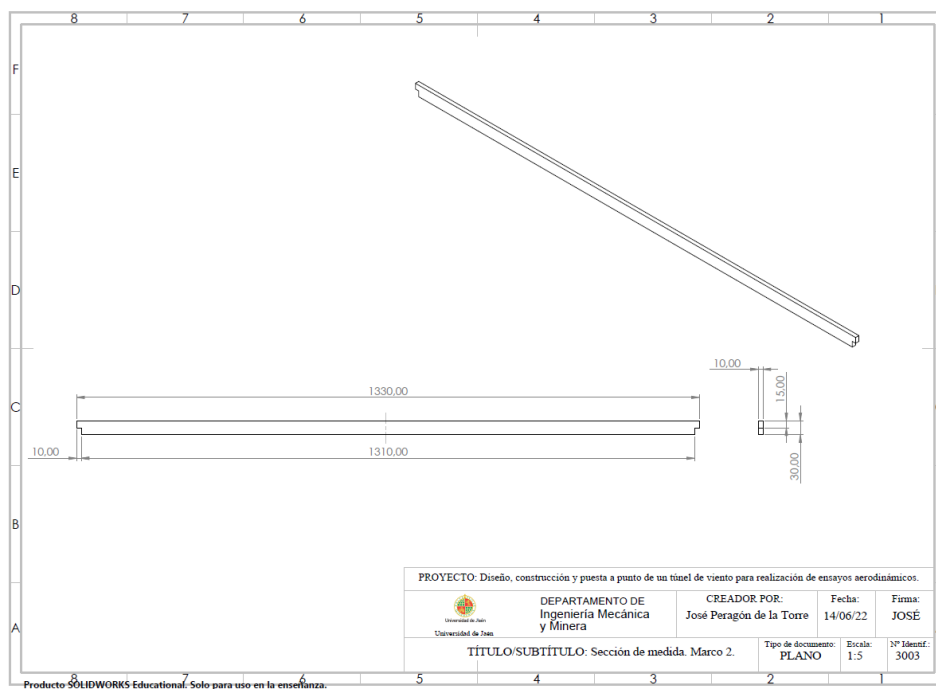


Figura 218. Plano de sección de medida. Marco 2.

Ensamblaje.

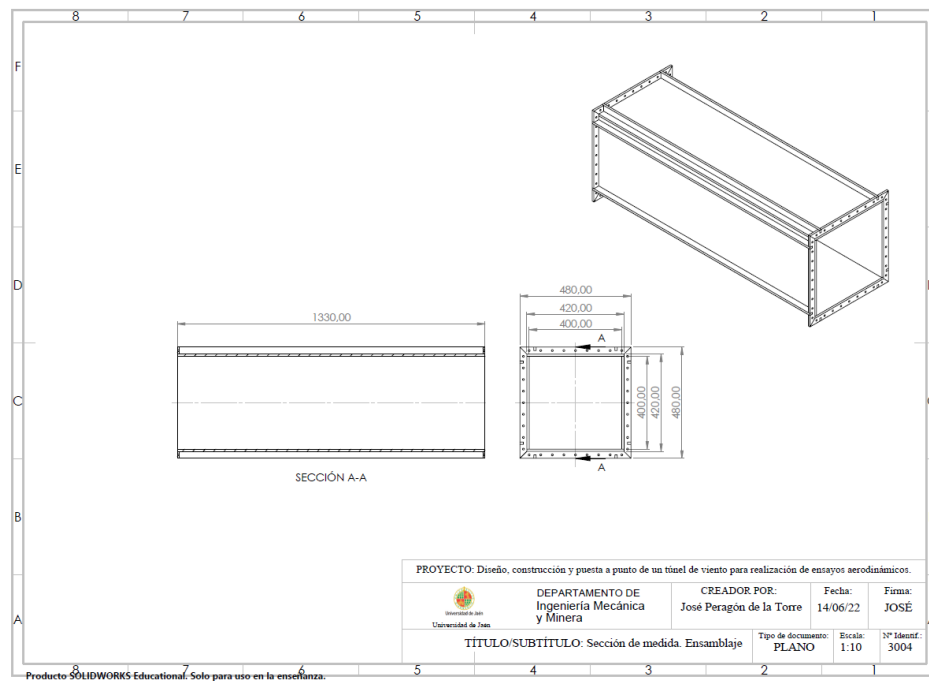


Figura 219. Plano de sección de medida. Ensamblaje.

7.1.4. Difusor.

Difusor.

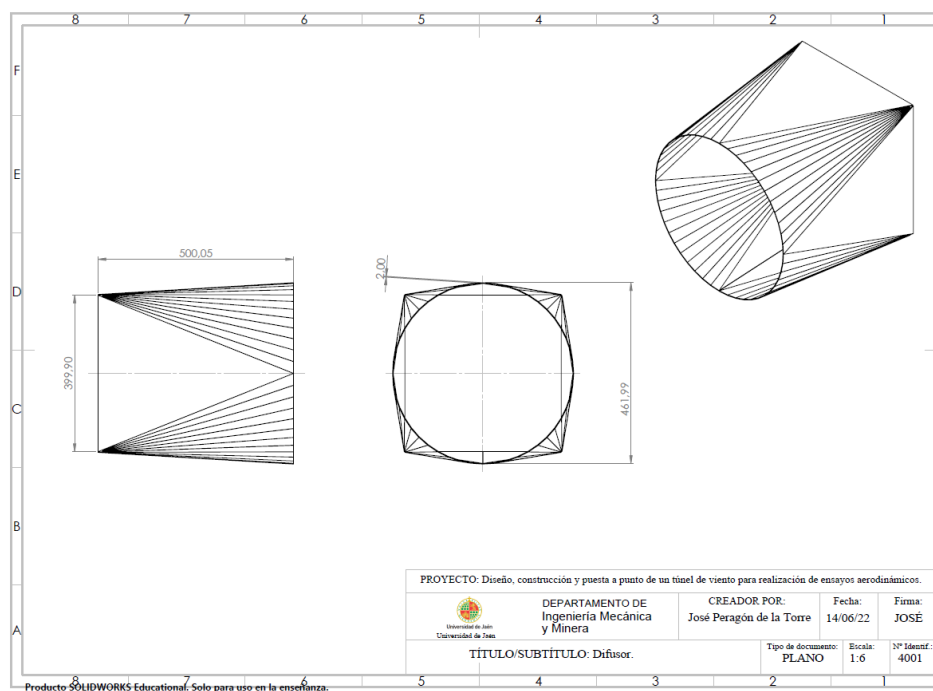


Figura 220. Plano de difusor.

Marco 1.

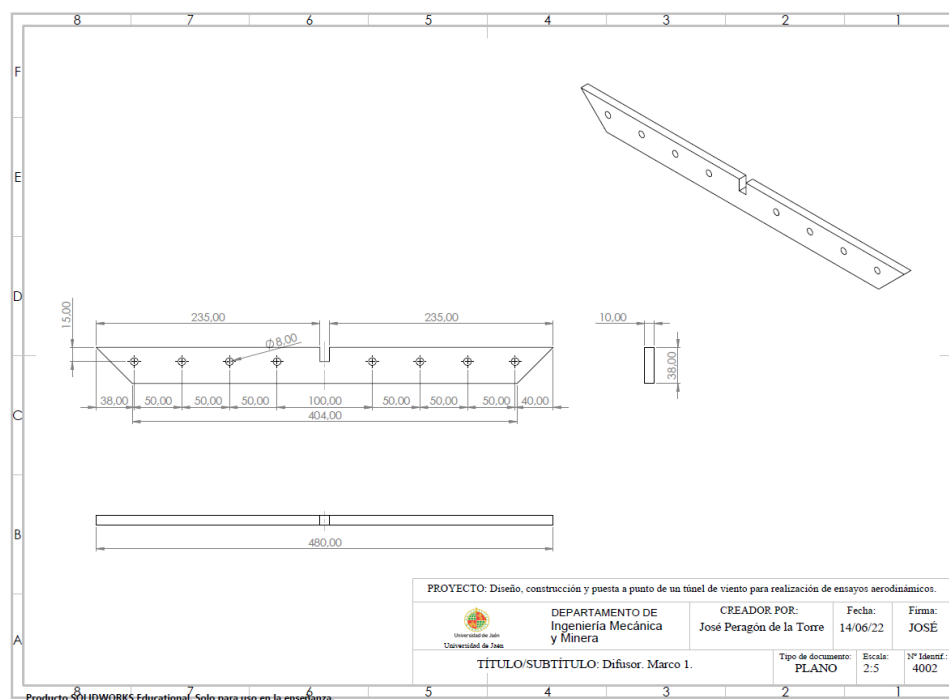


Figura 221. Plano de difusor. Marco 1.

Marco 2.

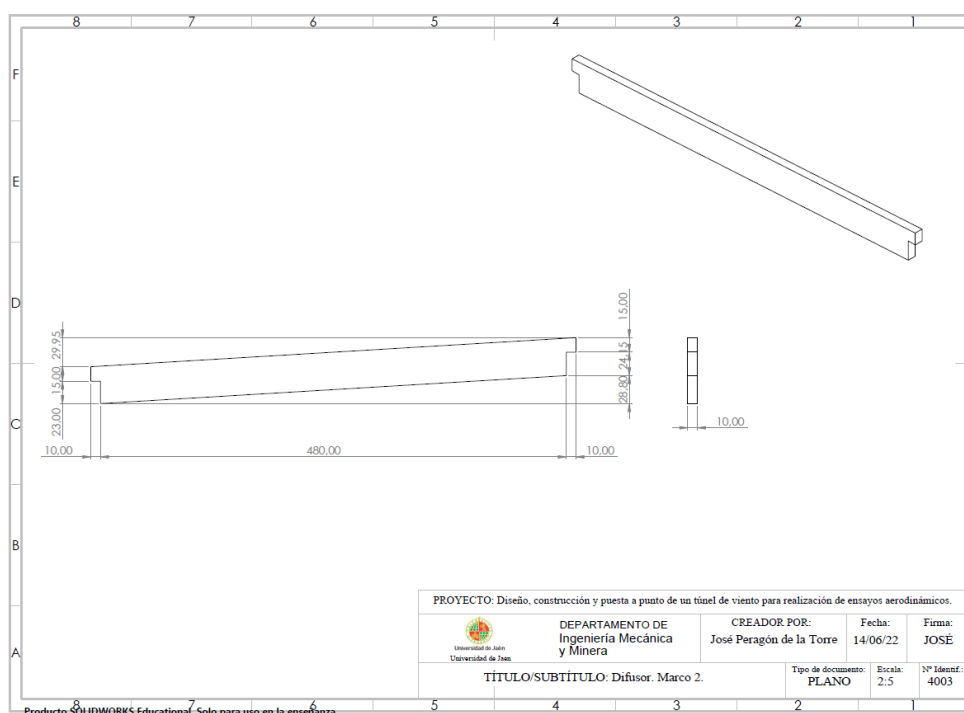


Figura 222. Plano de difusor. Marco 2.

Marco 3.

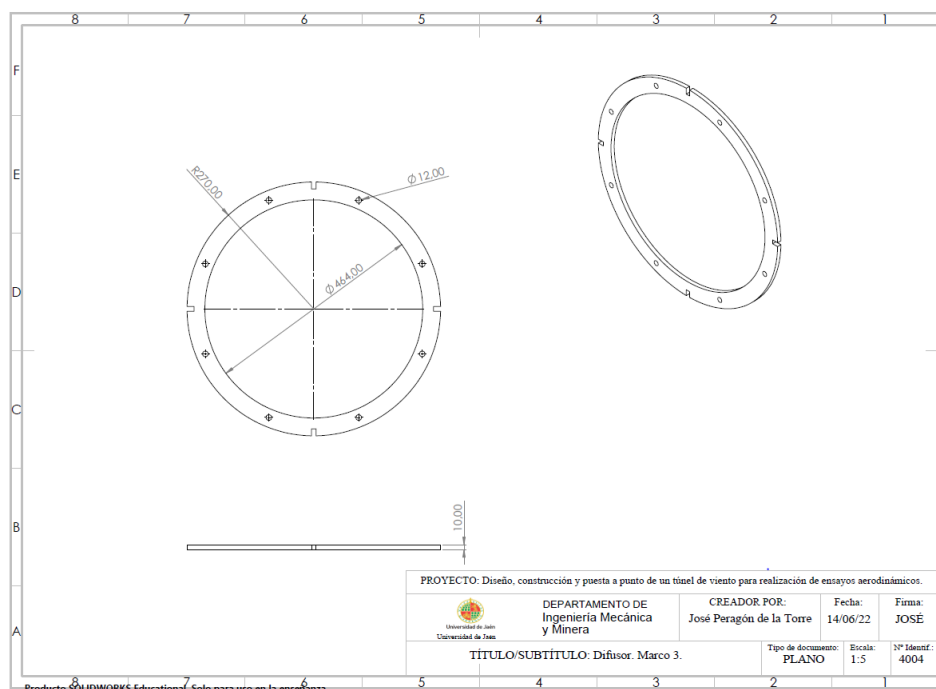


Figura 223. Plano de difusor. Marco 3.

Ensamblaje.

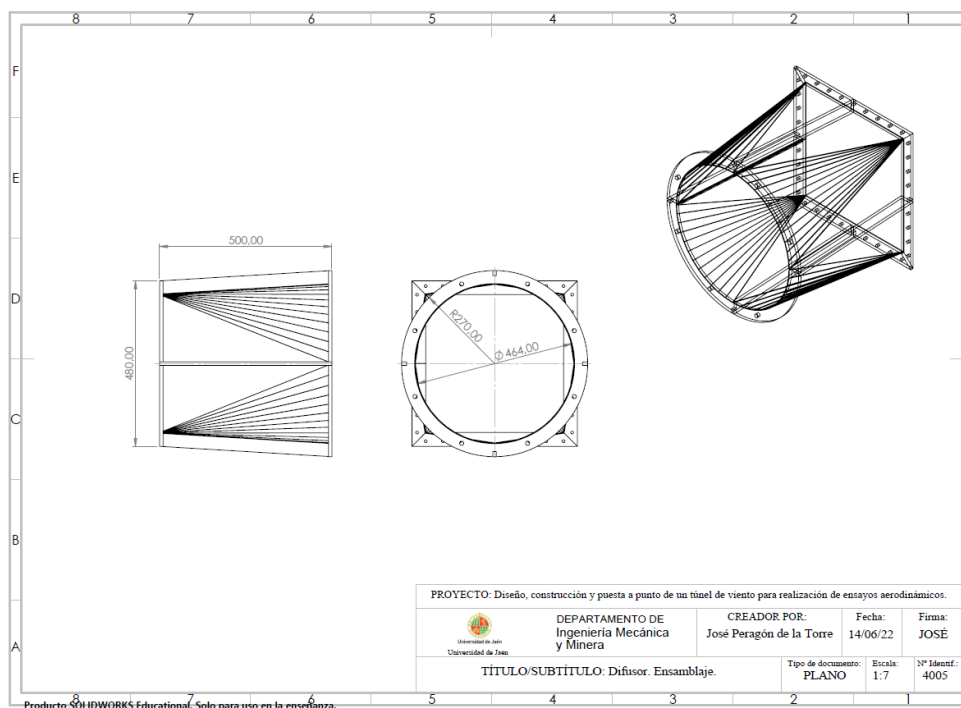


Figura 224. Plano de difusor. Ensamblaje.

7.2. Anexo II. Comparación de las configuraciones de la simulación.

Simulación 1.

En primer lugar, se aplica un modelo laminar, con distintas condiciones de contorno y métodos numéricos. El primer caso corresponde al método Coupled con una condición de velocidad de entrada de 4,4 m/s (tomada de forma arbitraria) y una caída de 100 Pa a la salida. El resultado es el siguiente:

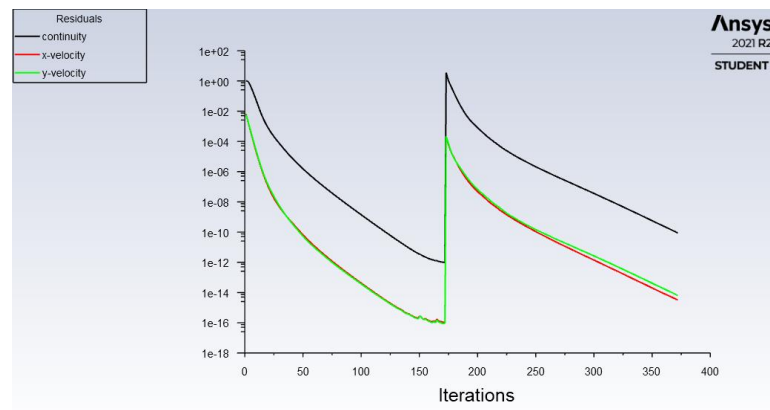


Figura 225. Residuales. Simulación 1.

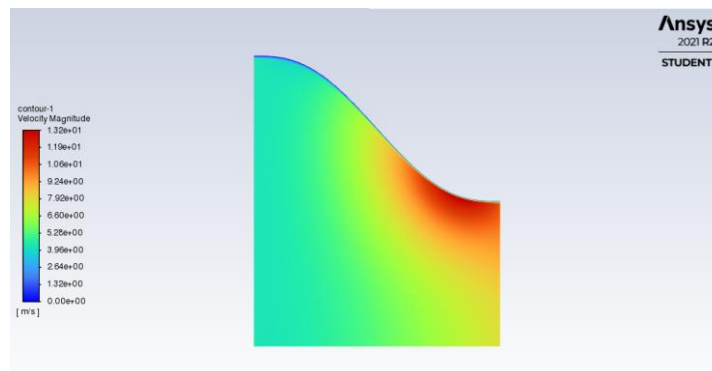


Figura 226. Contorno de velocidad. Simulación 1.

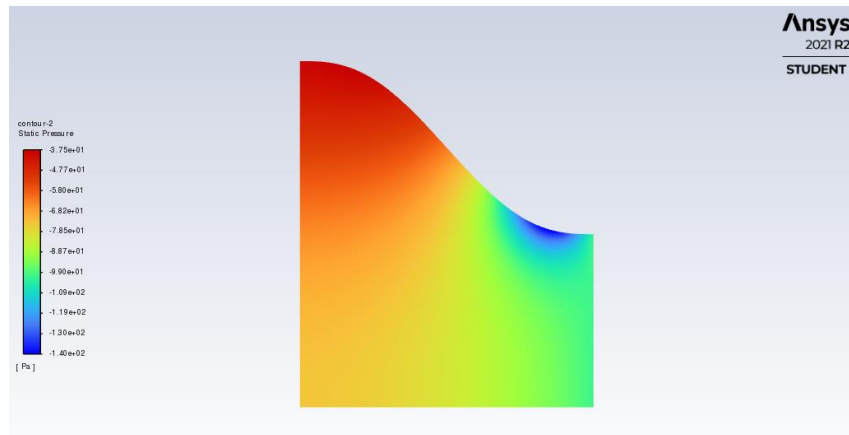


Figura 227. Contorno de presión. Simulación 1.

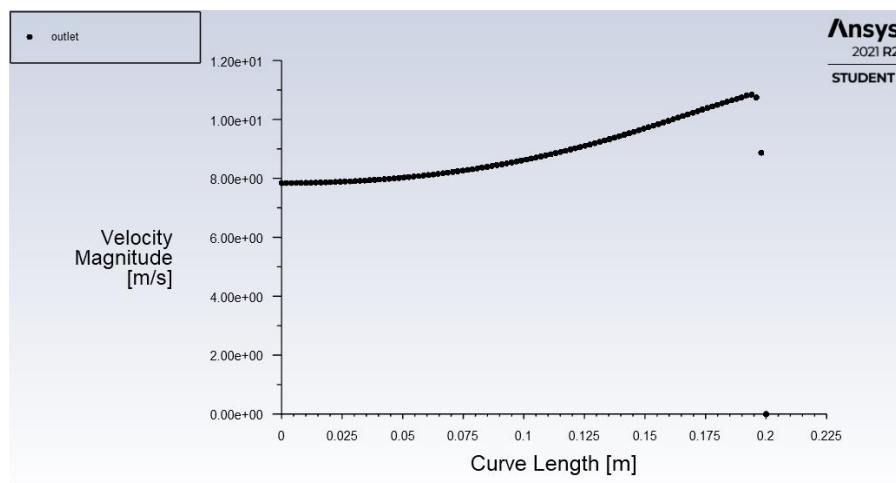


Figura 228. Perfil de velocidad. Simulación 1.

El número de Reynolds asociado a la longitud transversal de la sección medida sería:

$$Re = 2,74 \cdot 10^5 \quad (42)$$

El perfil de velocidad tiene cierta variación a lo largo de la sección, no puede asumirse que el flujo es uniforme a pesar de que la convergencia del método es muy buena.

Simulación 2:

Cambiando la condición de salida por OutFlow:

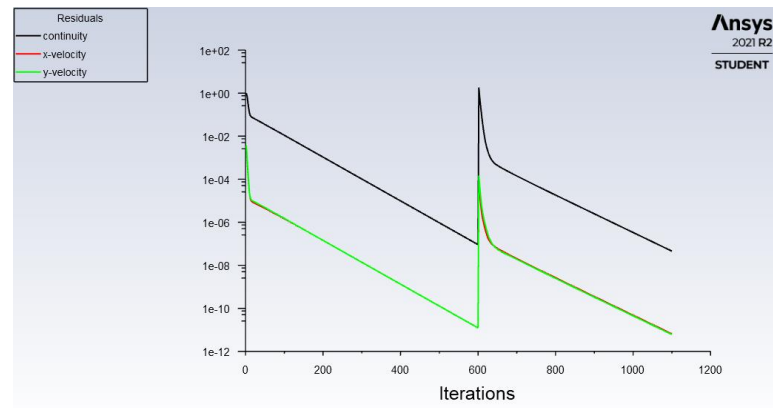


Figura 229. Residuales. Simulación 2.

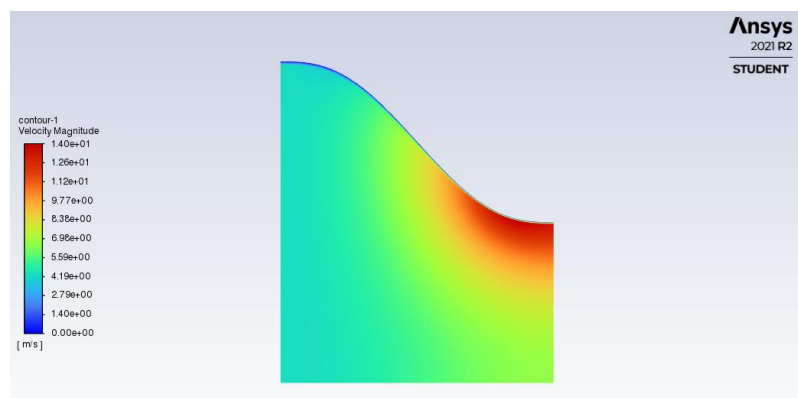


Figura 230. Contorno de velocidad. Simulación 2.

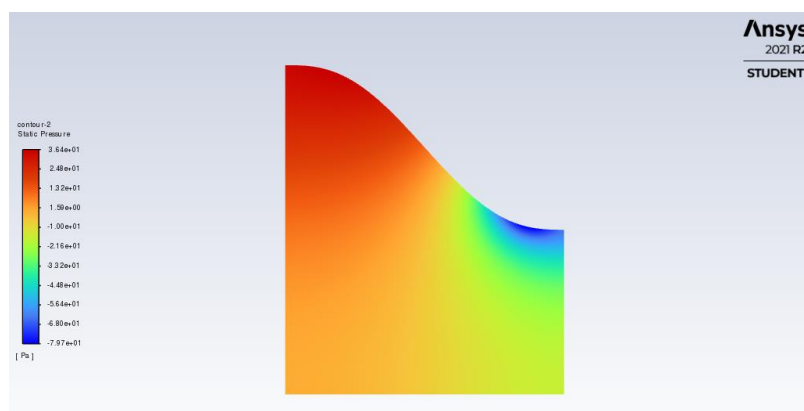


Figura 231. Contorno de presión. Simulación 2.

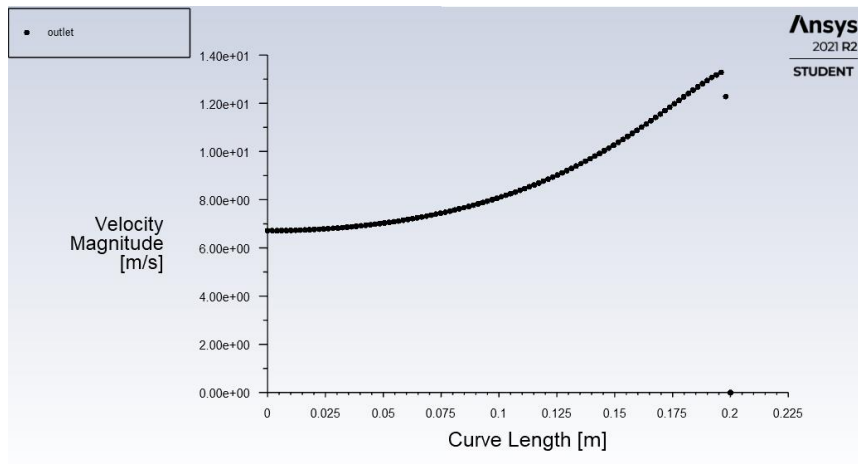


Figura 232. Perfil de velocidad. Simulación 2.

$$Re = 3,01 \cdot 10^5 \quad (43)$$

De forma similar al caso anterior, el flujo no es uniforme a la salida de la tobera, de hecho, el perfil de velocidad es más desfavorable que en el caso anterior, por lo que esta simulación es descartable.

Simulación 3:

Introduciendo de nuevo las condiciones de contorno del primer caso sustituyendo el método Coupled por el SIMPLE:

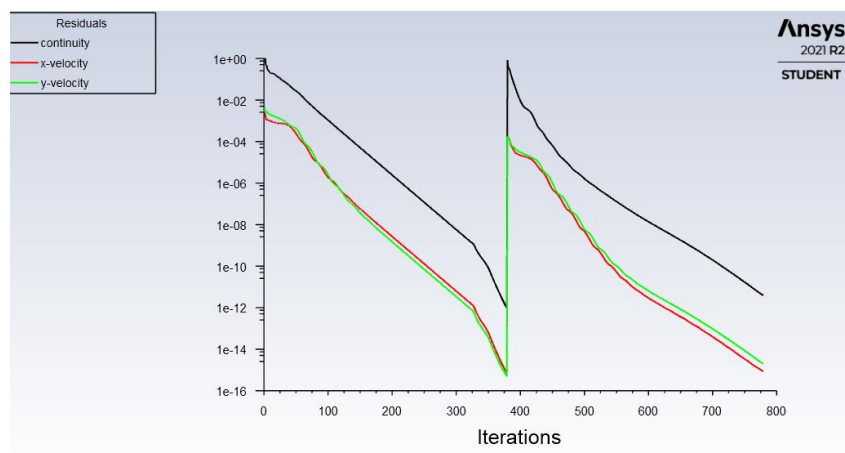


Figura 233. Residuales. Simulación 3.

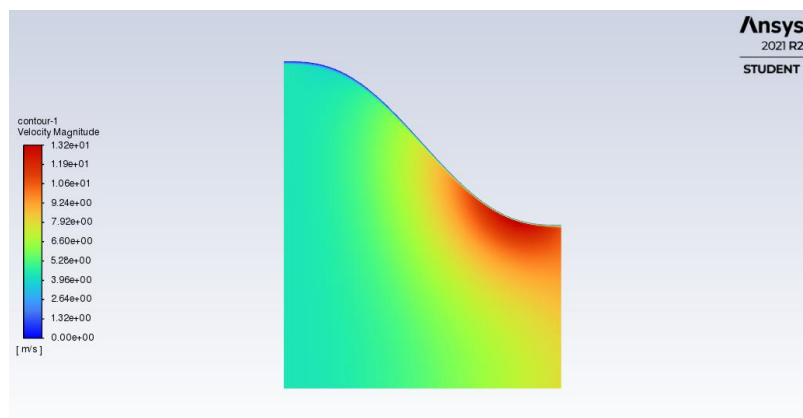


Figura 234. Contorno de velocidad. Simulación 3.

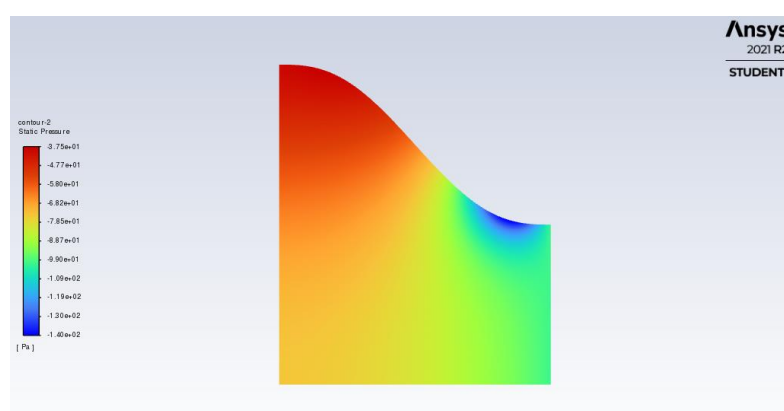


Figura 235. Contorno de presión. Simulación 3.

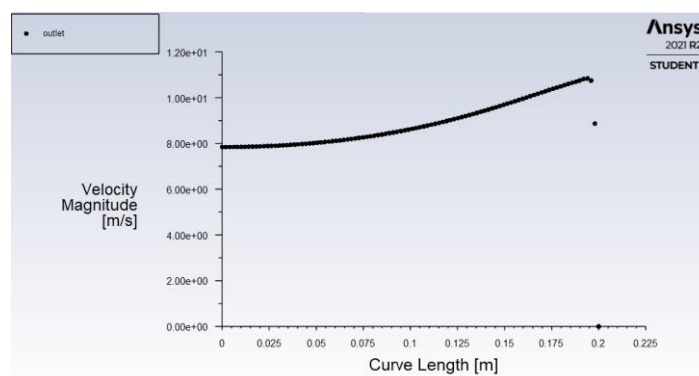


Figura 236. Perfil de velocidad, Simulación 3.

$$Re = 2,88 \cdot 10^5 \quad (44)$$

Se obtienen los mismos resultados que en la simulación 1.

Simulación 4:

Y nuevamente sustituyendo la condición de contorno a la salida por OutFlow:

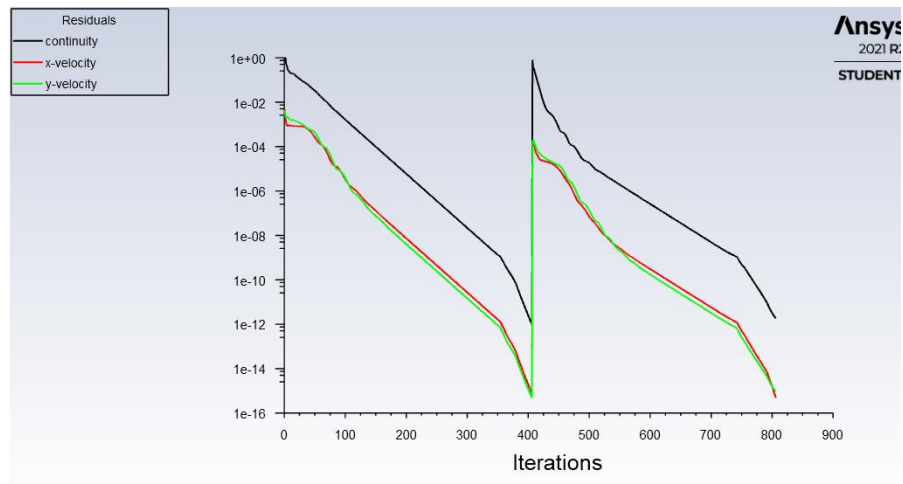


Figura 237. Residuales. Simulación 4.

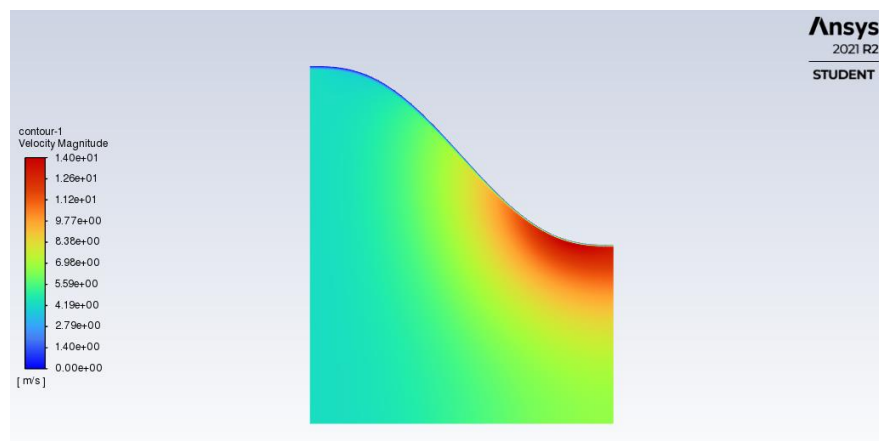


Figura 238. Contorno de velocidad, Simulación 4.

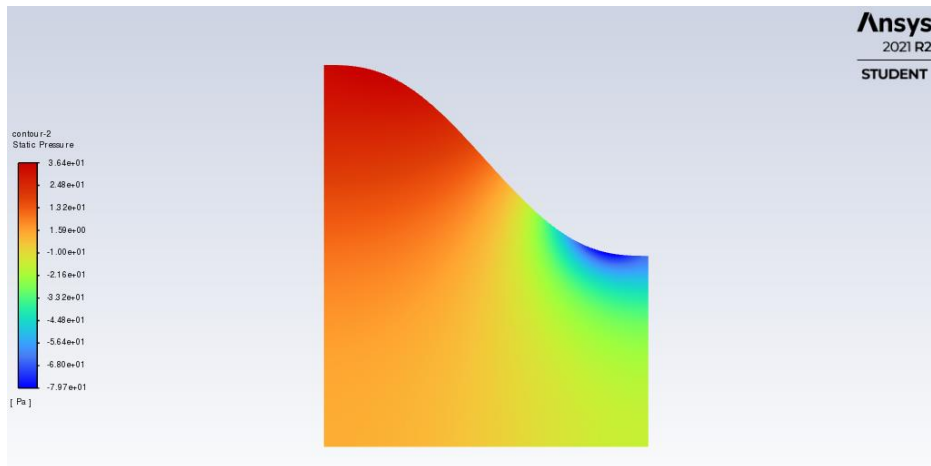


Figura 239. Contorno de presión, Simulación 4.

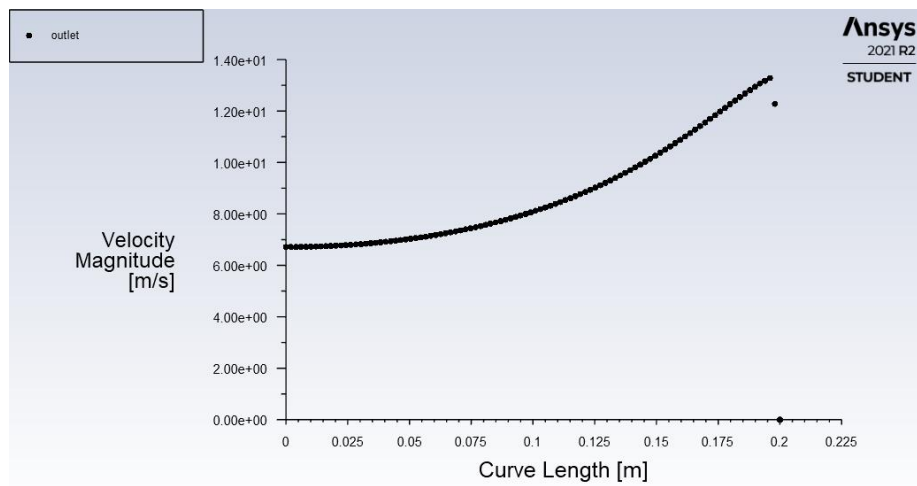


Figura 240. Perfil de velocidad. Simulación 4.

$$Re = 3,01 \cdot 10^5 \quad (45)$$

Con el método Coupled se obtienen las mismas soluciones (aplicando las mismas condiciones de contorno para ambos métodos numéricos).

Es posible afirmar que la condición de contorno tipo OutFlow no es fiable y ofrece un perfil parabólico muy pronunciado (lo contrario a lo que se busca conseguir). Aunque las simulaciones 3 y 4 convergen adecuadamente.

Simulación 5:

A continuación se modifica el modelo de turbulencia, utilizando el k-Épsilon. El primer caso será con velocidad conocida a la entrada de 4,4 m/s y presión atmosférica a la salida. El método utilizado es el Coupled.

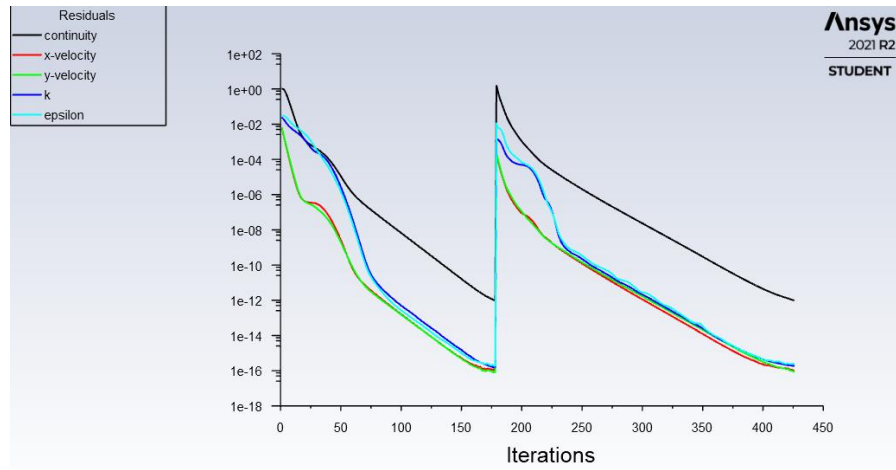


Figura 241. Residuales. Simulación 5.

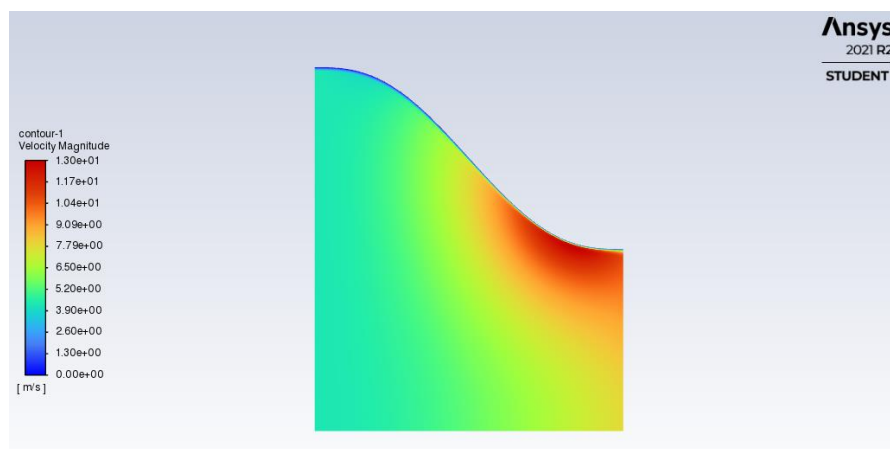


Figura 242. Contorno de velocidad. Simulación 5.

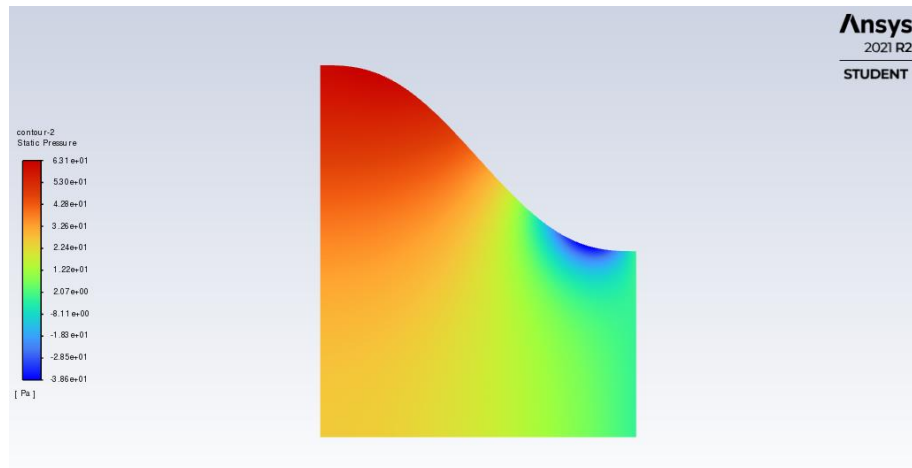


Figura 243. Contorno de presión. Simulación 5.

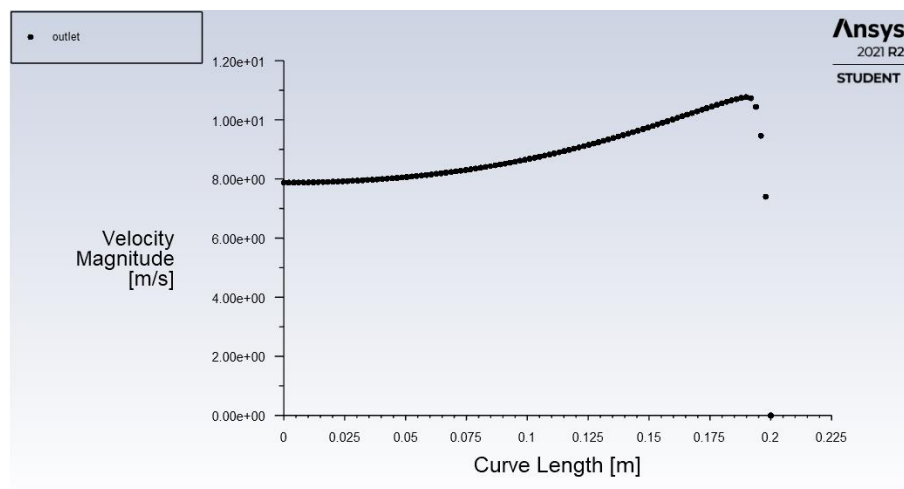


Figura 244. Perfil de velocidad. Simulación 5.

$$Re = 2,88 \cdot 10^5 \quad (46)$$

Con el método SIMPLE se obtiene el mismo perfil de velocidad, que además coincide con las simulaciones 1 y 3. La convergencia del método numérico es buena.

Simulación 6:

Intentando aplicar un gradiente de presión entre la entrada y la salida con el método numérico Coupled, se obtiene el siguiente resultado:

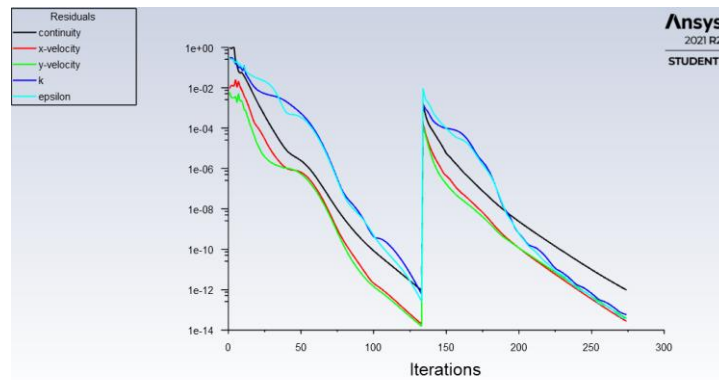


Figura 245. Residuales. Simulación 6.

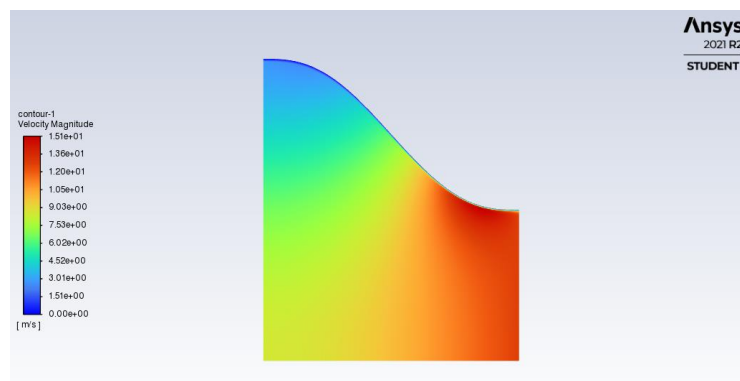


Figura 246. Contorno de velocidad. Simulación 6.

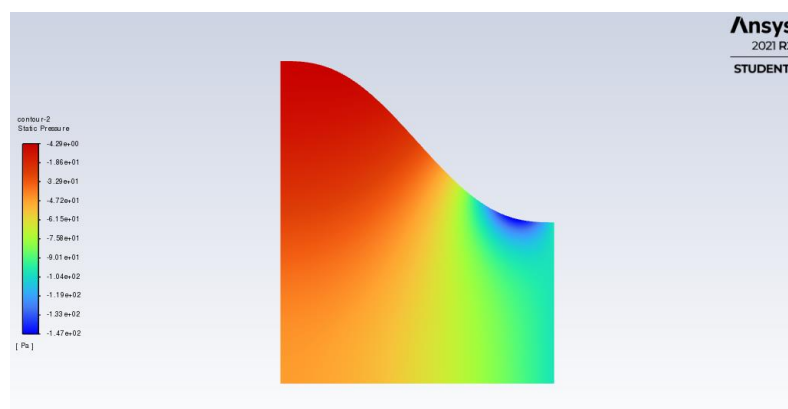


Figura 247. Contorno de presión. Simulación 6.

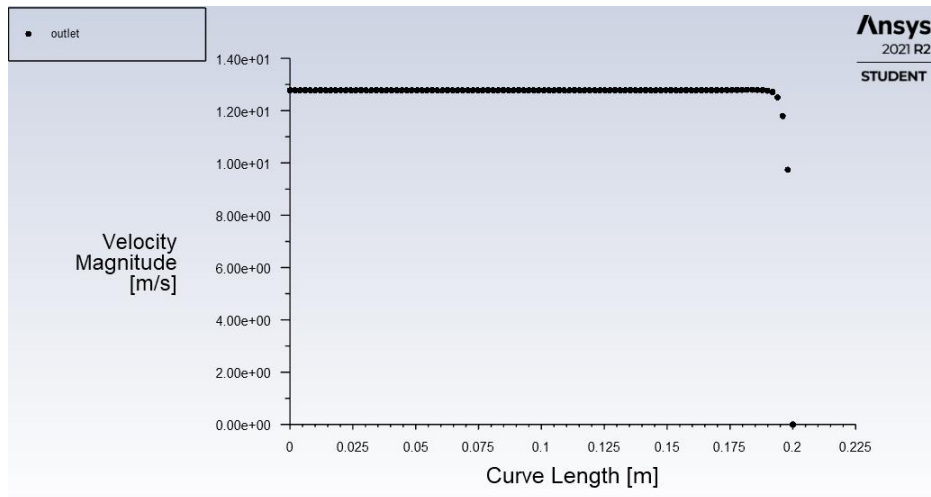


Figura 248. Perfil de velocidad. Simulación 6.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (47)$$

Cabe destacar que aplicando el método SIMPLE el perfil de velocidad a la salida es el mismo.

En este caso la velocidad en los distintos puntos es la misma, dándose un perfil uniforme de velocidad. La convergencia del método numérico es muy buena. Se suele aplicar una condición de contorno de presión a la entrada y a la salida para no condicionar el flujo a la salida de la tobera (que pasa cuando se introduce un valor de velocidad a la entrada de la misma). Además, el movimiento en el túnel de viento será causado por un gradiente de presión desde el exterior hasta el ventilador (simulando con estas condiciones de contorno un caso más realista).

Simulación 7:

A continuación se intentarán variar los coeficientes de subrelajación de la simulación anterior para comprobar si se produce algún cambio en los resultados.

Factores de subrelajación:

- Pressure: 0,3
- Momentum: 0,5
- Turbulent Kinetic Energy: 0,6
- Specific Dissipation Rate: 0,6

Los resultados son los siguientes:

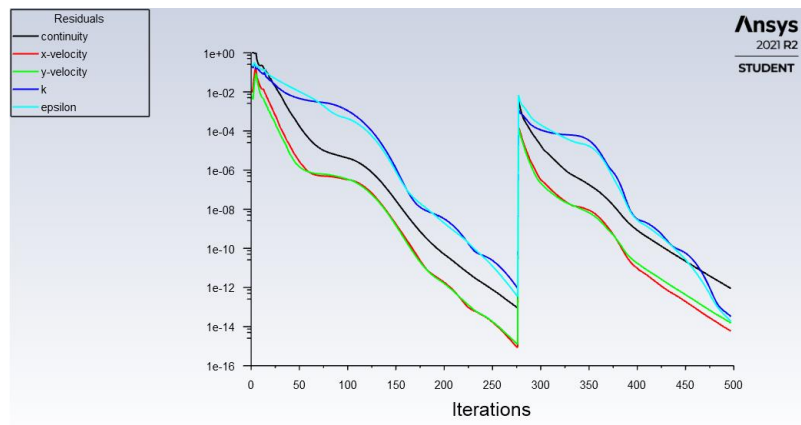


Figura 249. Residuales. Simulación 7.

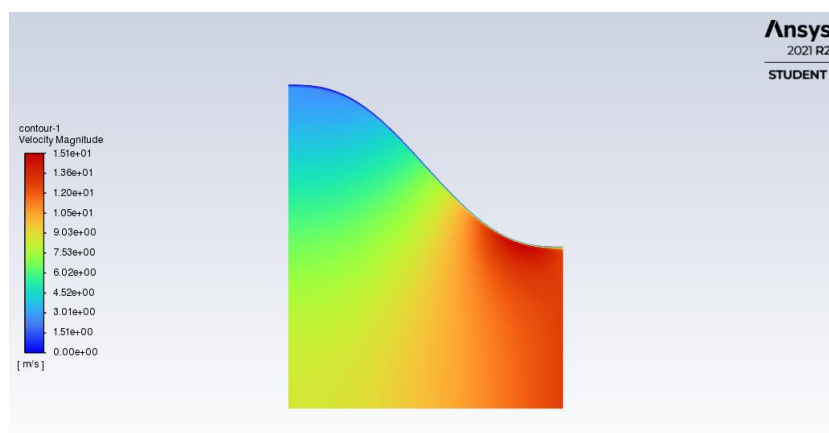


Figura 250. Contorno de velocidad. Simulación 7.

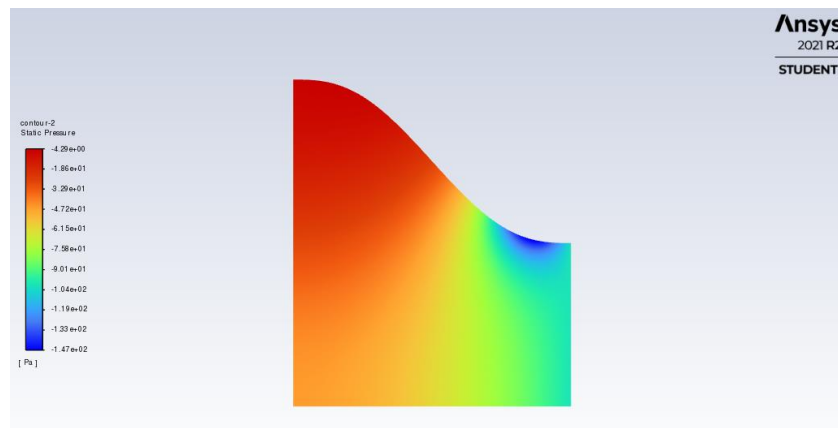


Figura 251. Contorno de presión. Simulación 7.

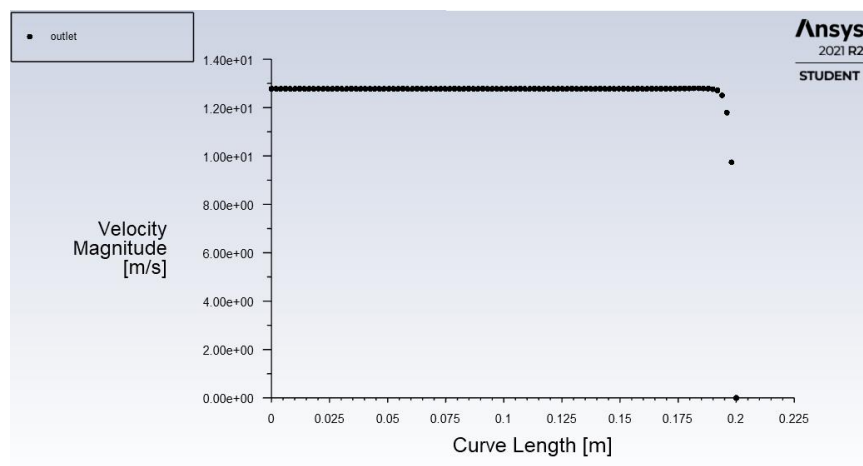


Figura 252. Perfil de velocidad, Simulación 7.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (48)$$

Los resultados obtenidos son los mismos, salvo que la convergencia en este caso es más lenta.

Simulación 8:

Se aplica el mismo caso que en la simulación 6 pero con un modelo $k-\omega$ SST (que es una combinación entre el $k-\epsilon$ y el $k-\omega$).

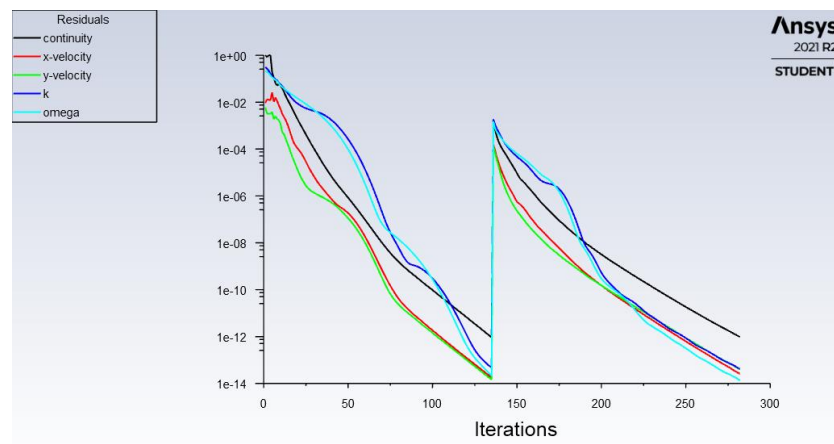


Figura 253. Residuales. Simulación 8.

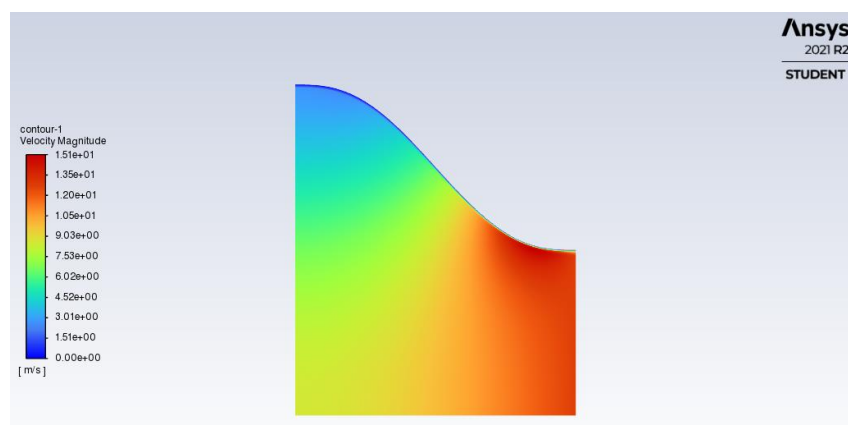


Figura 254. Contorno de velocidad. Simulación 8.

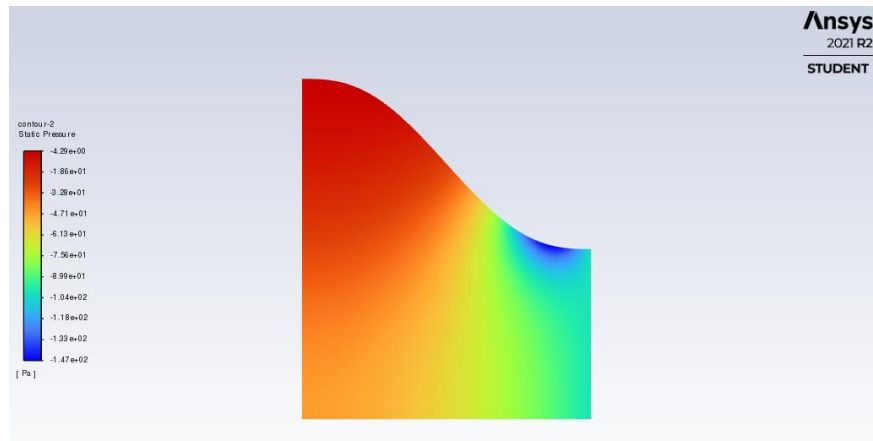


Figura 255. Contorno de presión. Simulación 8.

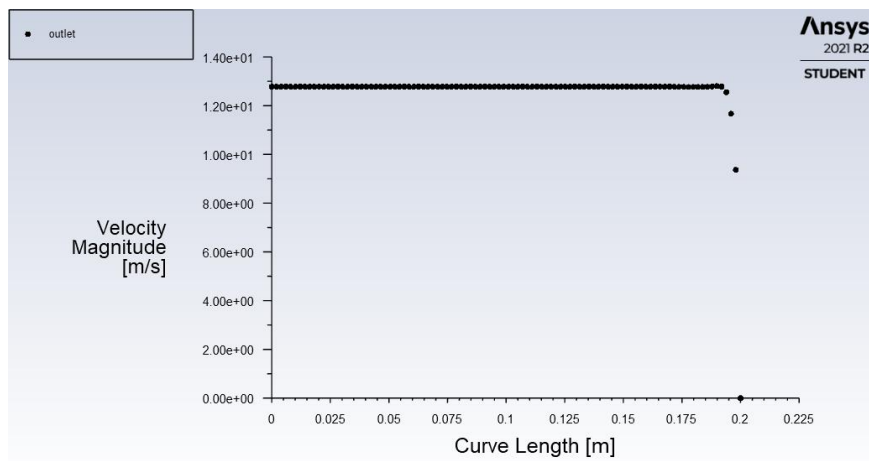


Figura 256. Perfil de velocidad. Simulación 8.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (49)$$

Los resultados son similares a los de la simulación del modelo k- ϵ con la misma configuración.

Simulación 9:

Se realiza igual que la simulación 6 pero con un valor pequeño de caída de presión para comprobar el comportamiento de la tobera para valores pequeños de velocidad.

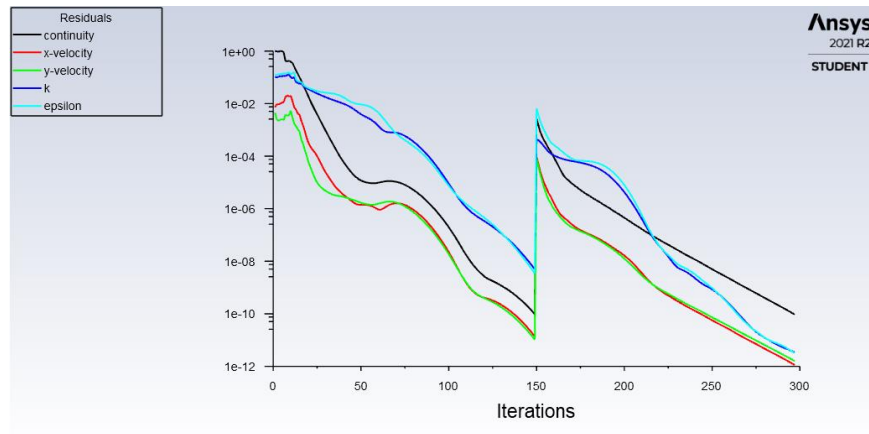


Figura 257. Residuales. Simulación 9.

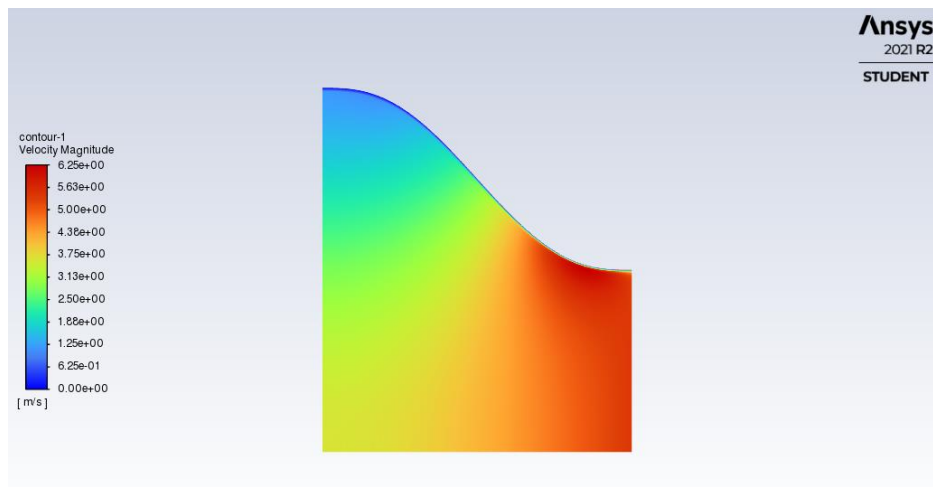


Figura 258. Contorno de velocidad. Simulación 9.

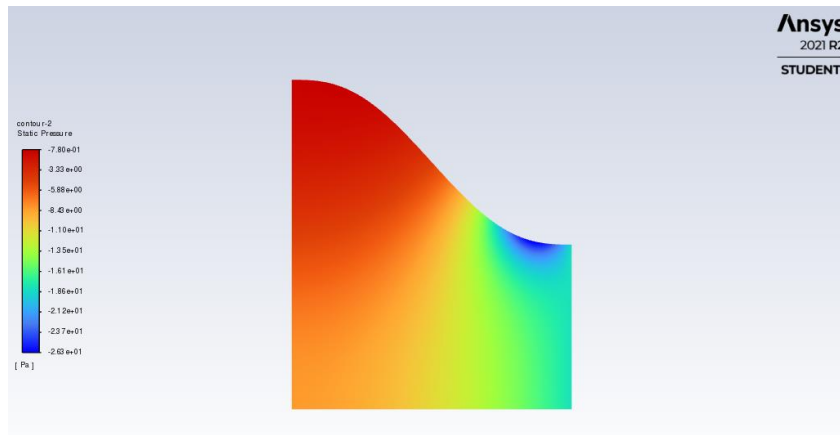


Figura 259. Contorno de presión. Simulación 9.

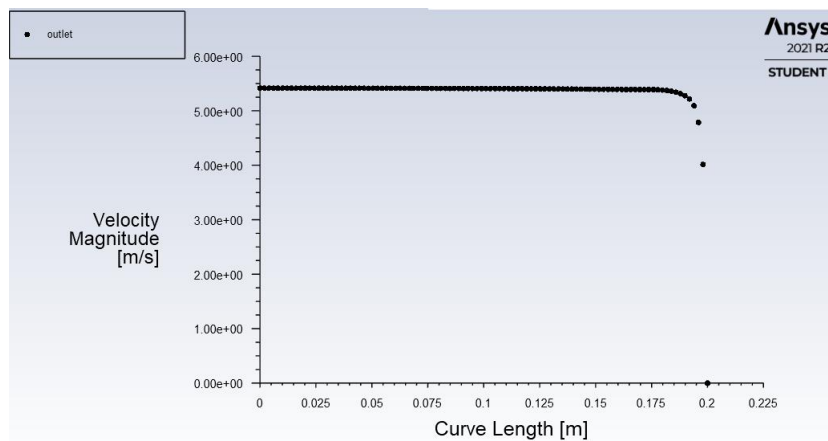


Figura 260. Perfil de velocidad. Simulación 9.

$$Re = 1,51 \cdot 10^5 \quad (50)$$

Se aprecia un comportamiento similar al caso de mayor salto de presión, por lo tanto la tobera puede trabajar para pequeños rangos de velocidades (que pueden ser requeridos para algunos ensayos).

El método que ofrece una mayor uniformidad del flujo a la salida de la tobera es el Coupled, con condiciones de contorno de presión a la entrada y a la salida. El modelo de turbulencia utilizado será el k- ϵ Realizable.

Simulación 10:

Se realizará una simulación con las condiciones elegidas anteriormente aplicando la malla 2, para comprobar que se mantienen los resultados:

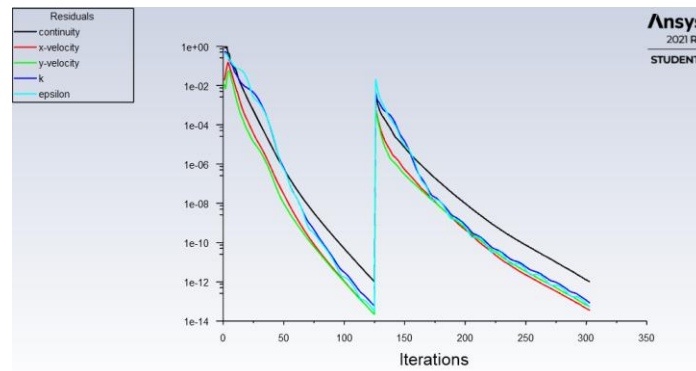


Figura 261. Residuales. Simulación 10.

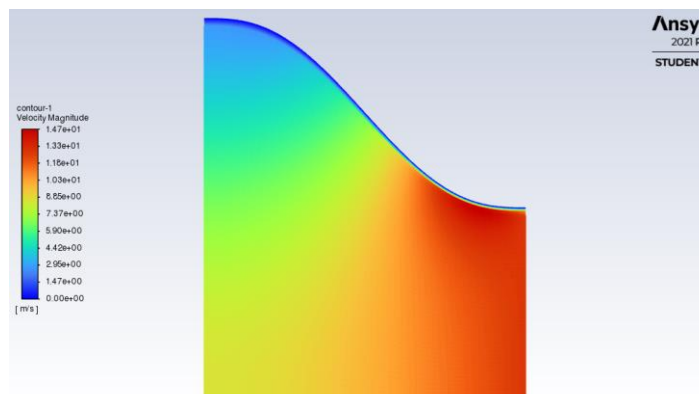


Figura 262. Contorno de velocidad. Simulación 10.

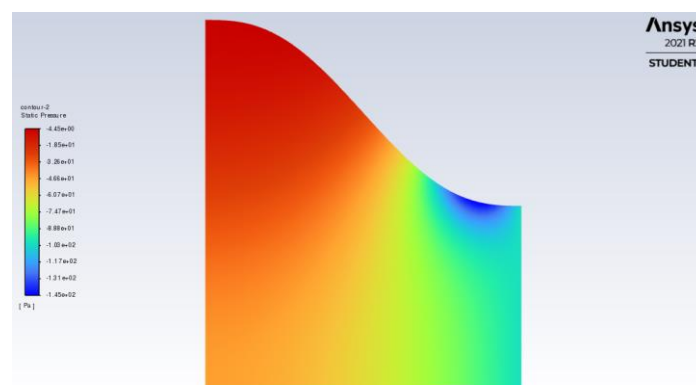


Figura 263. Contorno de presión. Simulación 10.

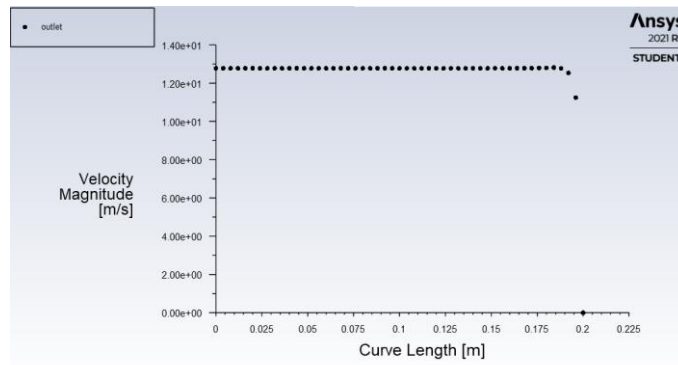


Figura 264. Perfil de velocidad. Simulación 10.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (51)$$

El resultado es similar al de las condiciones elegidas en la simulación 6, por lo que se puede afirmar que los resultados son independientes del mallado aplicado.

Se realizará este mismo procedimiento en la siguiente simulación.

Simulación 11:

Esta simulación tendrá la malla 3 y tiene el mismo objetivo que la anterior.

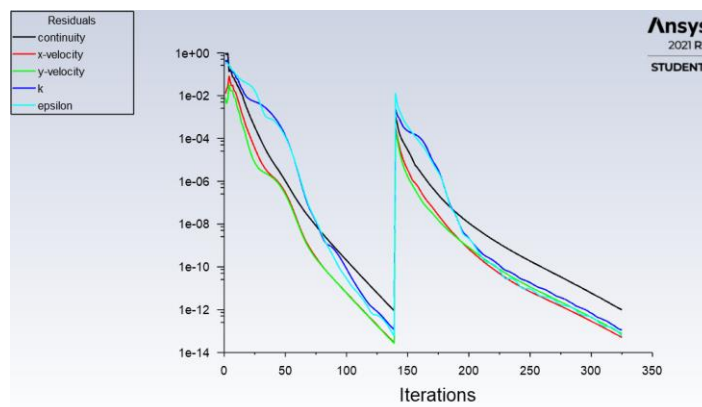


Figura 265. Residuales. Simulación 11.

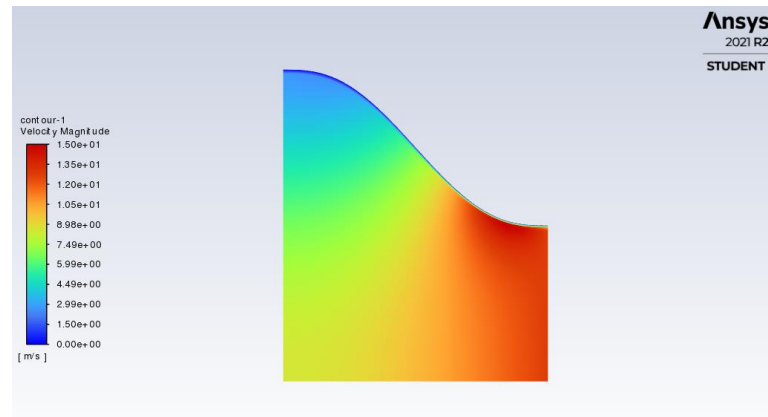


Figura 266. Contorno de velocidad. Simulación 11.

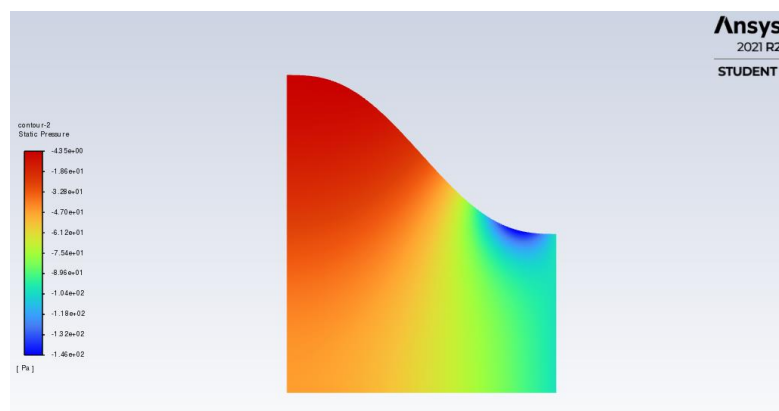


Figura 267. Contorno de presión. Simulación 11.

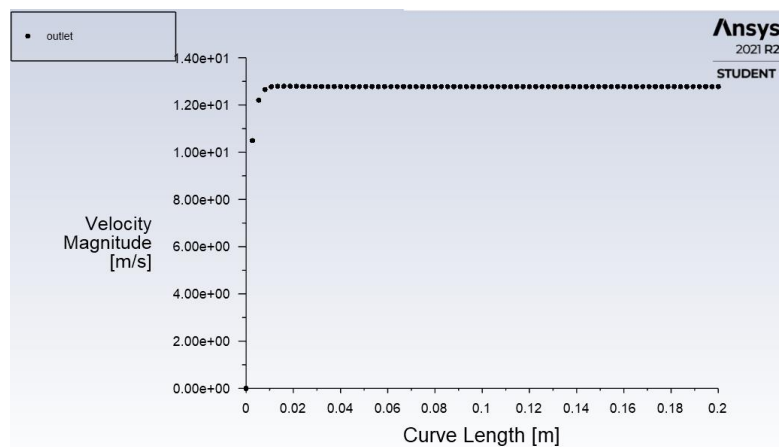


Figura 268. Perfil de velocidad. Simulación 11.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (52)$$

Nuevamente se obtiene un flujo uniforme a la salida de la tobera.

7.3. Anexo III. Comparación de los modelos de las curvas.

Para realizar la simulación de las distintas toberas se utilizará el modelo $k-\epsilon$ con un salto de presión de 100 Pa entre la entrada y la salida y se descartarán aquellos casos en los que se detecte un perfil de velocidad no uniforme a la salida de la tobera o que tengan desventajas significativas en aspectos relacionados con su diseño y construcción. El método numérico aplicado será el Coupled.

Simulación 12:

La simulación del Modelo Grado 6 tiene los siguientes resultados:

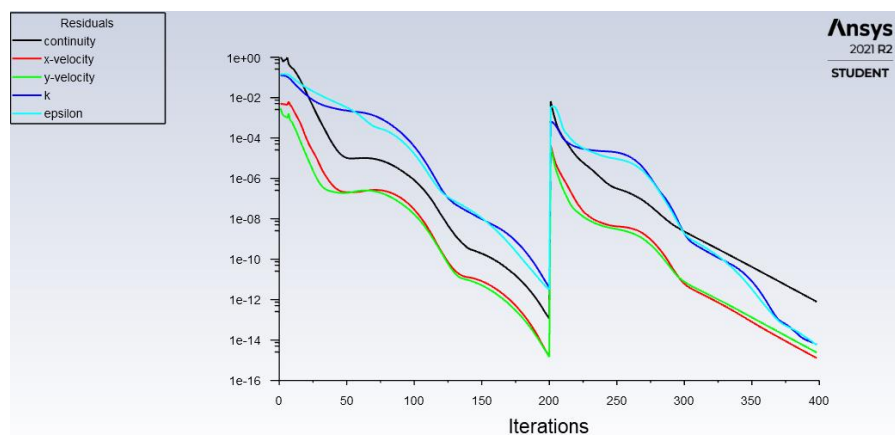


Figura 269. Residuales. Simulación 12.

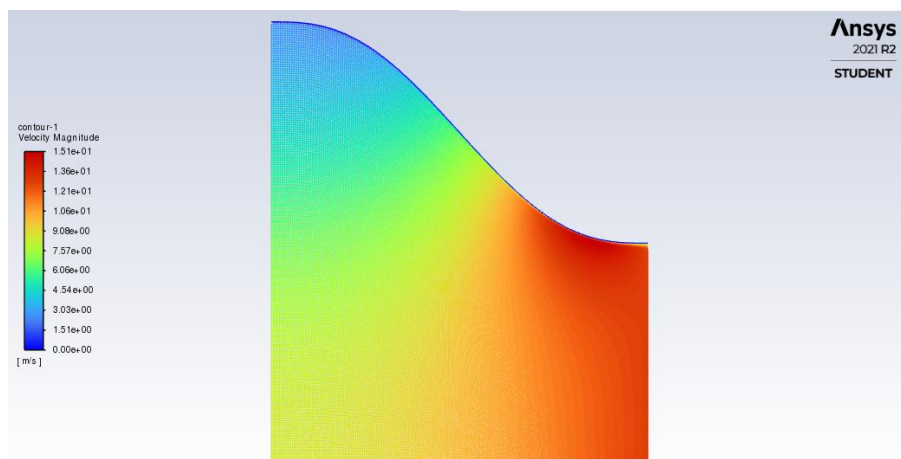


Figura 270. Contorno de velocidad. Simulación 12.

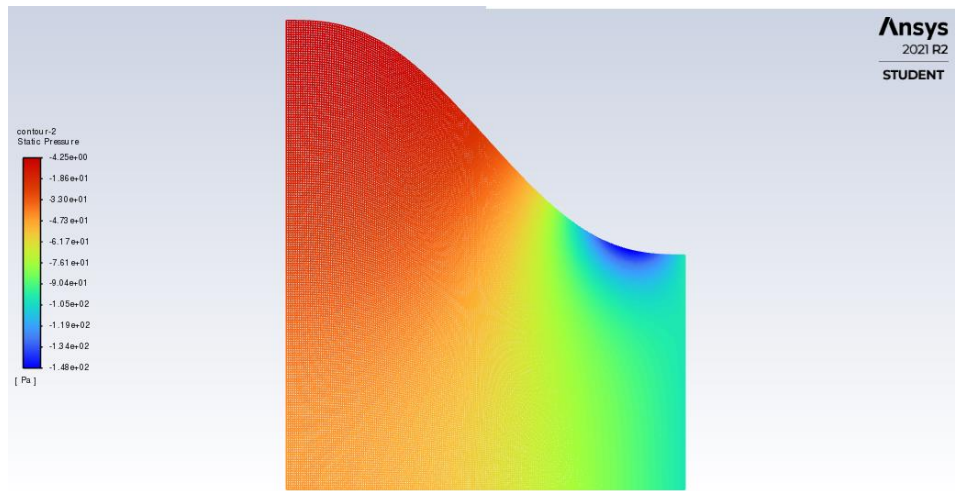


Figura 271. Contorno de presión. Simulación 12.

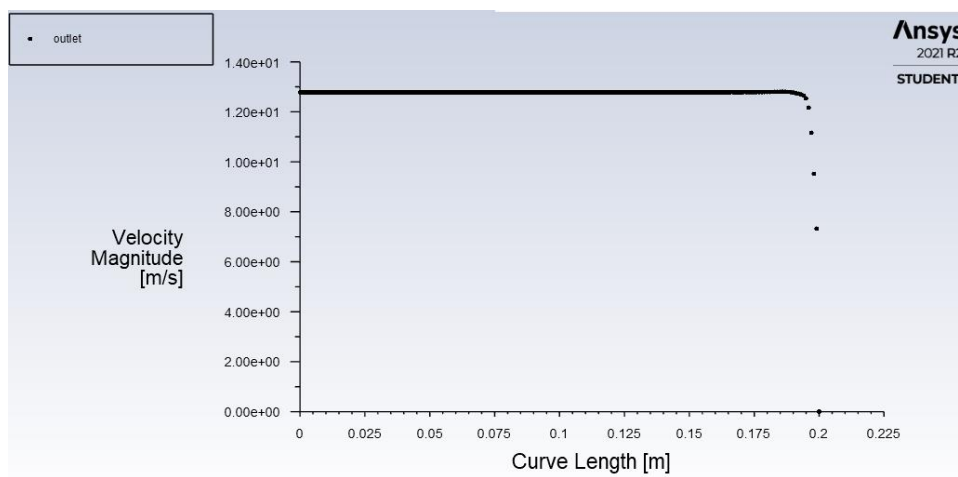


Figura 272. Perfil de velocidad. Simulación 12.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (53)$$

Es similar al modelo principal, una buena curva, con un flujo uniforme a la salida y con facilidad en el diseño y construcción de la misma.

Simulación 13:

La simulación del Modelo Grado 8 tiene los siguientes resultados:

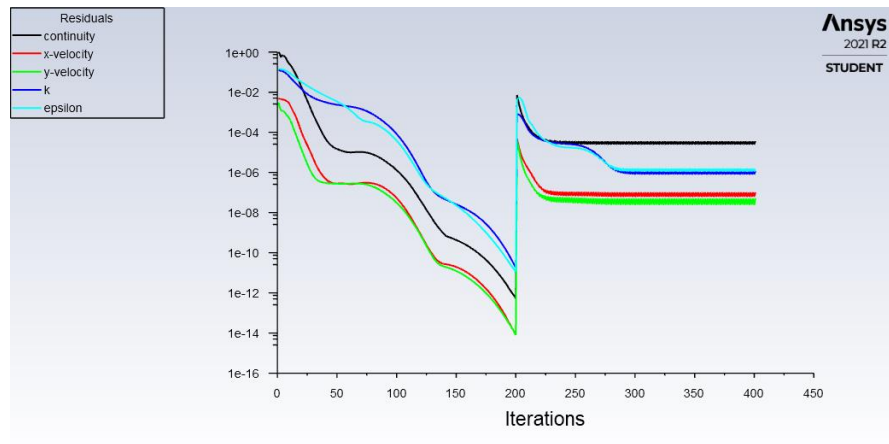


Figura 273. Residuales. Simulación 13.

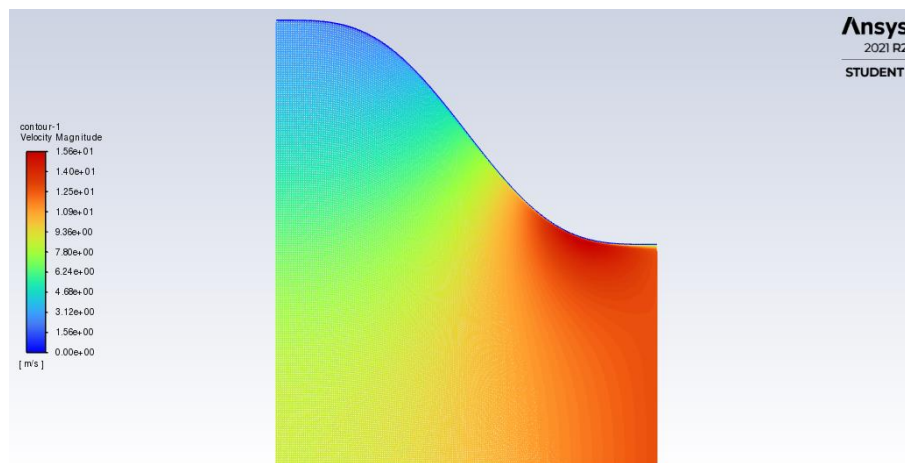


Figura 274. Contorno de velocidad. Simulación 13.

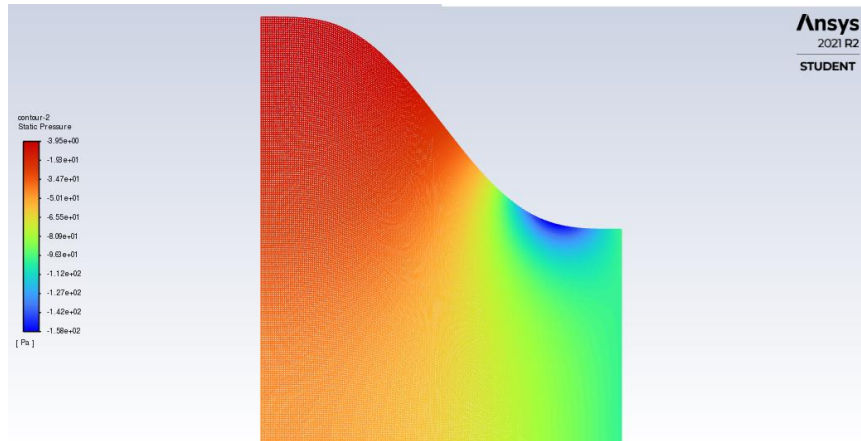


Figura 275. Contorno de presión. Simulación 13.

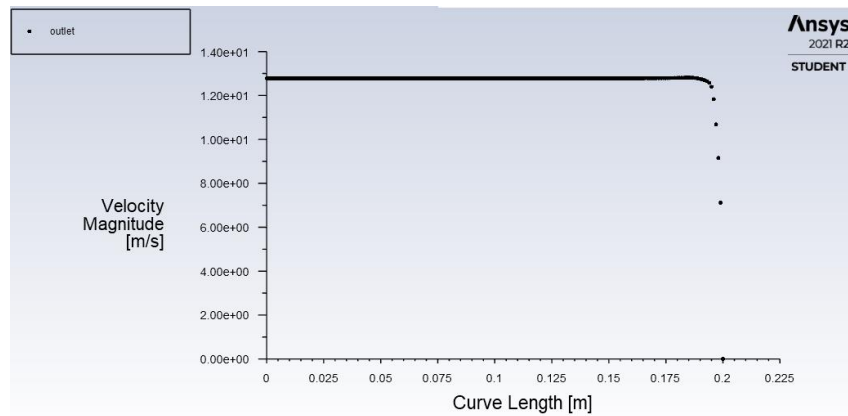


Figura 276. Perfil de velocidad. Simulación 13.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (54)$$

Esta tobera tiene propiedades similares a la anterior, sin embargo la convergencia de la simulación es notablemente peor con respecto al resto de casos. Pese a que los residuales en este caso no son altos, existen otras posibilidades más seguras, por lo tanto se descarta esta posible tobera.

Simulación 14:

La simulación del Modelo Grado 10 tiene los siguientes resultados:

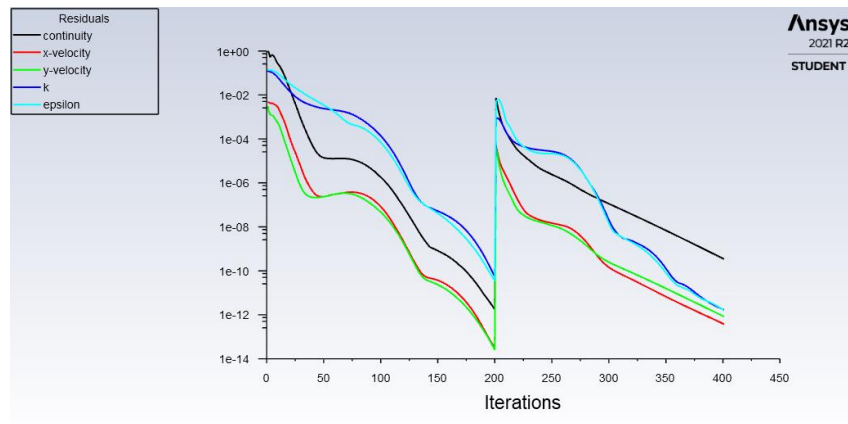


Figura 277. Residuales. Simulación 14.

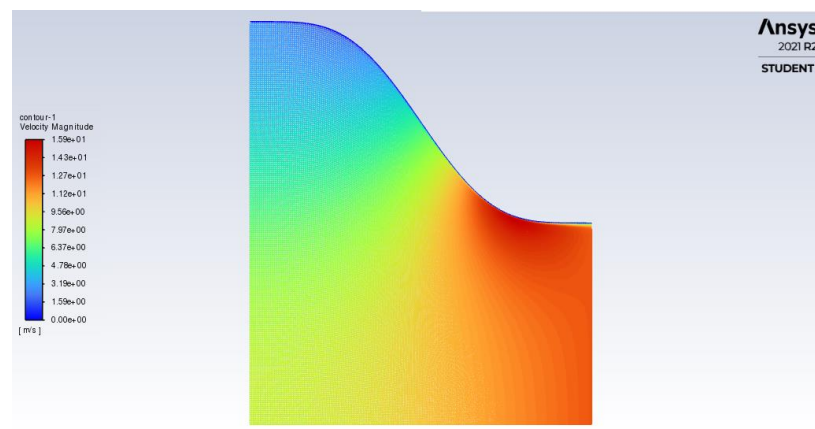


Figura 278. Contorno de velocidad. Simulación 14.

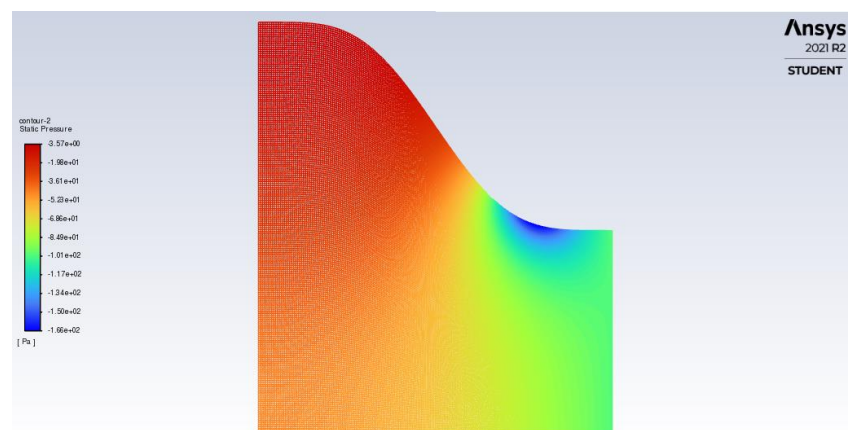


Figura 279. Contorno de presión. Simulación 14.

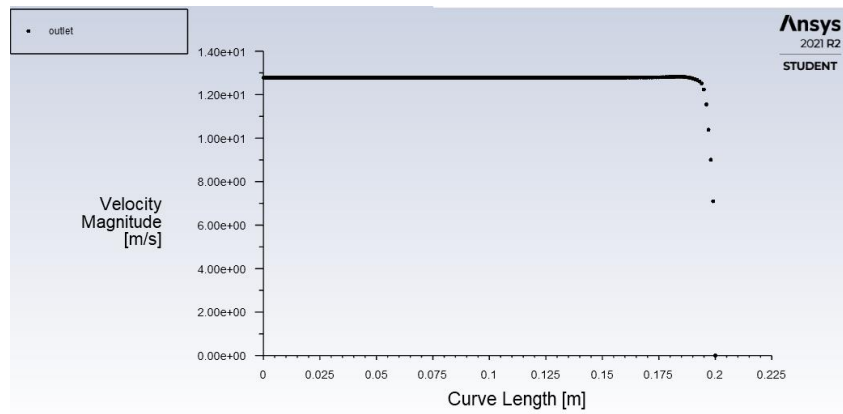


Figura 280. Perfil de velocidad. Simulación 14.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (55)$$

Esta tobera tiene un flujo uniforme a la salida y la simulación numérica es adecuada, sin embargo, tiene una pendiente demasiado pronunciada en su zona central debido a que tiene un decrecimiento mucho mayor (al tener polinomios de grados muy altos), pudiendo generar más pérdida de carga que otras toberas más suaves. Además, durante la fabricación de la tobera será necesario lijar su superficie interior, y al tener tan poca pendiente en su parte final, es difícil conservar esa geometría con tanta exactitud sin afectar negativamente al flujo que circule en su interior.

Simulación 15:

La simulación del modelo 0.375x_m tiene los siguientes resultados:

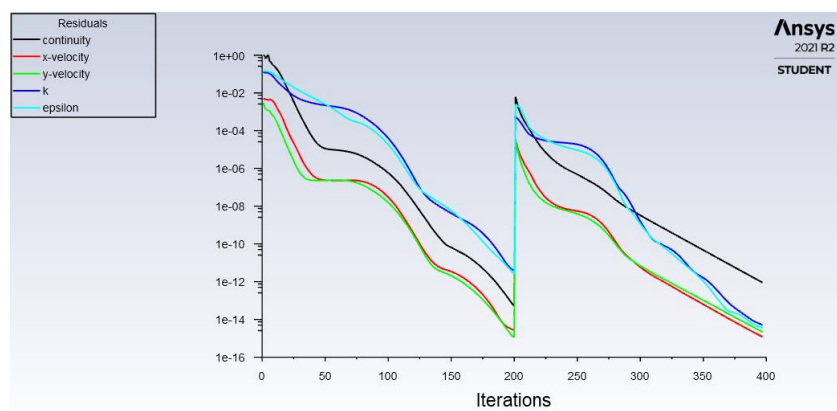


Figura 281. Residuales. Simulación 15.

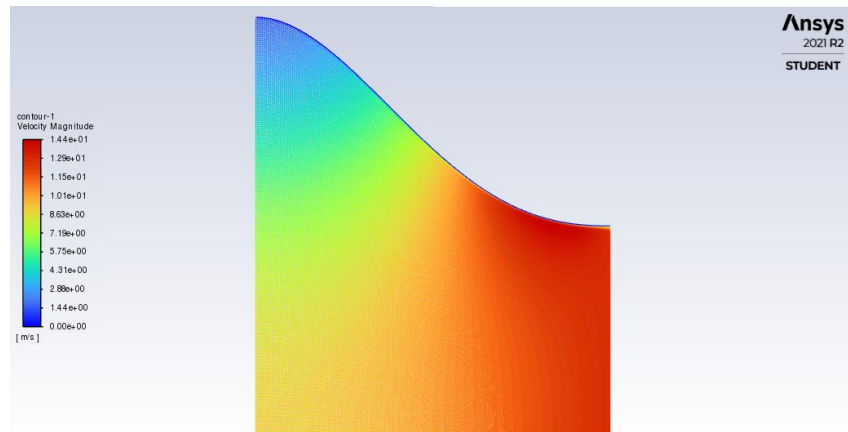


Figura 282. Contorno de velocidad. Simulación 15.

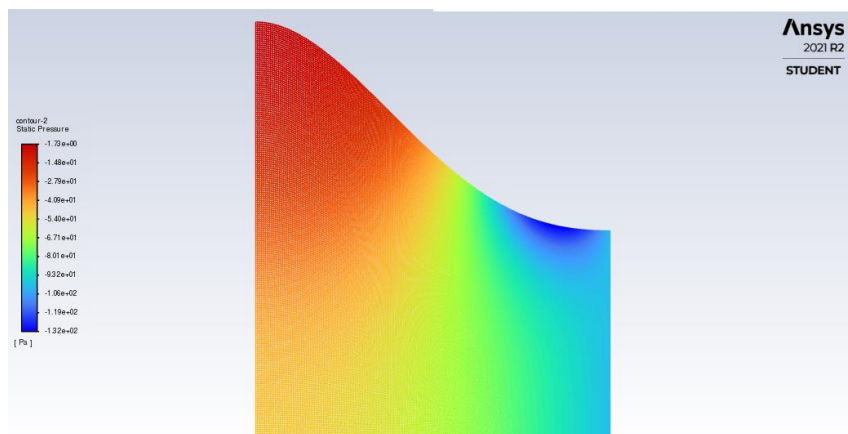


Figura 283. Contorno de presión. Simulación 15.

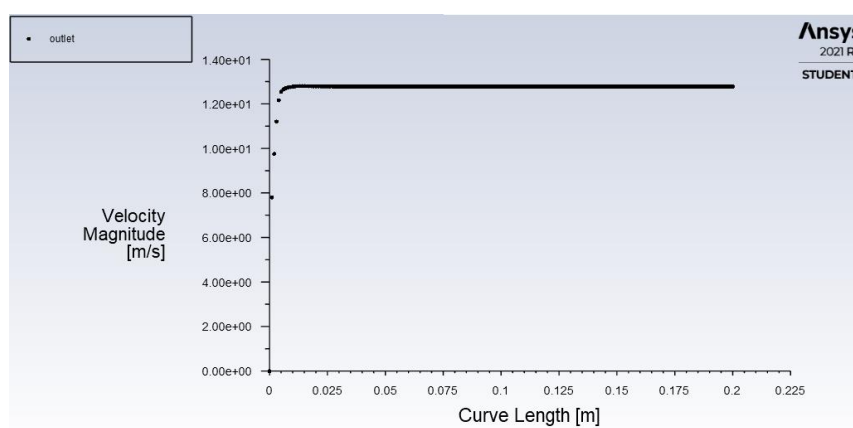


Figura 284. Perfil de velocidad. Simulación 15.

$$Re = 3.5 \cdot 10^5$$

(56)

Esta tobera tiene una desventaja con respecto a las tres anteriores. Al tener más limitaciones en las condiciones de contorno de las ecuaciones que la definen, no es posible indicar que las derivadas de orden superior a la entrada sean nulas, por lo tanto, pese a que la entrada es tangente a la horizontal, no es muy suave. Esta tobera se descarta por ese motivo.

Simulación 16:

La simulación del modelo $0.5x_m$ tiene los siguientes resultados:

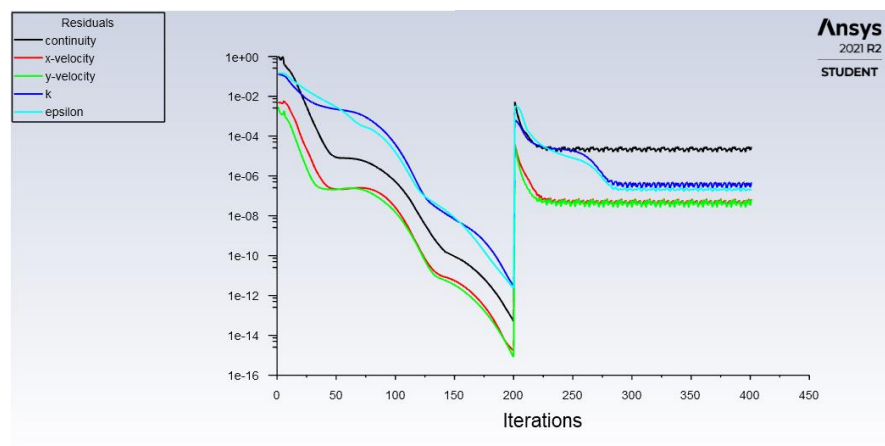


Figura 285. Residuales. Simulación 16.

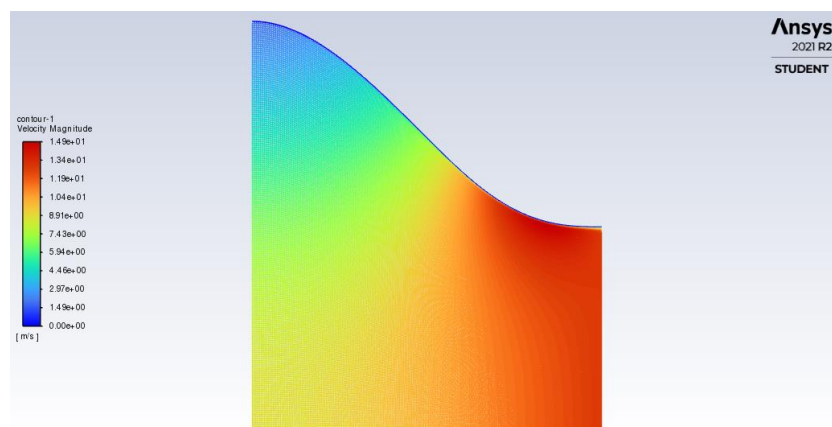


Figura 286. Contorno de velocidad. Simulación 16.

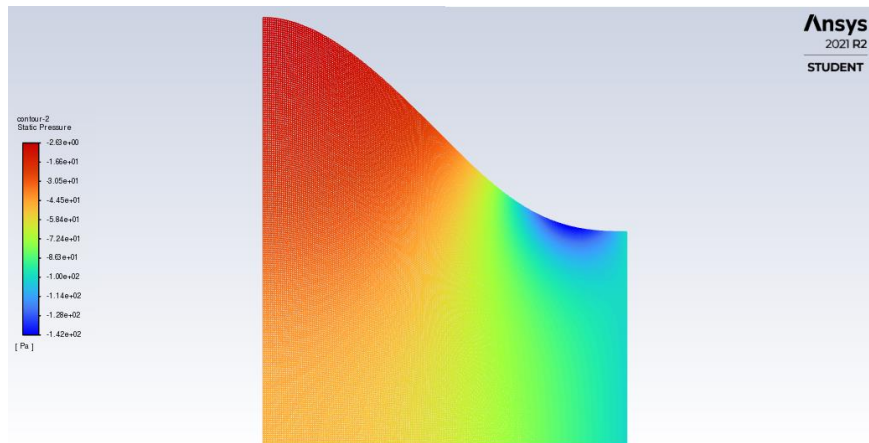


Figura 287. Contorno de presión. Simulación 16.

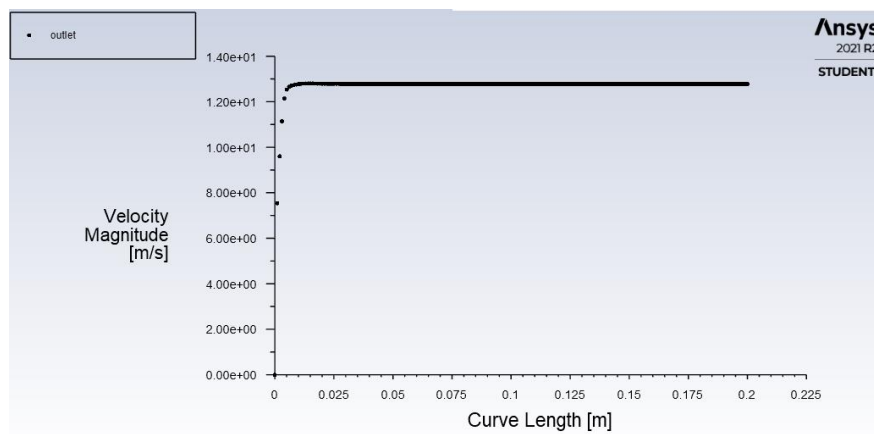


Figura 288. Perfil de velocidad. Simulación 16.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (57)$$

Ocurre lo mismo que en la simulación anterior. Además de que los residuales alertan sobre una mala convergencia, siendo poco fiables los resultados de la simulación de este diseño.

Simulación 17:

La simulación del modelo 0,625x_m tiene los siguientes resultados:

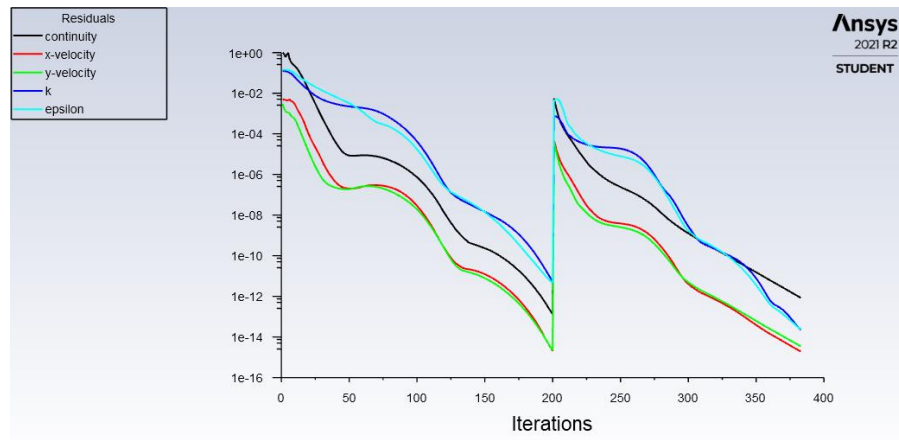


Figura 289. Residuales. Simulación 17.

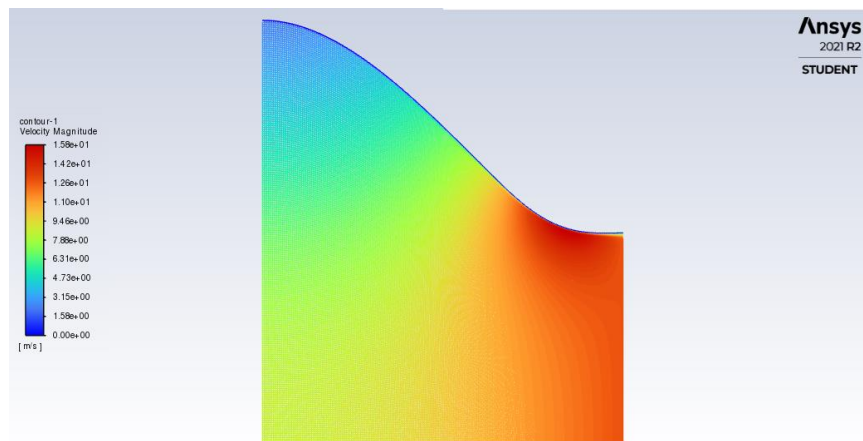


Figura 290. Contorno de velocidad. Simulación 17.

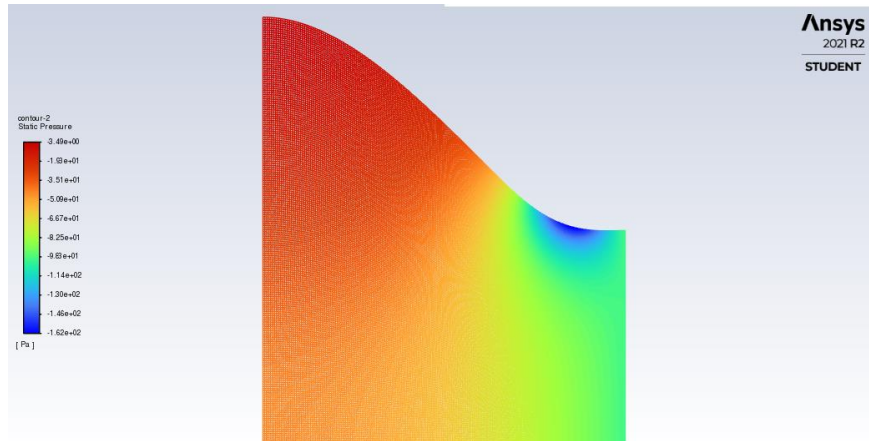


Figura 291. Contorno de presión. Simulación 17.

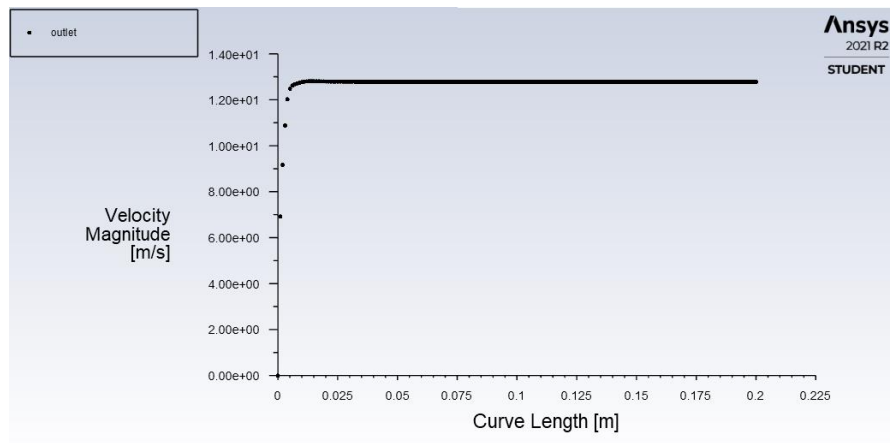


Figura 292. Perfil de velocidad. Simulación 17.

$$Re = 3,5 \cdot 10^5 \quad (58)$$

Ocurre lo mismo que en las simulaciones anteriores. Además, en estos tres últimos casos existe otra importante desventaja a nivel de diseño, que es la composición a trozos de las funciones que definen las curvas. A lo largo del proceso, se requiere utilizar las ecuaciones para introducir las curvas en programas de modelado 3D o para simulación, esto requiere el doble de tiempo si es necesario introducir el doble de ecuaciones, incluso en algunas ocasiones el mallado de algunas geometrías puede resultar erróneo o incorrecto porque se detecte una falta de continuidad en el punto x_m de unión entre ambas soluciones matemáticas.

7.4. Anexo IV. Resultados de la comprobación de uniformidad de flujo.

En este anexo se introducen los resultados de velocidad media e intensidad turbulenta de todos los puntos estudiados junto con la representación gráfica de la velocidad frente al tiempo.

Agujero 1- Altura 1.

Las velocidades son:

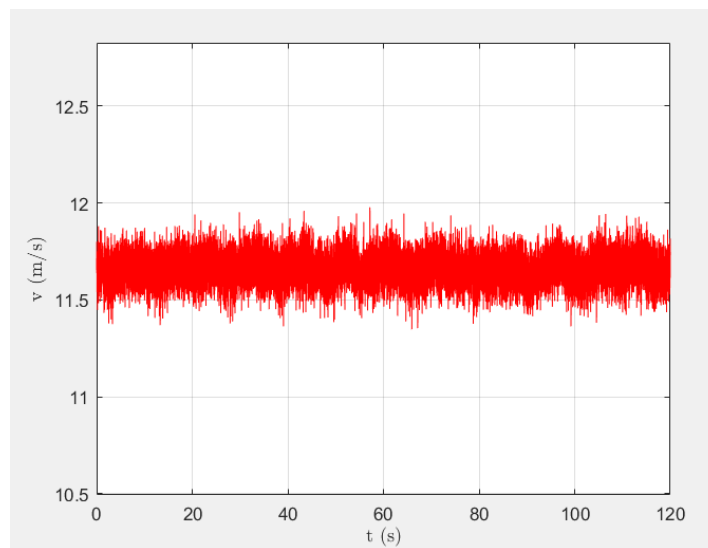


Figura 293. Velocidades del agujero 1 con altura 1.

La velocidad media es de 11,6602 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6704%.

Agujero 1 – Altura 2.

Las velocidades son:

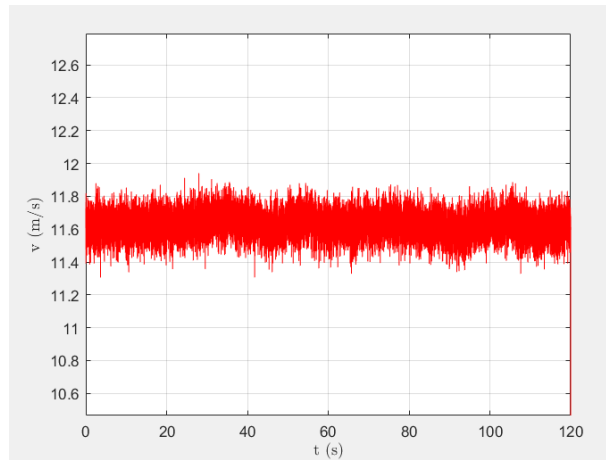


Figura 294. Velocidades del agujero 1 con altura 2.

La velocidad media es de 11,6283 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9399%.

Agujero 1 – Altura 3.

Las velocidades son:

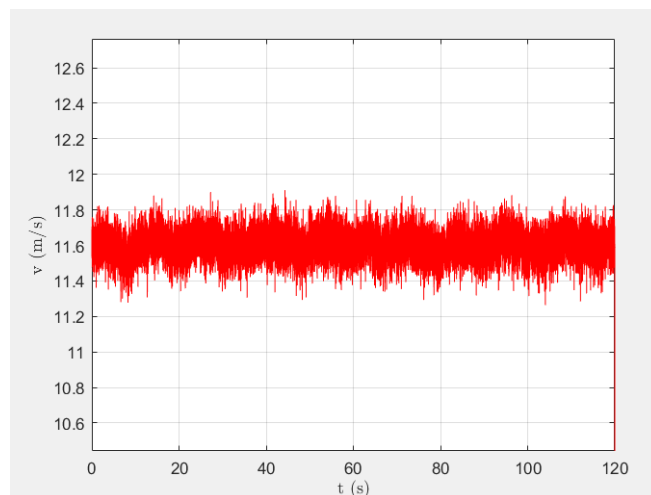


Figura 295. Velocidades del agujero 1 con altura 3.

La velocidad media es de 11,6027 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9531%.

Agujero 2 – Altura 1.

Las velocidades son:

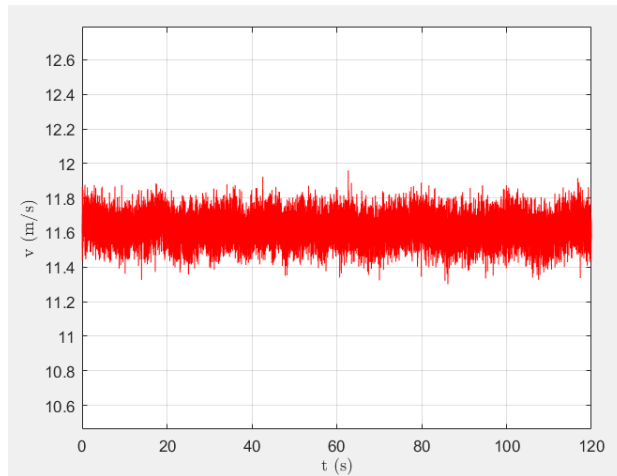


Figura 296. Velocidades del agujero 2 con altura 1.

La velocidad media es de 11,6244 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6774%.

Agujero 2 – Altura 2.

Las velocidades son:

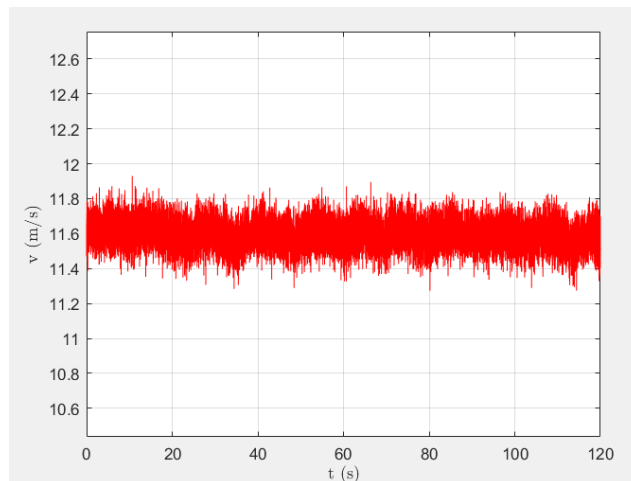


Figura 297. Velocidades del agujero 2 con altura 2.

La velocidad media es de 11,5964 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6871%.

Agujero 2 – Altura 3.

Las velocidades son:

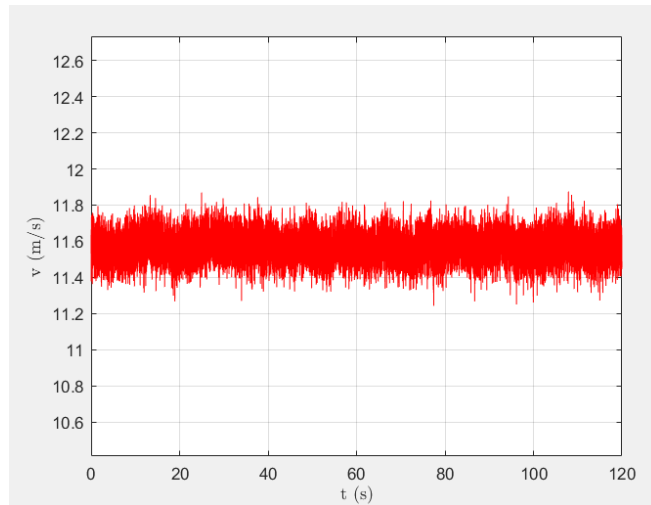


Figura 298. Velocidades del agujero 2 con altura 3.

La velocidad media es de 11,5702 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6745%.

Agujero 2 – Altura 4.

Las velocidades son:

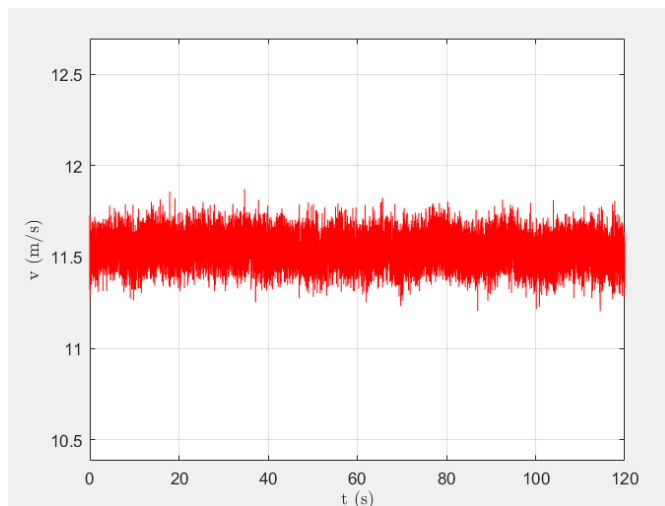


Figura 299. Velocidades del agujero 2 con altura 4.

La velocidad media es de 11,5403 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,704%.

Agujero 2 – Altura 5.

Las velocidades son:

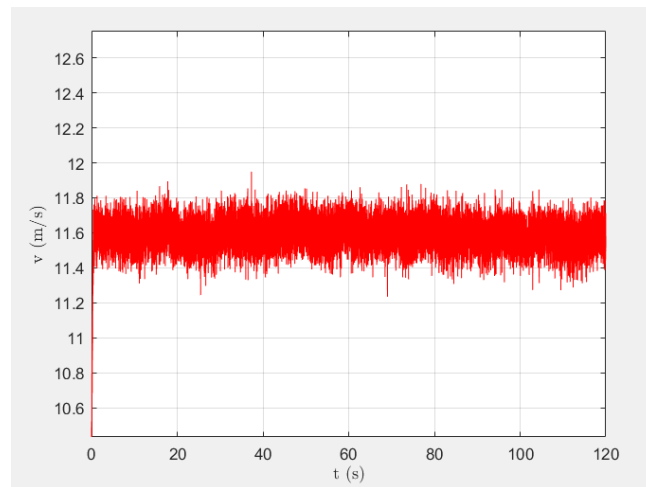


Figura 300. Velocidades del agujero 2 con altura 5.

La velocidad media es de 11,5702 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6745%.

Agujero 2 – Altura 6.

Las velocidades son:

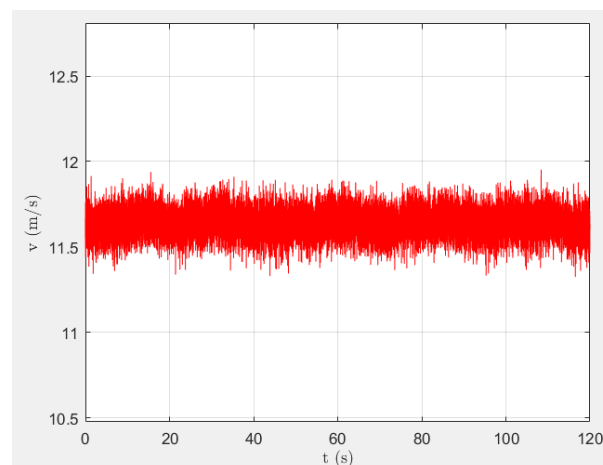


Figura 301. Velocidades del agujero 2 con altura 6.

La velocidad media es de 11,6407 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6843%.

Agujero 3 – Altura 1.

Las velocidades son:

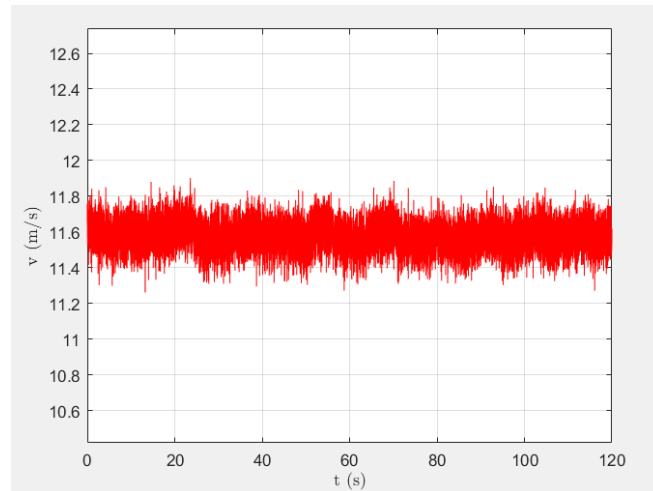


Figura 302. Velocidades del agujero 3 con altura 1.

La velocidad media es de 11,5414 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,694%.

Agujero 3 – Altura 2.

Las velocidades son:

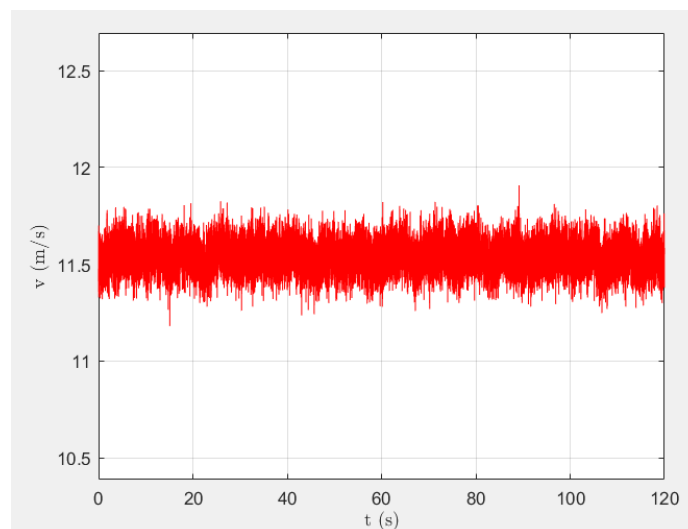


Figura 303. Velocidades del agujero 3 con altura 2.

La velocidad media es de 11,5776 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6888%.

Agujero 3 – Altura 3.

Las velocidades son:

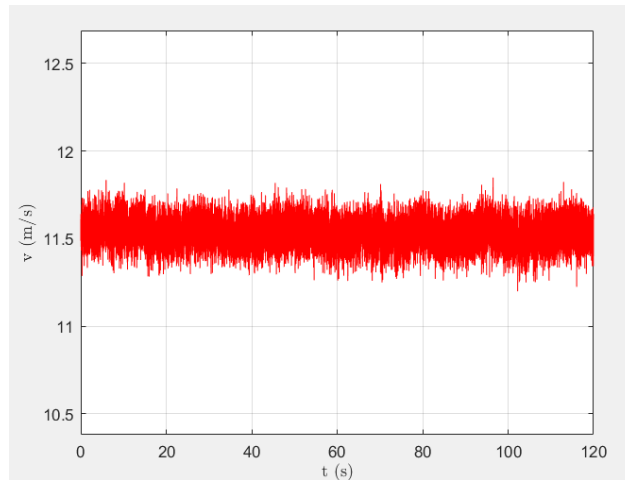


Figura 304. Velocidades del agujero 3 con altura 3.

La velocidad media es de 11,5348 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6973%.

Agujero 3 – Altura 4.

Las velocidades son:

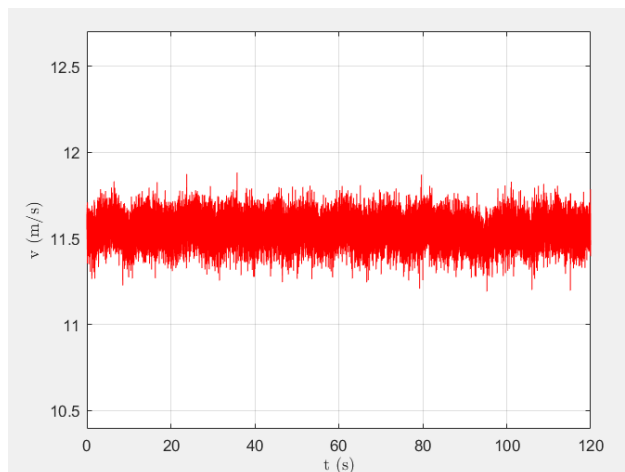


Figura 305. Velocidades del agujero 3 con altura 4.

La velocidad media es de 11,5485 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,7085%.

Agujero 3 – Altura 5.

Las velocidades son:

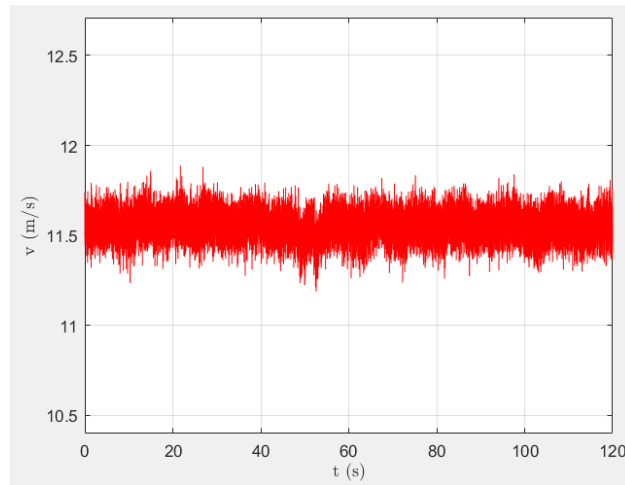


Figura 306. Velocidades del agujero 3 con altura 5.

La velocidad media es de 11,5549 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6969%.

Agujero 3 – Altura 6.

Las velocidades son:

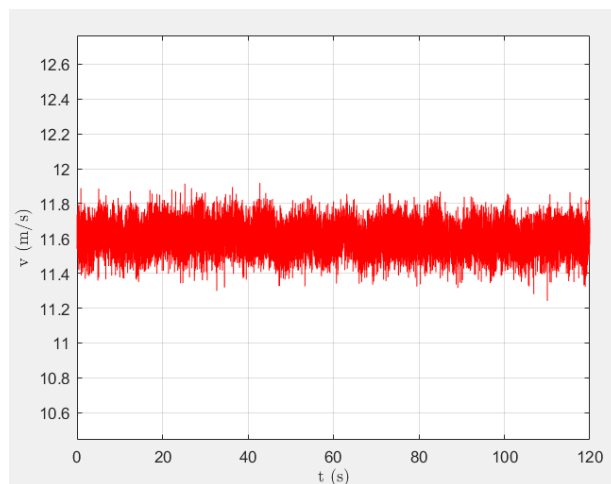


Figura 307. Velocidades del agujero 3 con altura 6.

La velocidad media es de 11,6045 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6945%.

Agujero 4 – Altura 1.

Las velocidades son:

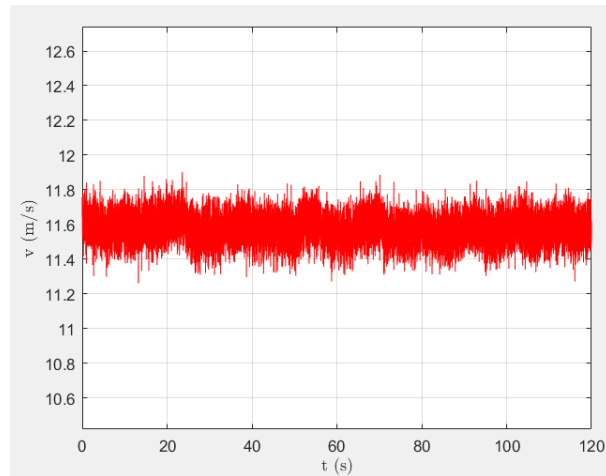


Figura 308. Velocidades del agujero 4 con altura 1.

La velocidad media es de 11,5776 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6888%.

Agujero 4 – Altura 2.

Las velocidades son:

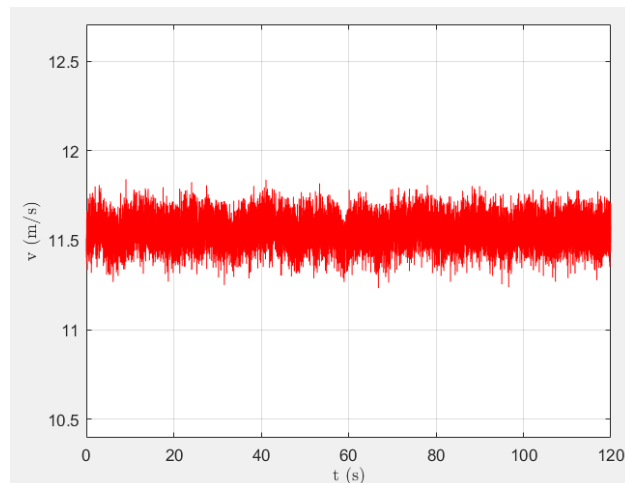


Figura 309. Velocidades del agujero 4 con altura 2.

La velocidad media es de 11,5511 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6898%.

Agujero 4 – Altura 3.

Las velocidades son:

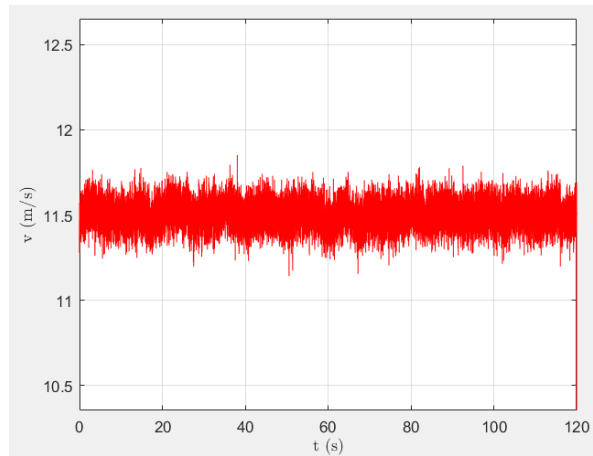


Figura 310. Velocidades del agujero 4 con altura 3.

La velocidad media es de 11,5028 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9421%.

Agujero 4 – Altura 4.

Las velocidades son:

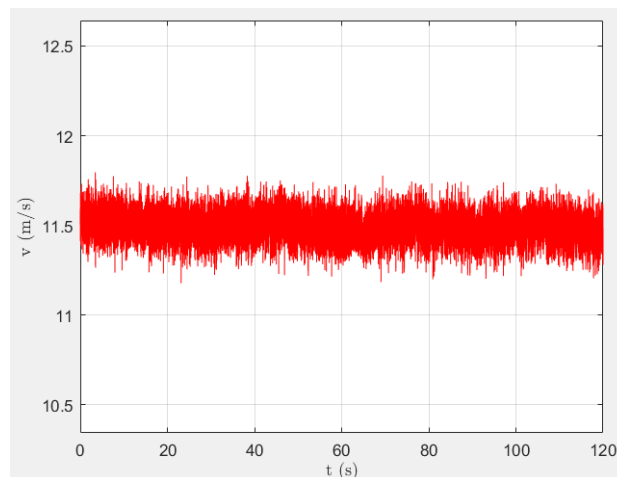


Figura 311. Velocidades del agujero 4 con altura 4.

La velocidad media es de 11,4926 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6961%.

Agujero 4 – Altura 5.

Las velocidades son:

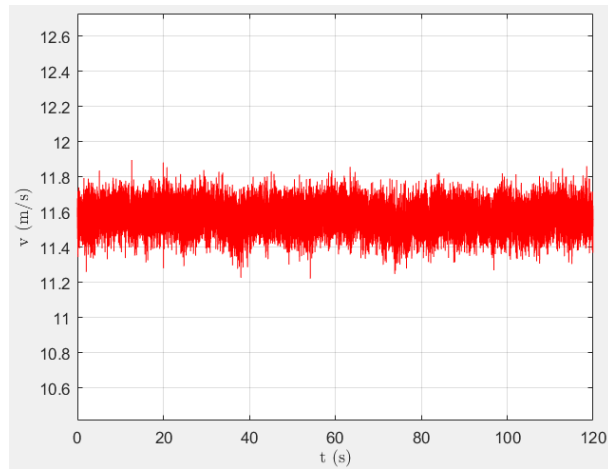


Figura 312. Velocidades del agujero 4 con altura 5.

La velocidad media es de 11,5712 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6854%.

Agujero 4 – Altura 6.

Las velocidades son:

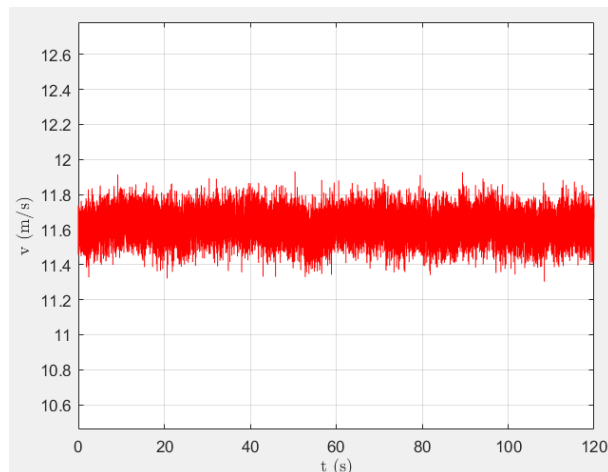


Figura 313. Velocidades del agujero 4 con altura 6.

La velocidad media es de 11,6216 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6814%.

Agujero 5 – Altura 1.

Las velocidades son:

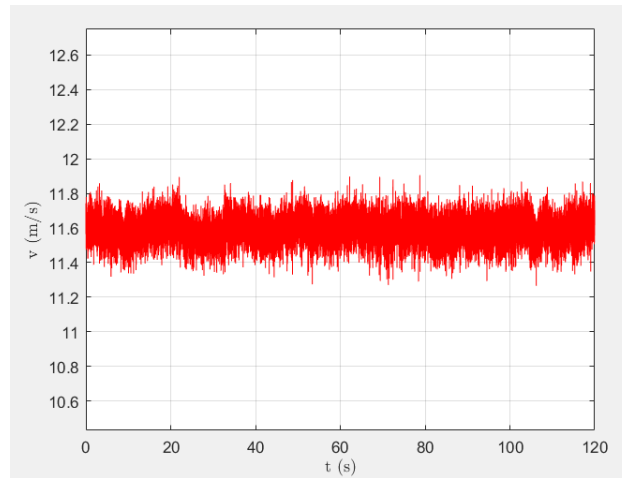


Figura 314. Velocidades del agujero 5 con altura 1.

La velocidad media es de 11,5892 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6838%.

Agujero 5 – Altura 2.

Las velocidades son:

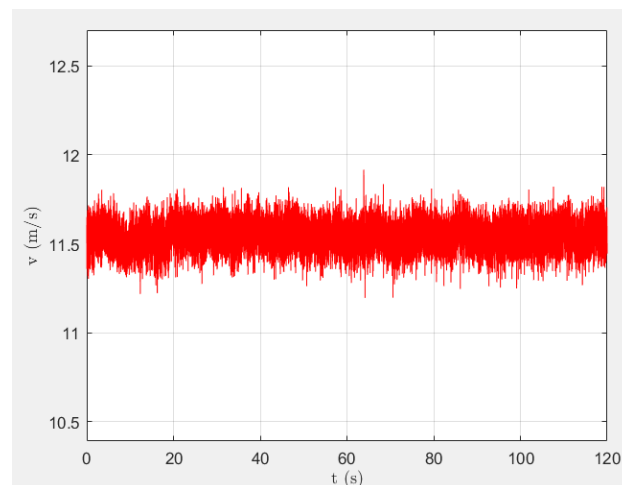


Figura 315. Velocidades del agujero 5 con altura 2.

La velocidad media es de 11,5464 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,6917%.

Agujero 5 – Altura 3.

Las velocidades son:

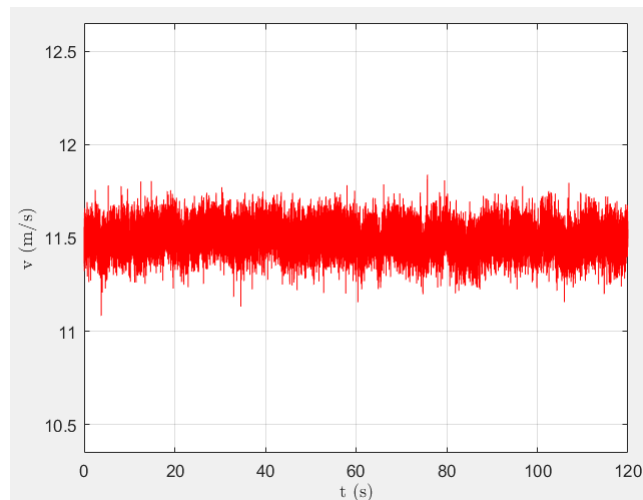


Figura 316. Velocidades del agujero 5 con altura 3.

La velocidad media es de 11,497 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9691%.

Agujero 5 – Altura 4.

Las velocidades son:

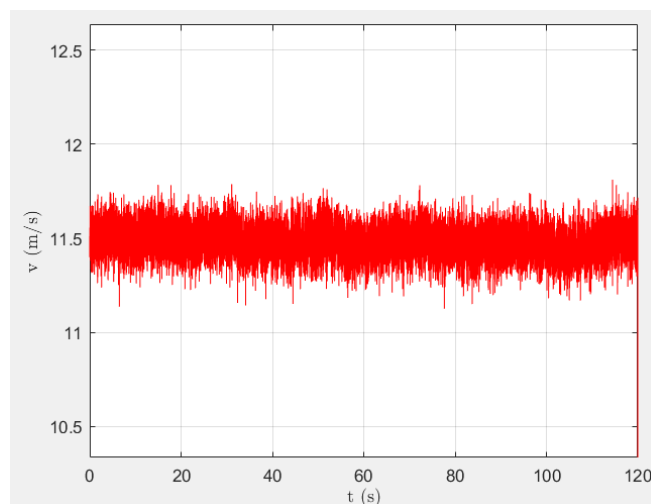


Figura 317. Velocidades del agujero 5 con altura 4.

La velocidad media es de 11,4842 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9732%.

Agujero 5 – Altura 5.

Las velocidades son:

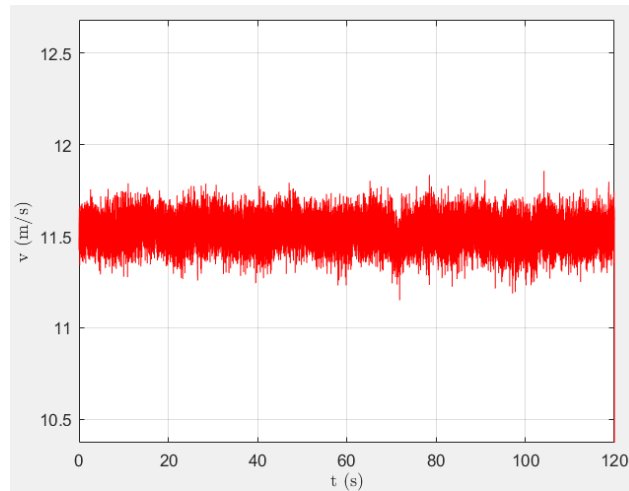


Figura 318. Velocidades del agujero 5 con altura 5.

La velocidad media es de 11,5247 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9463%.

Agujero 5 – Altura 6.

Las velocidades son:

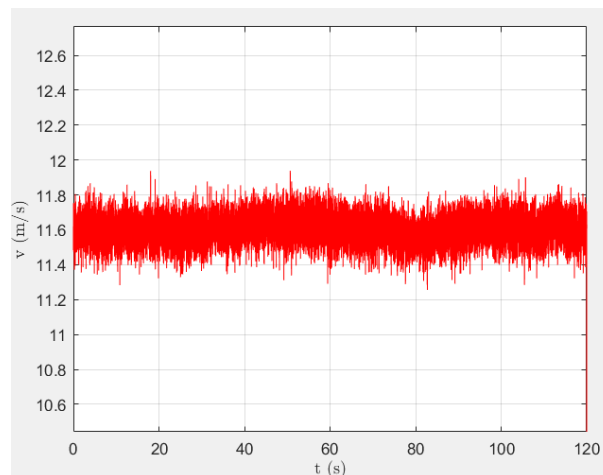


Figura 319. Velocidades del agujero 5 con altura 6.

La velocidad media es de 11,6025 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9469%.

Agujero 6 – Altura 1.

Las velocidades son:

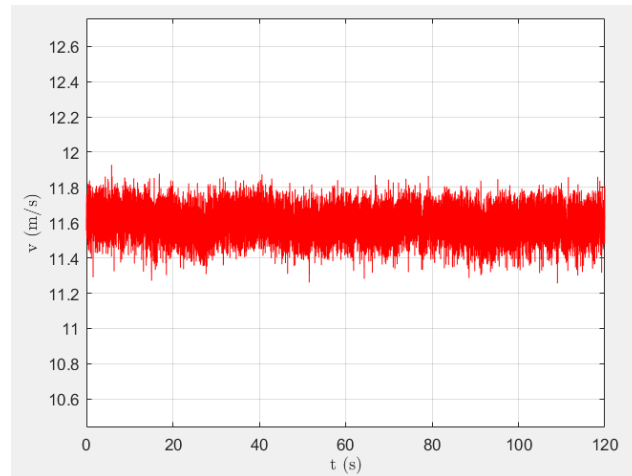


Figura 320. Velocidades del agujero 6 con altura 1.

La velocidad media es de 11,5987 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,7051%.

Agujero 6 – Altura 2.

Las velocidades son:

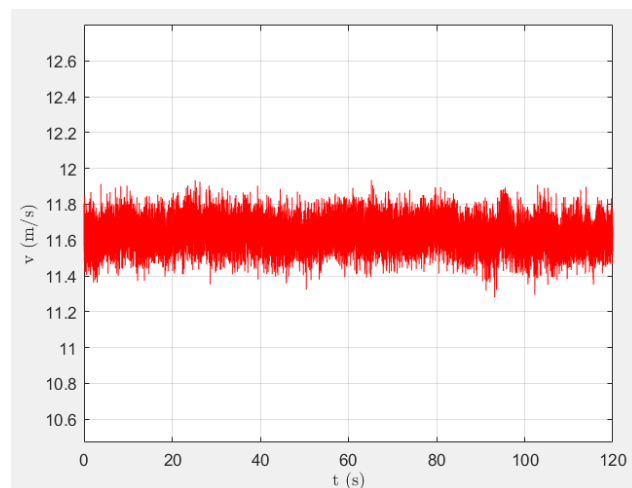


Figura 321. Velocidades del agujero 6 con altura 2.

La velocidad media es de 11,6339 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,697%.

Agujero 6 – Altura 3.

Las velocidades son:

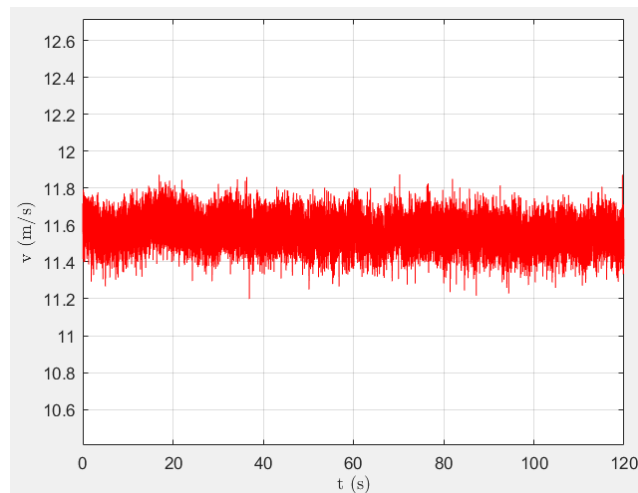


Figura 322. Velocidades del agujero 6 con altura 3.

La velocidad media es de 11,562 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,7167%.

Agujero 6 – Altura 4.

Las velocidades son:

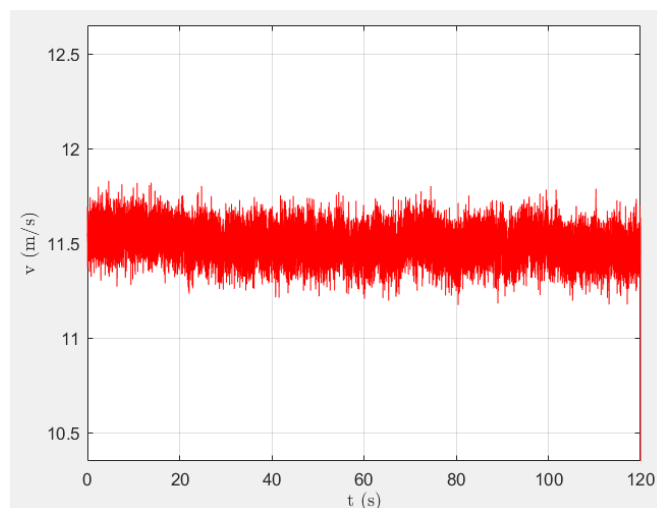


Figura 323. Velocidades del agujero 6 con altura 4.

La velocidad media es de 11,5009 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9878%.

Agujero 6 – Altura 5.

Las velocidades son:

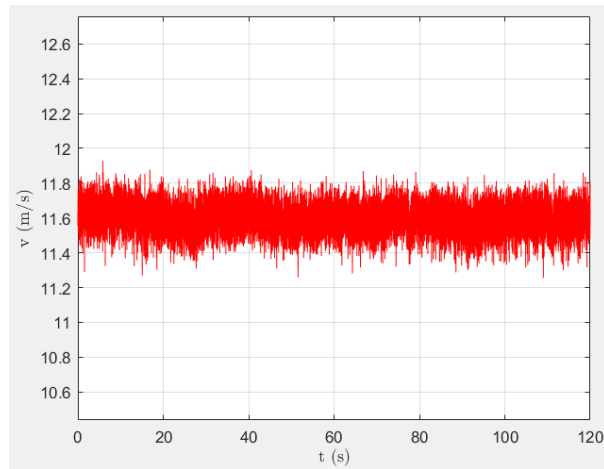


Figura 324. Velocidades del agujero 6 con altura 5.

La velocidad media es de 11,5987 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,7051%.

Agujero 6 – Altura 6.

Las velocidades son:

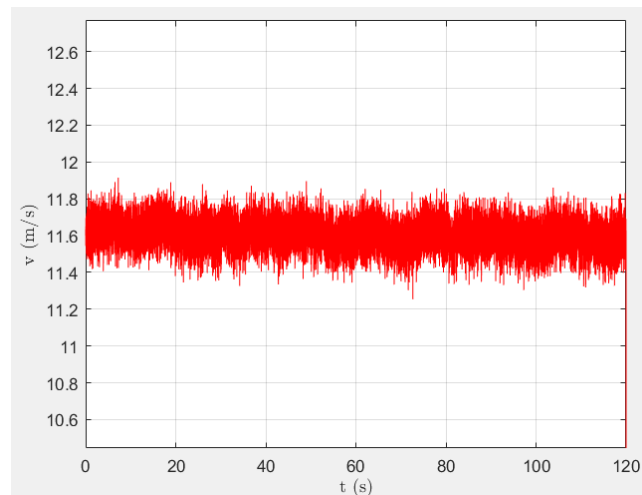


Figura 325. Velocidades del agujero 6 con altura 6.

La velocidad media es de 11,6056 m/s y la intensidad turbulenta es del 1,1453%.

Agujero 7 – Altura 1.

Las velocidades son:

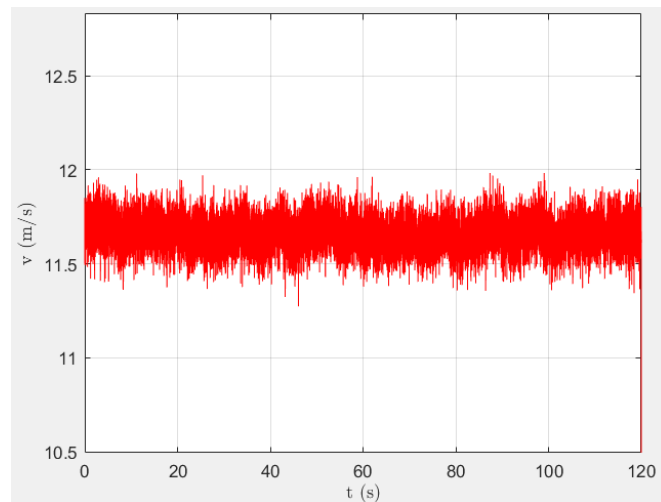


Figura 326. Velocidades del agujero 7 con altura 1.

La velocidad media es de 11,6612 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,981%.

Agujero 7 – Altura 2.

Las velocidades son:

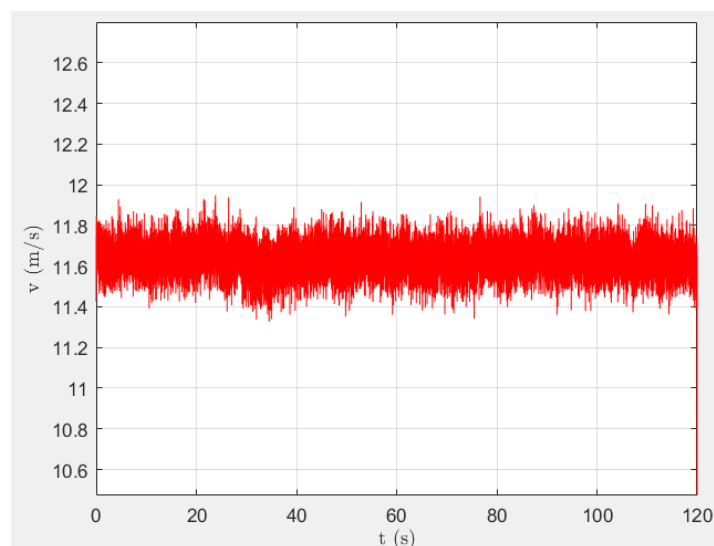


Figura 327. Velocidades del agujero 7 con altura 2.

La velocidad media es de 11,6362 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,937%.

Agujero 7 – Altura 3.

Las velocidades son:

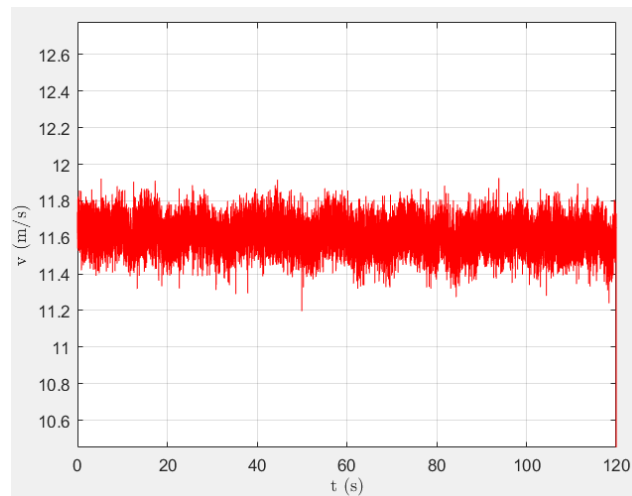


Figura 328. Velocidades del agujero 7 con altura 3.

La velocidad media es de 11,6123 m/s y la intensidad turbulenta es del 0,9678%.

8. Bibliografía

1. **Moreno-Garibaldi, Pablo, y otros.** *Diseño y manufactura de túnel de viento subsónico de circuito abierto*. México : Científica, vol. 18, núm. 3, pp. 107-111, 2014. págs. pp. 107-111.
2. **Calvo, Luis.** El COMAC CR929 pasa nuevas pruebas en el túnel de viento. *Flynews*. Ingeniería, 2021, Vol. Industria.
3. **Saco, Samuel.** Túneles de viento: en manos del aire. *El Mundo*. Motor, 2015.
4. **Martí, Rosa.** Vuela con este completo entrenamiento HIIT en un túnel de viento. *Men'sHealth*. 2019.
5. **Reve.** Túnel de viento para la eólica. *Reve*. 2105.
6. **UPM, Grupo de aerodinámica aplicada.** EELISQ. [En línea] 2019.
<https://www.upm.es/recursosidi/offers-resources/servicios-cientifico-tecnologico/servicios-servicios-cientifico-tecnologico/ensayos-en-tunel-de-viento-sobre-edificaciones-e-infraestructuras-civiles/>.
7. **Jaramillo, Jonathan D.** *Design and construction of a low speed wind tunnel*. Houghton : Houghton College, 2017.
8. **Callejas, Santiago Caicedo.** *Desarrollo del túnel de viento TVIM-49-60-1x1*. Bogotá : PhD. Tesis Doctoral. Universidad de los Andes, 2008.
9. **Morales, Alexis.** 201802_Alexis_Morales. [En línea] 2015.
<https://sites.google.com/site/201802alexismorales/semana-8>.
10. **Mancilla Romero, Jesús, y otros.** *Diseño de una tobera convergente-divergente para un túnel de viento supersónico de número de mach de 1.6*. Querétaro, México : Universidad Aeronáutica en Querétaro, 2020.
11. **B. Quinn, Daniel, y otros.** *A new low-turbulence wind tunnel for animal and small vehicle flight experiments*. 2017, Royal Society Open Science, págs. vol 4, pp. 1-5.
12. **Cattafesta, Louis, Bahr, Chris y Mathew, Jose.** *Fundamentals of Wind-Tunnel Design*. Florida, USA. : Encyclopedia of Aerospace Engineering. John Wiley & Sons, 2010.
13. **López, Jesús Eduardo Rivera.** *Diseño, construcción y caracterización de un banco de toberas sónicas para un laboratorio secundario de medición de flujo de gases*. México : PhD. Tesis doctoral. Instituto Politécnico Nacional., 2006.
14. **Harun, Zambri, y otros.** *The development of a multi-purpose wind tunnel*. Selangor, Malasia : Jurnal Teknologi. 78:6-10, pp: 63-70, 2016.
15. **A Kareem, Alaa, K Abbas, Mohamad y A Khammas, Farhan.** *Aerodynamic Study of Low-Speed Wind Tunnel Contraction Section: Design and Manufacturing*. Baghdad, Iraq : IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1094 012077, 2021.
16. **A.S., Abdelhamed, Y. El-S, Yassen y M.M., ElSakka.** *Design optimization of three dimensional geometry of wind tunnel contraction*. Port-Said, Egipto. : Elsevier. Ain Shams University., 2014.

17. **Escolar Cócera, Alberto.** *Optimización del flujo en el interior de un difusor utilizando Freefem++*. Madrid, España : Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
18. **S&P.** S&P. El blog de la ventilación eficiente. [En línea] 05 de Abril de 2017.
<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventiladores-axiales-que-son/#:~:text=Un%20ventilador%20es%20axial%20cuando,al%20eje%20de%20la%20h%C3%A9lice..>
19. **Fernández Oro, Jesús Manuel.** *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Oviedo, España : Reverté, 2012.
20. **Lecture 5. Solver Settings.** s.l. : Tutorial de Ansys Fluent, 2012.
21. **García-Cuevas González, Luis Miguel, y otros.** *Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad del mallado*. Valencia, España : Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Universitat Politècnica de València, 2010.
22. **Lecture 7. Turbulence.** s.l. : Tutorial de Ansys Fluent, 2012.
23. **Lecture 3. Boundary conditions.** s.l. : Tutorial de Ansys Fluent, 2012.
24. **M. Baltazar, João y R. Eça, Luis.** *Generación de Mallas Estructuradas en Superficie*. Lisboa, Portugal : SCielo. Información tecnológica. Vol. 17 N°3, pp: 107-116, 2006.
25. **Torres, Carlos.** *Implementación de mallas adaptativas en cálculos de dinámica de fluidos computacional*. Venezuela : PhD. Tesis doctoral. Universidad de los Andes, 2001.
26. **Alcázar Vargas, Manuel Gonzalo.** *Generación de malla computacional para la simulación multi-fásica 3D del flujo en el río Guadalquivir en un valle confinado*. Jaén : Trabajo de Fin de Grado. Universidad de Jaén, 2017.
27. **Lamas, Isabel.** **Technical Courses.** *CFD - Mecánica de Fluidos Computacional en aplicaciones navales*. [En línea] 24 de Marzo de 2014.
http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_categorias.php?pageNum_blogmostrar=1&totalRows_blogmostrar=9&categoria_id=6&nombre=CFD.
28. **Rodríguez Hernández, Juan Fernando.** **JUANFERNANDORODRIGUEZHERNANDEZ.** [En línea] Agosto de 2014. <https://juanfernandorodriguezhernandez.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/segundo-corte/tubo-de-venturi/>.
29. **elanemometro.com.** Anemómetros de hilo caliente. [En línea] 2021.
<https://elanemometro.com/hilo-caliente>.
30. **Rodríguez Lastra, María, y otros.** *Novel design and experimental validation of a contraction nozzle for aerodynamic measurements in a subsonic wind tunnel*. Oviedo, España : Elsevier. vol 118. pp:35-43, 2013.
31. **E. Filios, Andronicos, y otros.** *Numerical simulation of subsonic wind tunnels: a preliminary approach*. Patras, Grecia : ResearchGate, 2002.
32. **Verma, Neeraj y D. Baloni, Beena.** *Numerical and experimental investigation of flow in an open-type subsonic wind tunnel*. Suiza : Springer Nature AG 2019., 2019.

33. E.-S., Zanon. *Flow characteristics in low-speed wind tunnel contractions: Simulation and testing.* Cottbus, Alemania : Elsevier. Alexandria Engineering Journal 57, 2265-2277, 2018.

34. Malavasi, Stefano, y otros. *On the pressure losses through perforated plates.* Milan, Italia : Elsevier. Flow Measurement and Instrumentation, 2012.

35. Tropea, Cameron, Yarin, Alexander y F. Foss, John. *Handbook of Experimental Fluid Mechanics.* Chicago, USA : Springer, 2007.