



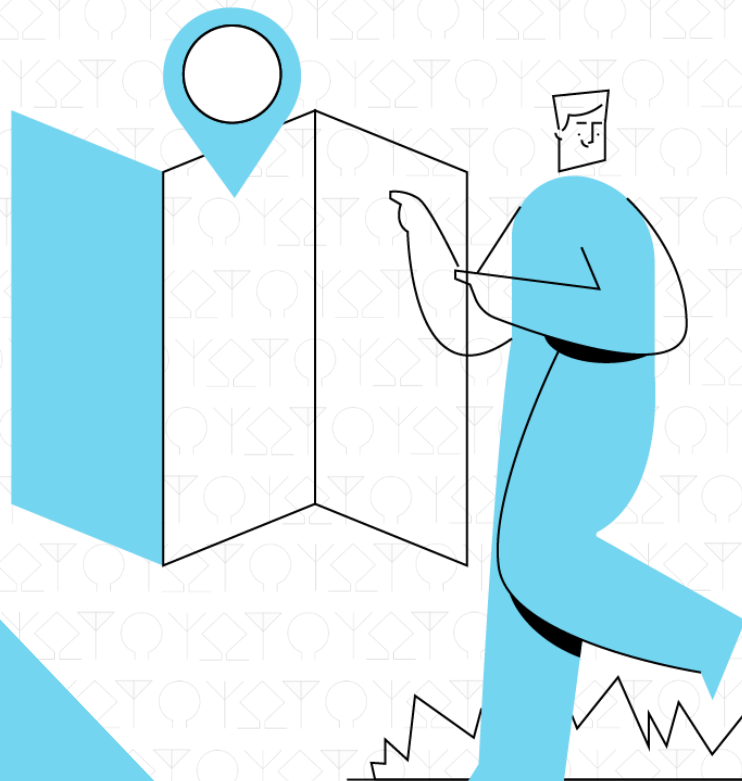
UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



iTEAM
Instituto de Telecomunicaciones
y Aplicaciones Multimedia

MYSPHERA

Sistemas de localización en interiores en banda UHF



Marc Casanova Murillo
Dra. Marta Cabedo Fabrés
Dr. Miguel Ferrando Bataller

· Mayo 2024 ·

A Leo y Paula.

A mi familia.

A mis amigos.

Gracias.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis doctoral ha sido posible gracias al Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia de la Universitat Politècnica de València y a la empresa Mysphera, quienes han colaborado activamente compartiendo el conocimiento, dirigiendo este trabajo y aportando los medios necesarios para permitir su desarrollo. Gracias a todas las personas que han hecho posible el desarrollo de esta tesis, y en particular a Jose Francisco, Eduardo, Marta y Miguel.

Abstract

The challenge of this doctoral thesis is to improve the precision of an indoor location system whose main application is the hospital environment. Work has been done on a new technique recently imported into Bluetooth technology and specification called AoA, which is intended to cover all use cases that existing technologies cannot solve due to their limitation in precision. Thanks to the combination of this new positioning technique together with its predecessors, the solution can cover other scenarios with precision and efficiency such as location at the bed, chair or box, thanks to the work carried out within the framework of this thesis, where the location platform has been improved holistically in the different elements that make it up, looking for an optimal cost-effectiveness relationship: electronics, radio frequency and telematics.

Resumen

Esta tesis doctoral tiene como reto la mejora de precisión de un sistema de localización en interiores cuya aplicación principal es el entorno hospitalario. Se apuesta por una novedosa técnica importada recientemente a la tecnología y especificación Bluetooth denominada AoA, con la que se pretende cubrir todos los casos de uso a los que tecnologías existentes no pueden abordar debido a su limitación en la precisión. Gracias a la combinación de esta nueva técnica de posicionamiento junto con sus predecesoras, la solución puede llegar a cubrir otros escenarios de manera precisa y eficiente como la ubicación a nivel de cama, sillón o consulta, gracias al trabajo realizado en el marco de esta tesis, donde se ha mejorado la plataforma de localización de manera holística en los distintos elementos que la componen, buscando una relación coste-efectividad óptima: electrónica, radiofrecuencia y telemática.

Resum

Aquesta tesi doctoral té com a repte la millora de precisió d'un sistema de localització en interiors l'aplicació principal dels quals és l'entorn hospitalari. S'aposta per una nova tècnica importada recentment a la tecnologia i especificació Bluetooth denominada AoA, amb la qual es pretén cobrir tots els casos d'ús als quals tecnologies existents no poden abordar a causa de la seua limitació en la precisió. Gràcies a la combinació d'aquesta nova tècnica de posicionament juntament amb les seues predecessores, la solució pot arribar a cobrir altres escenaris de manera precisa i eficient com la ubicació a nivell de llit, butaca o consulta, gràcies al treball realitzat en el marc d'aquesta tesi, on s'ha millorat la plataforma de localització de manera holística en els diferents elements que la componen, buscant una relació cost-efectivitat òptima: electrònica, radiofreqüència i telemàtica.

Tabla de contenidos

Lista de figuras.....	XVII
Lista de tablas.....	XXIX
Lista de abreviaturas.....	XXXIII
1. Introducción.....	1
2. Estado del arte.....	5
3. Elemento emisor: Tag.....	21
3.1. Introducción.....	21
3.2. Estado del arte.....	22
3.3. Diseño.....	26
3.3.1. Análisis.....	28
3.3.2. Caracterización.....	47
3.3.3. Medidas experimentales.....	66
3.3.4. Implementación.....	76
3.4. Resultados.....	81
3.5. Conclusiones.....	82
4. Elemento receptor: Gateway.....	94
4.1. Introducción.....	94
4.2. Estado del arte.....	95

4.3. Diseño	100
4.4. Resultados.....	116
4.5. Conclusiones	156
5. Algoritmo de localización	156
5.1. Introducción.....	159
5.2. Estado del arte	160
5.3. Diseño e implementación.....	167
5.4. Resultados.....	176
5.5. Conclusiones	215
6. Arquitectura del sistema	223
6.1. Introducción.....	223
6.2. Estado del arte	223
6.3. Implementación	231
6.4. Conclusiones	237
7. Resultados.....	239
7.1. Introducción.....	239
7.2. Método de medida.....	240
7.3. Resultados.....	242
8. Conclusiones.....	247
8.1. Conclusión general.....	269
8.2. Líneas de trabajo futuras.....	272
Referencias.....	273
Actividades relacionadas.....	283

Anexo 1: Código Matlab algoritmo de localización	285
Anexo 2: Utilidades matemáticas para los resultados	286
Anexo 3: Medidas del diagrama de radiación en antenas	288

Lista de figuras

Fig. 1. Personal médico asignando una pulsera de localización a un paciente	2
Fig. 2. Ejemplo de sistema de posicionamiento exterior GPS	6
Fig. 3. Descripción gráfica de AoA (Angle of Arrival)	11
Fig. 4. Distintas tecnologías clasificadas por coste y precisión [2]	12
Fig. 5. Taxonomía de aspectos importantes de un RTLS en el entorno hospitalario [2]	13
Fig. 6. Ilustración de ejemplo de Bluetooth Direction Finding [5]	14
Fig. 7. Tag siendo localizado por receptor AoA [5]	16
Fig. 8. Ejemplo de localización basada en RSSI [5]	17
Fig. 9. Equipo médico tomando decisiones sobre panel de datos de un RTLS	20
Fig. 10. Tag emisor comercializado de Mysphera	21
Fig. 11. Ejemplo de electrónica de Tag emisor con antena doblada en pletina metálica	25
Fig. 12. Antena tipo PIFA de Texas Instruments	25
Fig. 13. Diseño electrónico de Tag Mysphera	27
Fig. 14. Esquemático de la etapa de radiofrecuencia del diseño electrónico	28
Fig. 15. Tag emisor original de Mysphera	29
Fig. 16. Ejemplo de antena parametrizada por Texas Instruments	30
Fig. 17. Antena simple de inicio	31
Fig. 18. Parámetro S11 de la antena simple	31
Fig. 19. Parte real del parámetro Z11	32
Fig. 20. Parte imaginaria del parámetro Z11	32
Fig. 21. Diagrama de radiación de la antena simple ($\Phi=90$)	32
Fig. 22. Diagrama de radiación de la antena simple en 3D	33
Fig. 23. Corrientes de superficie en la antena simple	33
Fig. 24. Parámetro L7 a analizar en la antena	34
Fig. 25. Antena simple con plano de masa alargado en Y	34

Fig. 26. Parámetro S11 de la antena simple para distintos L7	35
Fig. 27. Parte real del parámetro Z11 para distintos L7	35
Fig. 28. Parte imaginaria del parámetro Z11 para distintos L7	35
Fig. 29. Diagrama de radiación para L7=25mm	36
Fig. 30. Parámetros D1 y D3 a analizar en la antena	37
Fig. 31. Antena simple con plano de masa alargado en X	37
Fig. 32. Parámetro S11 de la antena simple para D1 y D3 concretos	38
Fig. 33. Parte real del parámetro Z11 para D1 y D3 determinados	38
Fig. 34. Parte imaginaria del parámetro Z11 para D1 y D3 determinados ..	38
Fig. 35. Diagrama de radiación para D1 y D3 aumentados a 3mm	39
Fig. 36. Corriente de superficie con ensanchamiento del plano de masa en eje X	40
Fig. 37. Corriente de superficie sin ensanchamiento del plano de masa en eje X	40
Fig. 38. Parámetro S11 de la antena simple para cambios en las propiedades de los materiales	41
Fig. 39. Parte real del parámetro Z11 para cambios en las propiedades de los materiales	41
Fig. 40. Parte imaginaria del parámetro Z11 para cambios en las propiedades de los materiales	41
Fig. 41. Diagrama de radiación para cambios en las propiedades de los materiales	42
Fig. 42. Antena simple con dieléctrico extendido	43
Fig. 43. Parámetro S11 de la antena simple para estructura monocapa y multicapa	43
Fig. 44. Parte real del parámetro Z11 para estructura multicapa	44
Fig. 45. Parte imaginaria del parámetro Z11 para estructura multicapa	44
Fig. 46. Diagrama de radiación para estructura multicapa	44
Fig. 47. Antena base con parámetro a modificar	45
Fig. 48. Diseño multicapa a simular parametrizando L1	45
Fig. 49. Parámetro S11 de la simulación paramétrica de L1	46
Fig. 50. Parte real del parámetro Z11 para la simulación paramétrica de L1	46
Fig. 51. Parte imaginaria del parámetro Z11 para la simulación paramétrica de L1	46

Fig. 52. Primera aproximación al factor de forma del Tag de MYSPHERA	48
Fig. 53. Parámetro S11 de la primera aproximación al factor de forma del Tag Mysphera	48
Fig. 54. Parámetro Z11 (Real) de la primera aproximación al factor de forma del Tag Mysphera	49
Fig. 55. Parámetro Z11 (Imaginario) de la primera aproximación al factor de forma del Tag Mysphera	49
Fig. 56. Diagrama de radiación de la primera aproximación al factor de forma del Tag Mysphera	49
Fig. 57. Segunda aproximación al factor de forma del Tag de MYSPHERA	50
Fig. 58. Parámetro S11 de la segunda aproximación al factor de forma del Tag Mysphera	51
Fig. 59. Diagrama de radiación de la segunda aproximación al factor de forma del Tag Mysphera	51
Fig. 60. Dimensiones y ejemplo de una pila de botón CR2354	52
Fig. 61. Modelo de Tag Mysphera con el terminal negativo de la batería incorporado	52
Fig. 62. Parámetro S11 de la segunda aproximación del Tag con terminal negativo de la batería	53
Fig. 63. Diagrama de radiación de la segunda aproximación del Tag con terminal negativo de la batería	53
Fig. 64. Corrientes superficiales de la segunda aproximación del Tag con terminal negativo de la batería	54
Fig. 65. Modelo de Tag Mysphera con la batería incorporada	54
Fig. 66. Batería CR2354 modelada para simulación	55
Fig. 67. Parámetro S11 de dispositivo sin pila, con pila parcial y con pila total	55
Fig. 68. Diagrama de radiación de dispositivo sin pila, con pila parcial y con pila total	55
Fig. 69. Corrientes superficiales de la segunda aproximación del Tag con la batería completa	56
Fig. 70. Imagen comparativa entre distintos modelos de batería de botón	57
Fig. 71. Modelo de Tag con carcasa plástica incorporada	57
Fig. 72. Parámetro S11 para aproximación de Tag con carcasa de plástico	58

Fig. 73. Diagrama de radiación para aproximación de Tag con carcasa de plástico.....	58
Fig. 74. Modelo de Tag con carcasa simple rectangular para buscar afectación de prestaciones a causa del plástico	59
Fig. 75. Sentido de disminución del grosor de la carcasa de plástico	59
Fig. 76. Parámetro S11 para distintos grosores de carcasa en sentido interior (ShellThick en milímetros)	60
Fig. 77. Sentido de aumento del grosor de la carcasa de plástico.....	60
Fig. 78. Parámetro S11 para distintos grosores de carcasa en sentido exterior (ShellThick en milímetros)	61
Fig. 79. Sentido de aumento del tamaño de la carcasa de plástico	61
Fig. 80. Parámetro S11 para distintos tamaños de carcasa en sentido	62
Fig. 81. Parámetro S11 para distintos tamaños de carcasa en el eje X.....	62
Fig. 82. Parámetro S11 para distintos tamaños de carcasa en el eje Y.....	62
Fig. 83. Parámetro S11 para distintos tamaños de carcasa en el eje Z.....	63
Fig. 84. Tag Mysphera con carcasa y modelo de brazo humano	63
Fig. 85. Sección del modelo de brazo humano	64
Fig. 86. Parámetro S11 comparativa de electrónica con brazo y carcasa	64
Fig. 87. Parámetro Z11 (Real) de comparativa de electrónica con brazo y carcasa	65
Fig. 88. Parámetro Z11 (Imaginaria) de comparativa de electrónica con brazo y carcasa	65
Fig. 89. Diagrama de radiación de comparativa de electrónica con brazo y carcasa	65
Fig. 90. Tag emisor Mysphera con transición UFL-SMA para medidas de S11 en laboratorio	67
Fig. 91. Tag emisor Mysphera con carcasa y transición UFL-SMA para medidas de S11	67
Fig. 92. Parámetro S11 para diferentes materiales contiguos a la antena del Tag	68
Fig. 93. Parámetro S11 para Tag Mysphera con carcasa y distintas distancias al brazo humano	69
Fig. 94. Parámetro S11 para Tag Mysphera con carcasa para distintos casos y brazos humanos	70

Fig. 95. Parámetro S11 del Tag emisor simulado en CST frente a Tag emisor fabricado y medido en laboratorio	71
Fig. 96. Placa de circuito impreso con doble antena	81
Fig. 97. Diagrama de radiación (corte $\phi=90^\circ$) de la antena	81
Fig. 98. Diagrama de radiación (corte $\phi=90^\circ$) de la antena	81
Fig. 99. Diagrama de radiación conjunto de antena	81
Fig. 100. Diagrama de radiación resultante de antena	81
Fig. 101. Diagrama temporal de solución anterior y diseño antena	81
Fig. 102. Esquemático del circuito de radiofrecuencia del Tag emisor	81
Fig. 103. Electrónica del Tag de antena fabricada	81
Fig. 104. Diagrama de radiación de la antena	82
Fig. 105. Diagrama de radiación de la antena	82
Fig. 106. Corte en $\phi = 0^\circ$ de la antena (rojo) y la antena (naranja) para caso extremo en $\theta = 90^\circ$	82
Fig. 107. Corte en $\phi = 90^\circ$ de la antena (verde) y la antena (rosa) para caso extremo en $\theta = 90^\circ$	82
Fig. 108. Tag en brazo de paciente ingresado en hospital	82
Fig. 109. Corte en $\theta = 90^\circ$ del diagrama de radiación de antena con la presencia del brazo humano (antena derecha; antena izquierda)	82
Fig. 110. Corte en $\theta = 90^\circ$ de la antena (rojo) y la antena (verde) con brazo humano	82
Fig. 111. Corte en $\phi = 90^\circ$ del diagrama de radiación de antena con la presencia del brazo humano (antena derecha; antena izquierda)	82
Fig. 112. Corte en $\phi = 90^\circ$ de la antena (naranja) y la antena (azul) para la presencia del brazo humano	82
Fig. 113. Corte en $\phi = 0^\circ$ del diagrama de radiación de antena con la presencia del brazo humano (antena derecha; antena izquierda)	82
Fig. 114. Corte en $\phi = 0^\circ$ de la antena (beige) y la antena (rosa) para la presencia del brazo humano	82
Fig. 115. Parámetro S11 de la fabricación del diseño resultante para antena (azul) y antena (verde)	82
Fig. 116. Personal médico incorporando pulsera a paciente	82
Fig. 117. Gateway receptor de Mysphera	94
Fig. 118. Diagrama sobre la técnica de AoA [5]	95
Fig. 119. Ejemplo de técnica de beamforming	96

Fig. 120. Placa de evaluación AoA de Texas Instruments [51]	96
Fig. 121. Placa de evaluación AoA de Nordic Semiconductor	97
Fig. 122. Ejemplos de tipos de agrupaciones de antenas para AoA	98
Fig. 123. Ejemplo de esquema de conmutación para agrupación de 16 antenas	99
Fig. 124. Solución previa a AoA con antenas directivas (beamforming)	116
Fig. 125. Antena tipo parche con polarización lineal	116
Fig. 126. Antena tipo parche con polarización circular	116
Fig. 127. Evaluación de concepto AoA con antenas comerciales roscadas	116
Fig. 128. Etapa de conmutación de la prueba de concepto	116
Fig. 129. Resultados de fase de la prueba de concepto	116
Fig. 130. Agrupación 1x4 básica de referencia	116
Fig. 131. Agrupación 1x4 con barrera en plano de masa de la capa inferior	116
Fig. 132. Agrupación 1x4 con anillo general referenciado a masa	116
Fig. 133. Agrupación 1x4 con anillos individuales finos referenciados a masa	116
Fig. 134. Agrupación 1x4 con anillos individuales gruesos referenciados a masa	116
Fig. 135. Agrupación 1x4 con anillos individuales gruesos referenciados a masa y barreras contra la propagación de corrientes en plano de masa inferior	116
Fig. 136. Agrupación 1x4 base de referencia con parches rotados para buscar asimetría	116
Fig. 137. Agrupación 1x4 con plano de masa en capa superior y barreras	116
Fig. 138. Agrupación 1x4 con plano de masa en capa superior y elementos adyacentes pasivos	116
Fig. 139. Parámetros S de simulación paramétrica para distintos espaciados entre antenas	116
Fig. 140. Agrupación 4x4 sin elementos centrales (12 antenas)	116
Fig. 141. Agrupación 4x4 con elementos centrales (16 antenas)	116
Fig. 142. Agrupación 4x4 con elementos centrales y etapa de conmutación con pérdidas	116

Fig. 143. Antena individual tipo parche con polarización circular	116
Fig. 144. Parámetro S11 medido y simulado de la antena individual	116
Fig. 145. Medidas en cámara anecoica de la antena individual	116
Fig. 146. Diagrama de radiación en 3D de la antena individual	116
Fig. 147. Cortes del diagrama de radiación de la antena individual	116
Fig. 148. Medida del diagrama de radiación de la antena individual en cámara anecoica	116
Fig. 149. Agrupación 1x4 de referencia para las simulaciones	116
Fig. 150. Sistema de referencia en las simulaciones de la agrupación 1x4	116
Fig. 151. Corte a 0° en phi para caso: Anillo grueso general cortocircuitado a masa con final de la PCB a $\lambda/4$ del parche	116
Fig. 152. Corte a 0° en phi para caso: Base sin anillos	116
Fig. 153. Prototipo de agrupación 1x4 seleccionada con conmutador	116
Fig. 154. Montaje para evaluación de agrupación 1x4	116
Fig. 155. Resultados de amplitud y fase para una conmutación entre antenas de la agrupación 1x4	116
Fig. 156. Diseño de agrupación 4x4 propuesto con parche de polarización circular inicial	116
Fig. 157. Diseño de agrupación 4x4 fabricado y probado	116
Fig. 158. Montaje para la medida de azimut de la agrupación 4x4 definitiva	116
Fig. 159. Montaje para la medida de elevación de la agrupación 4x4 definitiva	116
Fig. 160. Histograma de error en metros de Azimut (superior) y Elevación (inferior) de prueba 1.	116
Fig. 161. Gráfico de error en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) en función del tiempo de prueba 1	116
Fig. 162. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) de prueba 1	116
Fig. 163. Histograma de error en metros en Azimut (superior) y Elevación (inferior) de prueba n°2	116
Fig. 164. Gráfico de error en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) en función del tiempo para prueba n°2	116

Fig. 165. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº2	116
Fig. 166. Histograma de error en metros en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº3	116
Fig. 167. Gráfico de error en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) en función del tiempo para prueba nº3	116
Fig. 168. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº3	116
Fig. 169. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº3	116
Fig. 170. Histograma de error en metros en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº4	116
Fig. 171. Gráfico de error en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) en función del tiempo de la prueba nº4	116
Fig. 172. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº4	116
Fig. 173. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº4	116
Fig. 174. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº4	116
Fig. 175. Histograma de error en metros en Azimut (superior) y Elevación (inferior) para prueba nº5	116
Fig. 176. Gráfico de error en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior) en función del tiempo para prueba nº5	116
Fig. 177. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior). Caso 0° iteración 1. Prueba nº5	116
Fig. 178. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior). Caso 90° iteración 1. Prueba nº5	116
Fig. 179. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior). Caso 0° iteración 2. Prueba nº5	116
Fig. 180. Gráfico de desviación en metros y grados en Azimut (superior) y Elevación (inferior). Caso 90° iteración 2. Prueba nº5	116
Fig. 181. Gateway sin carcasa instalado en entorno real	116
Fig. 182. Gateway con carcasa instalado en un quirófano	156
Fig. 184. Distintos puntos de la fase de una señal recibida	161

Fig. 185. Ejemplo de cálculo de Angle of Arrival.....	161
Fig. 186. Submuestreo en la señal Bluetooth recibida.....	162
Fig. 187. Error en una de las antenas durante el muestreo de la señal recibida.....	163
Fig. 188. Representación gráfica de muestra IQ.....	163
Fig. 189. Estructura de trama Bluetooth Direction Finding con tono extendido para AoA.....	164
Fig. 190. Efecto multi-camino con posibles errores de posicionamiento por rebotes.....	166
Fig. 191. Simulación gráfica de la teoría de imágenes.....	168
Fig. 192. Representación gráfica de la técnica de AoA y parámetros para fórmula.....	169
Fig. 193. Modelo del algoritmo con escenario y FFT con y sin reflexiones.....	170
Fig. 194. Modelo del algoritmo con escenario y FFT con y sin reflexiones y FFT en coordenadas polares.....	171
Fig. 195. Ejemplo de resolución de posición del emisor (asterisco) mediante FFT.....	172
Fig. 196. Ejemplo de resolución de posición del emisor mediante FFT con escenario 3D.....	172
Fig. 197. Ejemplo de resolución de posición del emisor mediante FFT en 3D con escenario y paredes.....	173
Fig. 198. Vistas en planta, alzado, perfil e isométrica de un escenario y resolución del algoritmo.....	174
Fig. 199. FFT en 3D y en coordenadas polares representando estimación de la posición del emisor.....	175
Fig. 200. Ejemplo de no afectación por rayo reflejado.....	215
Fig. 201. Ejemplo de ligera afectación por rayo reflejado.....	216
Fig. 202. Ejemplo de cálculo de ángulos en elevación respecto a plano de referencia.....	217
Fig. 203. Ejemplo de afectación grave por rayo reflejado.....	217
Fig. 204. Distintas partes generales de un RTLS.....	224
Fig. 205. Esquema de arquitectura de Kafka.....	226
Fig. 206. Ejemplo de formato de dato JSON.....	227
Fig. 207. Diagrama de aplicaciones en máquinas virtuales.....	229
Fig. 208. Diagrama de aplicaciones en contenedores Docker.....	230

Fig. 209. Partes principales de la arquitectura del sistema RTLS	231
Fig. 210. Arquitectura secuencial del sistema del Tag emisor	232
Fig. 211. Arquitectura secuencial del sistema del Gateway receptor	233
Fig. 212. Propagación de la señal y la información en la infraestructura física	234
Fig. 213. Arquitectura general del sistema	235
Fig. 214. Comunicación entre elementos y viaje del dato	235
Fig. 215. Arquitectura del sistema con detalle de escalabilidad	236
Fig. 216. Sistema escalable en brokers de mensajes y contenedores	237
Fig. 217. Distribución de los receptores AoA y RSSI	242
Fig. 218. Diagrama de bloques del montaje	242
Fig. 219. Representación de la prueba de estabilidad	242
Fig. 220. Trayectorias de las pruebas de latencia	242
Fig. 221. Escenario de instalación de los receptores (rojo) y áreas (azul) ..	246
Fig. 222. Distribución de los Tag (verde) en las pruebas de estabilidad ..	246
Fig. 223. Recorridos detallados para prueba de latencia	246
Fig. 224. Análisis de latencia por áreas para RSSI intended	246
Fig. 225. Análisis de latencia por áreas para AoA intended	246
Fig. 226. Análisis de latencia por áreas para RSSI unintended	246
Fig. 227. Análisis de latencia por áreas para AoA unintended	246
Fig. 228. Gráfico de resultados para prueba intended RSSI y AoA	246
Fig. 229. Gráfico de resultados para prueba intended y unintended para RSSI y AoA	246
Fig. 230. Distribución de Gateway para localización en área (area-level) ..	246
Fig. 231. Distribución de Gateway para localización en el quirófano (OR-level)	246
Fig. 232. Distribución de Gateway para localización en habitación (room-level)	246
Fig. 233. Distribución de Gateway para localización en cama/box (bed-level)	246
Fig. 234. Medidas mínimas recomendadas para cama hospitalaria	246
Fig. 235. Ejemplo de zona de camas en una UCI (Unidad de cuidados intensivos) hospitalaria	246
Fig. 236. Ejemplo de una habitación de dos camas	246
Fig. 237. Plano simple de un entorno real	246

Fig. 238. Plano con receptores de un entorno real	246
Fig. 239. Plano de entorno real con niveles de localización	246
Fig. 240. Tipos de distribuciones estadísticas	286
Fig. 241. Diagrama de caja y bigotes	287
Fig. 242. Coordenadas esféricas	288
Fig. 243. Campo eléctrico en bocina con $\theta = 0^\circ$	289
Fig. 244. Ejes cartesianos y ángulos relevantes en cámara anecoica	289
Fig. 245. Componente del campo eléctrico en φ (E_φ)	290
Fig. 246. Componente del campo eléctrico en θ (E_θ)	290
Fig. 247. Setup cámara anecoica	292
Fig. 248. Comparativa de representaciones en dB	293
Fig. 249. Comparativa de representaciones lineales	294

Lista de tablas

Tabla 1. Casos de uso de un RTLS para interiores y sus características	7
Tabla 2. Comparativa entre tecnologías RTLS	10
Tabla 3. Diferencias generales entre RSSI y AoA	11
Tabla 4. Comparativa de diagramas de radiación del Tag emisor en simulación y caso real fabricado	72
Tabla 5. Resultados de potencia recibida para dos Tag distintos	82
Tabla 6. Comparativa de errores entre los dos Tag (anterior y propuesto)	82
Tabla 7. Resultados del algoritmo de localización para distintos espaciados de antena	116
Tabla 8. Resultados en 2D del algoritmo de localización para distintos espaciados de antena	116
Tabla 9. Resultados para distintas estrategias de aislamiento entre parches	116
Tabla 10. Ejemplo de diagramas en 3D (dB) para caso: Anillos gruesos cortocircuitados y final de la PCB a $\lambda/4$ de los parches finales	116
Tabla 11. Secuencia de pruebas para primera prueba de agrupación 4x4	116
Tabla 12. Estadísticas de la prueba 1 para la agrupación 4x4	116
Tabla 13. Secuencia de pruebas para segunda prueba de agrupación 4x4	116
Tabla 14. Estadísticas de la prueba 2 para la agrupación 4x4	116
Tabla 15. Secuencia de pruebas para tercera prueba de agrupación 4x4	116
Tabla 16. Estadísticas de la prueba 3 para la agrupación 4x4	116
Tabla 17. Secuencia de pruebas para cuarta prueba de agrupación 4x4	116
Tabla 18. Estadísticas de la prueba 4 para la agrupación 4x4	116
Tabla 19. Secuencia de pruebas para la quinta prueba de la agrupación 4x4	116
Tabla 20. Estadísticas de la prueba 5 para la agrupación 4x4	116
Tabla 21. Resultados del algoritmo para X=1, Y=1	178
Tabla 22. Resultados del algoritmo para X=1, Y=3.5	179

Tabla 23. Resultados del algoritmo para $X=1, Y=6$	180
Tabla 24. Resultados del algoritmo para $X=1, Y=8.5$	181
Tabla 25. Resultados del algoritmo para $X=1, Y=11$	182
Tabla 26. Resultados del algoritmo para $X=1, Y=13$	183
Tabla 27. Resultados del algoritmo para $X=3.5, Y=1$	184
Tabla 28. Resultados del algoritmo para $X=3.5, Y=3.5$	185
Tabla 29. Resultados del algoritmo para $X=3.5, Y=6$	186
Tabla 30. Resultados del algoritmo para $X=3.5, Y=8.5$	187
Tabla 31. Resultados del algoritmo para $X=3.5, Y=11$	188
Tabla 32. Resultados del algoritmo para $X=3.5, Y=13$	189
Tabla 33. Resultados del algoritmo para $X=6, Y=1$	190
Tabla 34. Resultados del algoritmo para $X=6, Y=3.5$	191
Tabla 35. Resultados del algoritmo para $X=6, Y=6$	192
Tabla 36. Resultados del algoritmo para $X=6, Y=8.5$	193
Tabla 37. Resultados del algoritmo para $X=6, Y=11$	194
Tabla 38. Resultados del algoritmo para $X=6, Y=13.5$	195
Tabla 39. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=1$	196
Tabla 40. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=3.5$	197
Tabla 41. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=6$	198
Tabla 42. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=8.5$	199
Tabla 43. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=11$	200
Tabla 44. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=13.5$	201
Tabla 45. Resultados del algoritmo para $X=11, Y=1$	202
Tabla 46. Resultados del algoritmo para $X=11, Y=3.5$	203
Tabla 47. Resultados del algoritmo para $X=11, Y=6$	204
Tabla 48. Resultados del algoritmo para $X=11, Y=8.5$	205
Tabla 49. Resultados del algoritmo para $X=11, Y=11$	206
Tabla 50. Resultados del algoritmo para $X=11, Y=13.5$	207
Tabla 51. Resultados del algoritmo para $X=13.5, Y=1$	208
Tabla 52. Resultados del algoritmo para $X=13.5, Y=3.5$	209
Tabla 53. Resultados del algoritmo para $X=13.5, Y=6$	210
Tabla 54. Resultados del algoritmo para $X=13.5, Y=8.5$	211
Tabla 55. Resultados del algoritmo para $X=13.5, Y=11$	212
Tabla 56. Resultados del algoritmo para $X=13.5, Y=13.5$	213

Tabla 57. Resumen de resultados del algoritmo para distintas posiciones	214
Tabla 58. Resultados del algoritmo para rayo reflejado atenuado.....	218
Tabla 59. Resultados del algoritmo para rayo reflejado sin atenuar.....	219
Tabla 60. Resultados de estabilidad.....	246
Tabla 61. Resultados de latencia modo inteded (i).....	246
Tabla 62. Resultados de latencia modo inteded (i) y unintended (u).....	246
Tabla 63. Resultados de latencia en segundos para cada nivel de precisión de localización.....	246
Tabla 64. Resultados de estabilidad en segundos para cada nivel de precisión de localización	246
Tabla 65. Errores de localización en un entorno real para cada técnica ...	246

Lista de abreviaturas

Abreviatura / Siglas	Significado
RTLS	Sistemas de localización en tiempo real (Real-Time Location Systems)
GPS	Sistema de posicionamiento global (Global Positioning System)
RSSI	Indicador de fuerza de señal recibida (Received Signal Strength Indicator)
ToF	Tiempo de vuelo (Time-of-flight)
UHF	Frecuencia ultraalta (Ultra High Frequency)
AoA	Ángulo de llegada (Angle of arrival)
AoD	Ángulo de partida (Angle of departure)
BLE	Bluetooth de bajo consumo (Bluetooth Low Energy)
OR	Quirófano (Operating Room)
UCI	Unidad de cuidados intensivos
PCB	Placa de circuito impreso (Printed circuit board)
PIFA	Antena plana tipo F (Plannar inverted-F antenna)
UWB	Ultra ancho de banda (Ultra-wideband)
GNSS	Sistema global de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System)
5G	Quinta generación de redes móviles
LTE	Evolución a largo plazo (Long Term Evolution)

LPP	Protocolo de posicionamiento (LTE Positioning Protocol)
LPHAP	Posicionamiento de alta precisión y bajo consumo (Low-Power High-Accuracy Positioning)
FTM	Medida fina de tiempo (Fine Timing Measurement)
TDoA	Diferencia de tiempo de llegada (Time Difference of Arrival)
ToF	Tiempo de vuelo (Time-of-Flight)
JSON	Notación de objetos JavaScript (JavaScript Object Notation)
API	Interfaz de Programación de Aplicaciones (Application Programming Interface)
FFT	Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)

1. Introducción

Los sistemas de localización en tiempo real para interiores actuales están basados mayoritariamente en tecnologías de comunicación inalámbrica por radiofrecuencia como Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth, Ultra-Wideband, ultrasonidos, etcétera. Su utilidad, desde que se creara el término RTLS (Real-time locating system) en 1998 por la empresa WhereNet, ha sido fundamental para ubicar y rastrear a personas u objetos en áreas interiores y edificios en donde la cobertura GPS no es suficiente.

Numerosas son las aplicaciones que posibilitan los sistemas de localización para interiores, asistiendo a entornos como logística, automoción, sanidad, alimentación, etcétera. En todos ellos existen elementos a localizar, y a través de su histórico de localización o de su posición actual, se desencadenan una serie de acciones que pueden ser optimizadas, automatizadas o asistidas.

El principal problema de los RTLS es la precisión de la localización a la que pueden llegar. Años atrás, se basaban en técnicas de triangulación y trilateración conocidas en el ámbito de la telefonía móvil que analizaban la potencia de la señal recibida (*RSSI: Received Signal Strength Indicator*) y el tiempo de ida y vuelta de la señal (*ToF: Time of Flight*), cuya precisión no suele ser suficiente para resolver todos los casos de uso de los distintos ámbitos.

Actualmente, se han incorporado nuevas técnicas a la banda frecuencial de UHF que ya comenzaron a utilizarse hace aproximadamente una década en otras aplicaciones donde se usaban las agrupaciones de antenas y antenas directivas como la telefonía, la televisión o el radar. Estas nuevas técnicas permiten discernir de qué ángulo ha llegado la señal del emisor al receptor, aunque no están exentas de un aumento en los elementos de antena y electrónica de radiofrecuencia. Concretamente, las técnicas de AoA (*Angle of Arrival*) y AoD (*Angle of Departure*) son capaces de aumentar la precisión de dichos sistemas de localización en tiempo real y por ello se han incorporado a algunas de las tecnologías de comunicación inalámbricas citadas

anteriormente, tanto en sus especificaciones oficiales (liberadas durante el desarrollo de esta tesis) como en los componentes electrónicos asociados.

Esta tesis doctoral tiene como reto el aumento de precisión de la localización de un sistema basado en Bluetooth cuya aplicación es el entorno sanitario-hospitalario y que comercializa la empresa Mysphera, presente en más de 50 hospitales entre los que se encuentran: -----

-----.



Fig. 1. Personal médico asignando una pulsera de localización a un paciente

Se pretende llegar a discernir que paciente está en cada cama, así como mejorar la fiabilidad de los resultados mediante el análisis, la caracterización, la combinación e incorporación de técnicas y el rediseño de componentes clave.

Esta solución se basaba anteriormente en una de las técnicas de localización que no llegaba a cubrir todos los casos de uso que se requieren en un entorno hospitalario debido a su limitación en la precisión. Actualmente, la solución puede llegar a cubrir otros muchos escenarios (hospital de día, zona de recuperación postquirúrgica, zona de preparación prequirúrgica, unidad de cuidados intensivos, *boxes* de urgencias, habitaciones con más de una cama) tal y como se muestra más adelante en los resultados, debido en

gran parte al trabajo realizado en el marco de esta tesis, donde se ha mejorado parte de la plataforma de localización de manera holística en los distintos elementos específicos que la componen y que se irán desarrollando a lo largo del documento: electrónica, radiofrecuencia y telemática.

Los dispositivos electrónicos que conforman el sistema (emisor y receptor) se han rediseñado para incorporar la tecnología AoA sin perder capacidades previas como RSSI y respetando la relación coste-efectividad, por lo que se han convertido en elementos más complejos que delegan capacidad de cómputo en otros elementos centrales y conmutan entre antenas de manera secuencial para no encarecer demasiado el producto.

El procesado de la señal de radiofrecuencia combina ambas técnicas mencionadas: la ya existente RSSI y la recién incorporada AoA. La mezcla de ambas permite una flexibilidad y adaptabilidad máxima, así como una sencilla integración con escenarios mixtos y dispositivos universales. Por otro lado, se ha considerado la escalabilidad de la solución, por lo que podría funcionar en un entorno reducido o en un escenario de una gran superficie.

A nivel telemático se han dimensionado y diseñado los artefactos y la arquitectura para abordar la ya mencionada escalabilidad, y, sobre todo, la delegación del cómputo principal a un componente central (servidor) siendo secuencial y conmutable el proceso de muestreo de la señal por el ahorro de costes en la electrónica.

Todo lo descrito anteriormente posibilita el aumento de precisión del sistema a un nivel donde anteriormente no se había podido llegar y además supone una reducción de costes en el despliegue de la solución, siendo esta escalable y robusta.

2. Estado del arte

Los sistemas de localización en tiempo real (RTLS) han evolucionado considerablemente en los últimos veinticinco años debido a la necesidad de posicionar, guiar y encontrar objetos y seres vivos tanto en interiores como en exteriores. Varias tecnologías han posibilitado la implementación de estas soluciones y casos de uso: Wi-Fi, Bluetooth, Ultra-wideband (UWB), RFID (activo y pasivo), ultrasonidos, geomagnetismo, infrarrojos, procesamiento de imagen (cámaras), etcétera. Todas las tecnologías anteriores tienen ventajas y limitaciones, por ello, es posible ver soluciones conjuntas donde se combinan para mitigar ciertas deficiencias.

Hoy en día existen numerosas compañías fabricantes, proveedoras, integradoras o intermediarias que proporcionan soluciones integrales para realizar el seguimiento de activos, personas y materiales, así como el guiado y navegación de personas en almacenes logísticos, aeropuertos, plantas industriales, eventos públicos y hospitales, entre otros, para mejorar la seguridad, optimizar los procesos, mejorar la experiencia de usuario y reducir los costes o pérdidas. Cada vez son más los entornos que cuentan con este tipo de soluciones debido a su gran utilidad. Se estima que en 2025 las infraestructuras RTLS de este tipo supongan 12 billones de euros de ingresos para las empresas implicadas.

En concreto, el entorno hospitalario es objetivo final de la solución diseñada en esta tesis doctoral, tal y como se va describiendo a lo largo del documento. Mysphera es la empresa encargada de comercializar, distribuir e instalar el producto basado en el sistema de localización en interiores y un software específico para dicho entorno que permite optimizar, orquestar y automatizar procesos y acciones, así como ofrecer información relevante y útil a familiares y personal. Por un lado, los quirófanos, las camas y el equipamiento disponible pueden ser monitorizados para entender y maximizar su utilización, reduciendo así la necesidad de cancelar y postponer intervenciones o tratamientos o de comprar o prescindir de cierto instrumental. Por otro lado, si el sistema es capaz de detectar cuando

un paciente o personal médico entra o sale de un quirófano puede inferir cuando comienza o acaba una intervención y coordinar automáticamente las tareas del personal de apoyo y limpieza para ir preparando la sala y al siguiente paciente mandando notificaciones a los teléfonos móviles de dicho personal; esto reduce los tiempos muertos entre intervenciones y permite atender a un mayor número de pacientes al día; los datos recogidos muestran un aumento aproximado del 8% de intervenciones mensuales gracias al uso del sistema. Añadido a lo anterior, como ejemplo adicional, se tiene la capacidad de rastrear contactos entre pacientes y personal médico para trazar posibles contagios de enfermedades.

En entornos de localización exterior el sistema que domina el mercado es GNSS (sistema global de navegación por satélite) debido a su gran precisión, presencia en numerosos dispositivos e infraestructura desplegada y disponible. GPS es uno de los sistemas más conocidos y extendidos, pero también hay otros sistemas basados en diferentes constelaciones de satélites como Glonass, Galileo y BeiDou, y otras tecnologías como 5G (LPP y LPHAP).

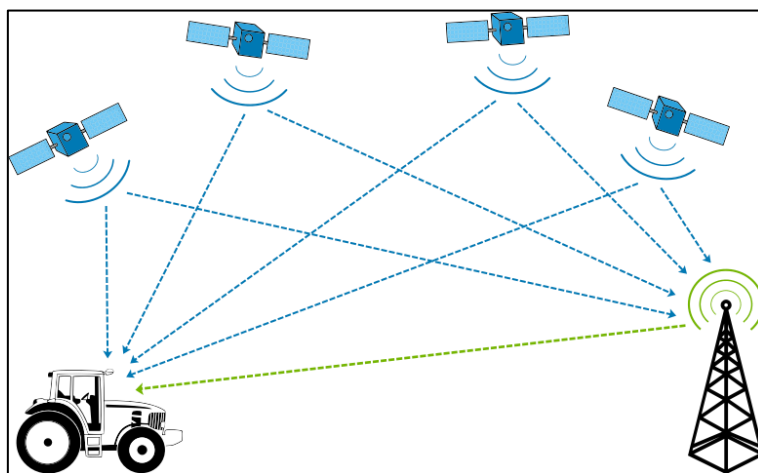


Fig. 2. Ejemplo de sistema de posicionamiento exterior GPS

Aunque los sistemas de localización exterior anteriores cuentan con una presencia y cobertura mundial, su capacidad tecnológica limita el uso de los mismos en espacios interiores (normalmente edificios, subterráneos o zonas cubiertas) y es por ello que se recurre a tecnologías de corto alcance

para abordar los casos de uso de estos entornos. Aun así, estas tecnologías suelen tener ventajas y desventajas en lo relacionado con coste, fiabilidad, consumo y precisión; esto frena relativamente su crecimiento y presencia en el mercado.

En los entornos de localización interior, por tanto, no hay una única tecnología predominante y dependiendo del caso de uso y las ventajas prioritarias se opta por un sistema u otro, o por una combinación de varios. Cabe destacar que la infraestructura física necesaria para cubrir un caso de uso en interiores es mayor que en exteriores (instalación de receptores, emisores, cableado, etcétera), además, suelen requerir mayor calibración inicial y ajustes posteriores, así que todo ello supone un mayor coste. También hay un reto a superar en la mayoría de las tecnologías propuestas, que es el consumo de batería o la gestión de remplazo de la misma.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los distintos casos de uso de los sistemas de localización en tiempo real para interiores, así como de algunas de sus características principales:

Tabla 1. Casos de uso de un RTLS para interiores y sus características

Ámbito	Caso de uso	Precisión (metros)	Latencia (segundos)	Batería (días)
Hospitalario	Seguimiento del paciente	3-5 m	10-60 s	>30 d
	Seguimiento de activos	3-5 m	10-60 s	>90 d
	Seguimiento de personal	3-5 m	10-60 s	>30 d
	Control de acceso	1-2 m	1-10 s	>30 d
	Traza de contactos	1-2 m	10-60 s	>30 d

Industrial	Seguridad del trabajador	<1 m	0,01-0,1 s	>30 d
	Seguimiento de activos	3-5 m	>1 hora	>1 año
	Control de acceso	1-2 m	1-10 s	>30 d
	Seguimiento de útiles	1-2 m	10-60 s	>90 d
	Seguimiento de visitante	3-5 m	1-10 s	>30 d
Logística	Seguimiento de activos	3-5 m	>1 hora	>1 año
	Control de acceso	1-2 m	1-10 s	>30 d
	Seguimiento de personal	1-2 m	1-10 s	>30 d
	Seguimiento de bulto	1-2 m	1-10 s	>90 d
	Seguimiento de visitante	3-5 m	1-10 s	>30 d

La tabla anterior destaca en gris las celdas que suponen un reto para cualquier RTLS aplicado a interiores que implementen las técnicas y tecnologías más comunes hasta la fecha. En resumen, alcanzar el año de duración de batería de los dispositivos, llegar a una precisión menor o comparable a un metro y latencias menores a diez segundos son métricas difíciles de alcanzar para algunas soluciones, y la combinación de los tres requisitos se hace prácticamente inalcanzable.

Queda patente que la necesidad de los sistemas RTLS es alta, pero estos no son capaces de ofrecer el potencial que el mercado requiere en la mayoría de los casos. Algunas tecnologías cuentan con limitaciones persistentes que no se han podido solventar con los años, otras no han llegado a alcanzar la madurez necesaria, y es por esto anterior por lo que este tipo de sistemas únicamente ha cubierto alrededor de un 10% del posible mercado. Una encuesta reciente muestra que el 87% de las empresas no han desplegado un sistema RTLS en sus instalaciones pese a tener la necesidad; estas son algunas de las razones por las que las personas encuestadas han tomado esa decisión [1]:

- 19%: Necesidad de más de una tecnología (necesidad de integración).
- 17%: Operativa y coste de mantenimiento.
- 16%: Falta de fiabilidad e inmadurez.
- 14%: Complejidad de implementación
- 12%: Falta de conocimiento
- 10%: Coste de la infraestructura
- 7%: Falta de un fuerte ecosistema
- 5%: No impacta en el ROI

Al parecer, ninguna tecnología por sí sola es capaz de cubrir la mayoría de los casos de uso pendientes en el mercado, y si lo es, el coste y la complejidad de la infraestructura sumada a la desconfianza de los usuarios hacen que no sean una opción.

Cabe destacar que cada alternativa tiene diferentes métodos o técnicas de localización yendo desde la menos precisa (RSSI) a la más precisa (AoA / ToF). A la hora de seleccionar y comparar entre tecnologías, la técnica de localización debe de ser uno de los puntos a analizar, más allá de un resultado concreto de precisión, ya que implica robustez y posible evolución.

Tabla 2. Comparativa entre tecnologías RTLS

Características	Bluetooth	Wi-Fi	UWB
Precisión	>1 metro (RSSI) y <1 metro (AoA)	5-10 metros (RSSI) 1-2 metros (FTM)	< 1 metro
Técnicas	RSSI, AoA, AoD	RSSI, FTM	TDoA, ToF
Complejidad de infraestructura	Media	Baja	Alta
Consumo del Tag (emisor)	Baja (BLE)	Alta	Depende
Ventajas	Compatibilidad, mejoras y coste	Compatibilidad y existencia	Precisión y latencia
Retos	Propagación 2.4 GHz	Propagación 2.4 GHz, consumo	Implementación y coste

Como se puede observar en la comparativa anterior y tal y como se ha mencionado en párrafos anteriores, cada tecnología tiene su punto débil (destacados en gris), de ahí que se piense en una combinación de varias de ellas. Aun así, analizando las características presentes en la tabla anterior, Bluetooth, con su variante de AoA incluida, parece la alternativa más compensada pese a los inconvenientes que tiene la propagación de señales en 2.4 GHz y más en los entornos de aplicación indicados, en donde existen multitud de elementos metálicos, humanos y estructuras que favorecen el multicamino y deterioran la calidad de la señal; aun así, la técnica AoA puede ser inmune a algunas de estas barreras.

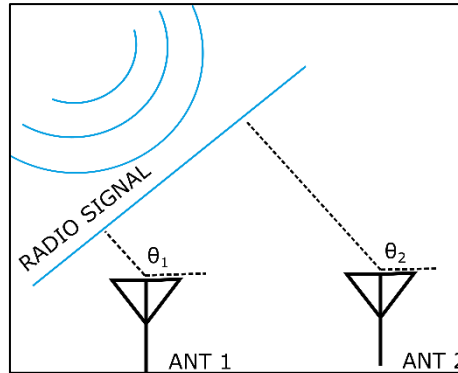


Fig. 3. Descripción gráfica de AoA (Angle of Arrival)

Por ejemplo, los RTLS Bluetooth más extendidos usan la técnica tradicional de RSSI y ofrecen una precisión a nivel de zona o área grande con varios metros de error, mientras que la nueva técnica emergente llamada AoA (especificación Bluetooth 5.1), en la que se centra esta investigación y a partir de la cual se ha ido desarrollando esta tesis, es capaz de mejorar las prestaciones en latencia y precisión. A continuación, se muestra una tabla con las diferencias de cada técnica:

Tabla 3. Diferencias generales entre RSSI y AoA

	Principio de operación	Hardware adicional	Problema de atenuación	Complejidad	Coste
RSSI	Potencia de señal recibida	No	Alto	Baja	Bajo
AoA	Ángulo de llegada de la señal	Sí	Medio	Media	Medio

Al final, cada sistema de RTLS tiene otros competidores que intentan evolucionar y solventar sus deficiencias para ser elegidos por el usuario. El ejemplo de que las tecnologías están en continua evolución se tiene en la reciente integración de Bluetooth en los puntos de acceso Wi-Fi o la incorporación de UWB en productos comerciales de la marca Apple.

Así pues, queda claro que no hay un RTLS perfecto para la demanda del mercado y cada uno presenta una propuesta de valor ligeramente diferente que hace al usuario no decidirse por la incorporación de un sistema de este tipo para disfrutar de todas las mejoras que ello conlleva [2]. La tecnología que consiga ser mejor en consumo, madurez, precisión, fiabilidad, latencia, escalabilidad y complejidad será la que marque la diferencia y sea referencia en el futuro.

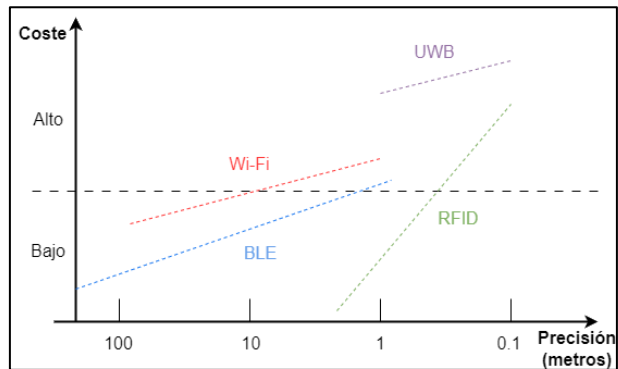


Fig. 4. Distintas tecnologías clasificadas por coste y precisión [2]

Aun así, el entorno hospitalario es complejo y cada usuario puede necesitar una funcionalidad específica del sistema, por lo que el producto debe tender a ser flexible y adaptable a cada caso (software y hardware). La adopción de este tipo de soluciones por parte de un hospital implica el estudio real de las necesidades, la formación del personal y una inversión económica, por lo tanto, la relación coste-efectivo del producto es importante. A continuación, se puede ver una clasificación de los aspectos de un RTLS en dicho ámbito y los puntos a valorar por el usuario a la hora de adoptar e instalar la solución:

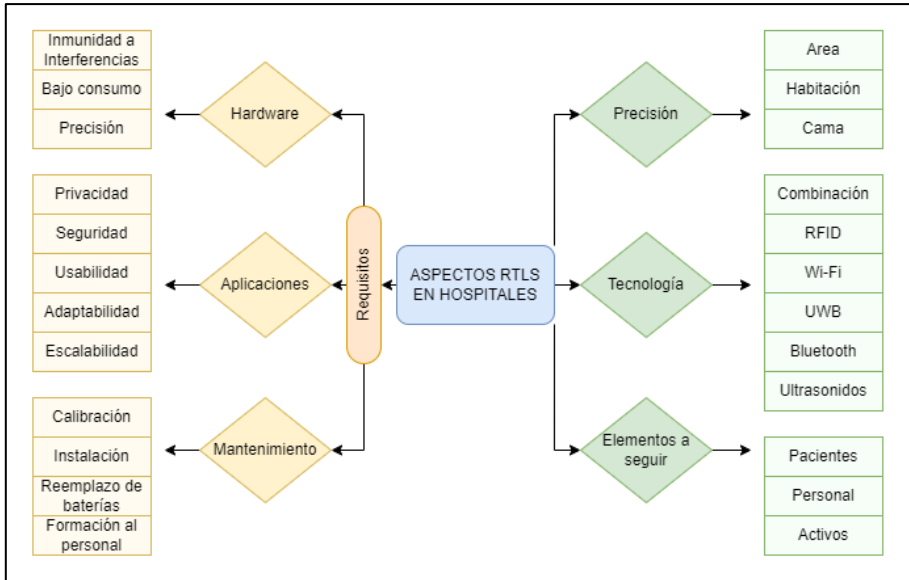


Fig. 5. Taxonomía de aspectos importantes de un RTLS en el entorno hospitalario [2]

Tal y como se deja ver en la introducción y párrafos anteriores de este capítulo, el producto a diseñar para llegar al reto marcado por esta tesis tiene como requisito de partida que se base en tecnología Bluetooth, ya que la empresa Mysphera optó por esta tecnología en sus inicios debido a la relación coste-efectivo ya mencionada, la precisión, el bajo consumo (*Bluetooth Low Energy*), la escalabilidad, la evolución (adopción reciente de la técnica AoA) y, no menos importante, la integración con otros dispositivos electrónicos como ordenadores, tabletas, móviles y relojes. Varios de los puntos citados se encuentran en la Fig. 5 anterior.

Según un estudio de mercado realizado [3] se espera que en 2024 sean puestos en mercado 5,4 billones de dispositivos Bluetooth, donde el 100% de estos soportarán *Bluetooth Classic* y *Bluetooth Low Energy*. Además, dentro de su línea de negocio de sistemas de localización (perfil de *Direction Finding*) se prevé una puesta en mercado de 255 millones de dispositivos para este propósito, llegando a 563 millones en 2028, lo que supone una tasa de crecimiento anual compuesta del 22%, lo que se traduce en multiplicar por 2,68 el crecimiento cada año. Por otro lado, se estima que a finales de 2024 se llegue a 178.000 instalaciones RTLS en el mundo llegando

a localizar 107 millones de activos, 115 millones de objetos personales y 29 millones de identificadores para control de accesos.

Todos los datos anteriores llevan a pensar que el crecimiento de Bluetooth y en concreto de los sistemas de localización basados en esta tecnología están en un momento dulce y sus previsiones de crecimiento son inmejorables. Es por ello, que el reto de aumentar la precisión de un sistema verticalizado en hospitales bajo el marco de trabajo que detalla este documento resulta útil y está alineado con la actualidad industrial.

Sin ir más lejos, la especificación 5.1 de Bluetooth se liberó en 2019 [4] y fue la primera vez que se mencionó el perfil de *Direction Finding*, bajo el cual Bluetooth declaraba la intención de apostar por la mejora de la precisión en los sistemas de localización [5]. Con esta nueva funcionalidad se pasa de una precisión en la localización de varios metros a decenas de centímetros; esto permite a Bluetooth distinguirse frente a otras tecnologías, ya que, tal y como se ha visto en las tabla y figuras anteriores de este capítulo, era una de las características a mejorar.

Para la última parte del año 2020 los fabricantes esperaban tener transceptores suficientemente sensibles como para poder cumplir con esta especificación (hasta entonces existían microcontroladores donde su periférico de radio implementaba Bluetooth 5.1 sin el perfil de *Direction Finding*).

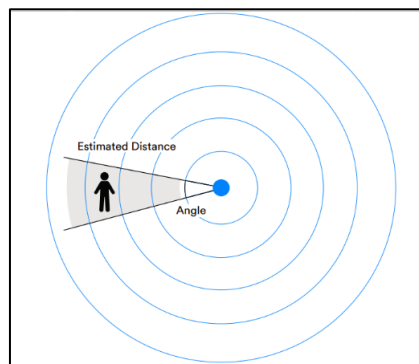


Fig. 6. Ilustración de ejemplo de Bluetooth Direction Finding [5]

Hasta la fecha, únicamente existían soluciones que decían implementar *Angle of Arrival* propietario, pero realmente no era la técnica AoA tal y como se conoce y se implementaba en otro rango de frecuencias y comunicaciones, sino que se utilizaba la técnica de RSSI con antenas directivas apuntando a diferentes direcciones del espacio y se decidía el ángulo de llegada a través de la antena que mejor potencia recibía, como si de un radar con antenas monopulso se tratase [6]. También existían otras soluciones, como la del fabricante Texas Instruments (BOOSTXL-AOA), que se adelantó a la especificación e implementó un producto ya descatalogado que también se basaba en AoA propietario y que no consiguió alcanzar la estabilidad que se requiere de este tipo de soluciones. Se desconoce la técnica empleada en el algoritmo de estimación ya que no se publicó en su momento. Este último kit se evaluó durante el primer periodo de investigación de esta tesis y se llegó a la conclusión de que la señal era muy inestable y la precisión menor a un metro se cumplía en menos del 50% de los casos.

Con los años, varios fabricantes han ido sacando productos al mercado que cumplen con el perfil definido por la especificación 5.1 e implementan la técnica tal y como se describe en los documentos oficiales [5]. Entre otros, Silicon Labs (2020) y Nordic Semiconductor (2019) se mantienen hoy en día como referentes en proveedores de microcontrolador + transceptor radio AoA y han ido evolucionando sus diseños y herramientas complementarias para poder ofrecer una precisión por debajo del metro, estable y más inmune a rebotes y al efecto multi-camino.

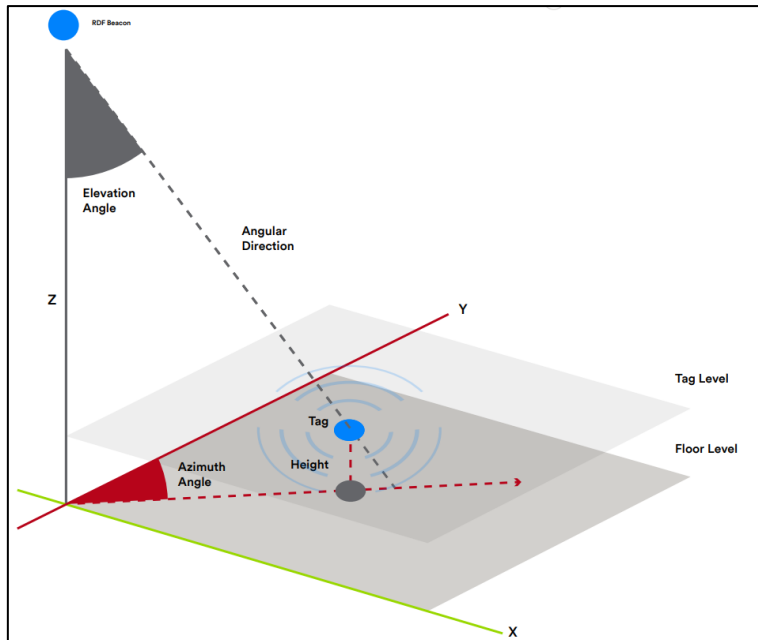


Fig. 7. Tag siendo localizado por receptor AoA [5]

Los entornos hospitalarios, a menudo caracterizados como espacios de actividad constante y crítica, donde cada segundo cuenta y la precisión en la localización desempeña un papel vital en la eficiencia operativa y la calidad de la atención médica. La complejidad de la gestión hospitalaria moderna se ve acentuada por la necesidad imperativa de rastrear con exactitud no solo activos y equipos médicos, sino también la ubicación precisa de pacientes y el personal médico en tiempo real.

En este contexto, la localización precisa es un componente esencial para la gestión efectiva de recursos y la mejora de los procesos operativos. Desde la asignación eficiente de recursos médicos hasta la respuesta rápida en situaciones de emergencia, la capacidad de conocer la ubicación exacta de activos y personas se traduce directamente en una atención médica más eficaz y en la optimización de los flujos de trabajo.

Los hospitales se enfrentan a desafíos únicos, como la necesidad de localizar equipos médicos críticos, el seguimiento de pacientes en tiempo real para garantizar su seguridad y la coordinación eficiente del personal médico en

entornos a menudo laberínticos. La precisión en la localización no solo agiliza las operaciones diarias, sino que también puede ser clave en situaciones críticas.

Tradicionalmente, se ha asumido las limitaciones que hasta el momento presentaban las técnicas de localización como RSSI, especialmente en entorno tan demandantes como el sanitario. Sin embargo, en los últimos años, la tecnología AoA ha surgido como una solución prometedora para abordar estos desafíos.

La vasta experiencia y el sólido bagaje de Mysphera en el campo de la localización en tiempo real en entornos sanitarios le han brindado a la compañía la oportunidad de analizar las diversas tecnologías RTLS disponibles a lo largo del tiempo, así como sus características y limitaciones. De todas ellas, el Bluetooth RSSI se destacó como la más adecuada, dadas sus particularidades y las necesidades específicas del entorno hospitalario.

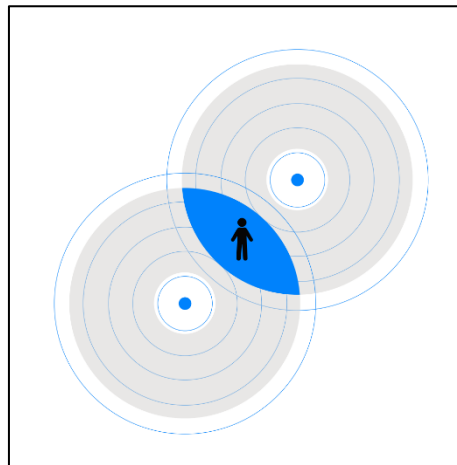


Fig. 8. Ejemplo de localización basada en RSSI [5]

La utilización histórica de la potencia de la señal recibida (RSSI) como el fundamento de las técnicas tradicionales de localización en interiores ha sido, sin duda, un hito en la evolución de los sistemas de posicionamiento. No obstante, la RSSI, al depender exclusivamente de la fuerza de la señal sin considerar la complejidad del entorno, presenta desafíos tecnológicos

cruciales. La incapacidad para abordar las fluctuaciones inherentes en la intensidad de la señal, las interferencias frecuentes de otros dispositivos inalámbricos y la vulnerabilidad a las variaciones ambientales, como la absorción y reflexión de las ondas electromagnéticas, se traducen en estimaciones de posición imprecisas y, en ocasiones, totalmente erráticas.

En entornos hospitalarios, donde la movilidad constante del personal médico, la presencia de numerosos obstáculos físicos y la diversidad de equipos electrónicos interfieren con la transmisión de señales, las limitaciones de la RSSI se vuelven aún más evidentes. La falta de visibilidad directa entre los dispositivos y la imposibilidad de superar las barreras estructurales resultan en estimaciones de ubicación que, en el mejor de los casos, son aproximadas.

Sin embargo, la tecnología está en constante evolución y surgen nuevas opciones que mejoran lo ya existente. En este sentido, la tecnología *Angle of Arrival* se presenta como una innovación que permite añadir funcionalidades, superando ciertas limitaciones y ofreciendo mejoras en términos de precisión a nivel de cama, susceptibilidad a interferencias y capacidad para superar las atenuaciones de los objetos físicos.

La integración de AoA en las soluciones de Mysphera marca un punto de inflexión en la forma en que se aborda la localización:

- Precisión a nivel de cama: AoA destaca por su capacidad para ofrecer resultados excepcionalmente precisos a nivel de cama. Este atributo esencial responde directamente a la necesidad crítica en entornos hospitalarios, donde la ubicación exacta de activos, personal médico y pacientes es esencial para la asignación efectiva de recursos y la gestión eficiente de activos hospitalarios
- Optimización de procesos hospitalarios: AoA permite una asignación más eficiente de recursos, reduciendo los tiempos de respuesta y mejorando la coordinación del personal médico. Desde la logística de activos hasta la gestión de flujo de pacientes, la nueva técnica redefine cómo se ejecutan y

coordinan las operaciones hospitalarias, mejorando significativamente la eficiencia operativa y la calidad de la atención médica.

- Adaptabilidad a entornos hospitalarios: AoA destaca por su resistencia a interferencias y su capacidad para eludir las atenuaciones provocadas por los obstáculos físicos. Estas características se traducen en un sistema de localización robusto y confiable en entornos hospitalarios complejos.

Los datos siguientes remarcan la importancia del buen funcionamiento del sistema de localización, que, junto al software pertinente, forman la base de la solución que da valor al usuario:

Atendiendo al reporte de HIMSS 2013 [7], cada 1% por debajo del 85% de tasa de ocupación de un bloque quirúrgico supone un coste entre 7.500€ y 12.000€ por quirófano al año. Antes del uso del sistema de Mysphera, un hospital reportó un rendimiento quirúrgico del 48% y después del despliegue se optimizó hasta llegar al 69%, lo que supone un ahorro medio de 194.000€ por quirófano al año. El centro ahorró más de dos millones de euros en doce meses. También se redujeron en un 10% las complicaciones quirúrgicas. Por otra parte, en lo referente al equipamiento médico, un hospital utilizaba 600 bombas intravenosas y al instalar la solución redujo el stock a 530, lo que supuso un ahorro de 192.500€.

Así pues, atendiendo a la precisión y fiabilidad de dicho sistema, lo que se traduce técnicamente en una señal de radiofrecuencia estable y potente, se precisa de unos dispositivos que incluyan antenas específicas y de altas prestaciones. Estas características permitirán mejorar los datos presentados en el párrafo anterior.

Finalmente, se considera una buena estrategia entonces adoptar un enfoque híbrido que combine técnicas convencionales, como RSSI, con la innovadora AoA. Este enfoque único capitaliza las fortalezas de ambas técnicas para optimizar la precisión y la estabilidad del sistema de localización en los entornos objetivo y permite seguir manteniendo el foco en la relación coste-efectivo.

Este enfoque híbrido no solo está diseñado para abordar las limitaciones tecnológicas, sino que también se alinea estratégicamente con el compromiso de proporcionar soluciones que no solo resuelvan problemas existentes, sino que también anticipen y aborden futuros desafíos en el ámbito de la atención médica. La decisión de integrar AoA representa una inversión en la mejora continua y la innovación, con el objetivo de proporcionar soluciones líderes en la industria que beneficien no solo a los profesionales de la salud sino también a los pacientes.



Fig. 9. Equipo médico tomando decisiones sobre panel de datos de un RTLS

3. Elemento emisor: Tag

3.1. Introducción

El Tag es un dispositivo fundamental en el sistema de localización de la solución de Mysphera. Este dispositivo es el elemento emisor del RTLS que transmite mensajes Bluetooth periódicamente para que los elementos receptores de la plataforma analicen la señal y sean capaces de ubicarlo, posicionarlo o localizarlo dentro de una zona definida.



Fig. 10. Tag emisor comercializado de Mysphera

Este producto puede ser utilizado para la localización de activos (mobiliario, maquinaria, útiles, etc.) y personas. Dependiendo del sistema de anclaje, su uso variará sin cambiar el factor de forma, la carcasa ni la electrónica. Esto es posible gracias a su reducido tamaño: 45x35x14 mm.

La interfaz de usuario se compone de:

- Un pulsador: Envía dos tramas Bluetooth específicas para darle una utilidad según requiera el usuario. Distingue entre pulsación corta y larga por umbral de tiempo definido. Ejemplo: Tras pulsación de botón comienza el contador de tiempo de la intervención quirúrgica.

- Dos indicadores led: Mediante la secuencia de distintos parpadeos y cambios de color informan al usuario de que su acción en el pulsador ha sido procesada

Gracias a la tecnología Bluetooth Low Energy y la optimización de la funcionalidad en el firmware del dispositivo, se consigue un bajo consumo que permite una duración de batería de 1 a 3 años dependiendo del tiempo de uso y la configuración del tiempo de envío entre tramas periódicas.

3.2. Estado del arte

En este apartado, atendiendo a la utilidad del dispositivo emisor descrito en el anterior, se muestra un análisis del estado actual de la tecnología de radiofrecuencia; concretamente de los tipos de antenas que existen en el ámbito de la electrónica de consumo de *wereables* Bluetooth o internet de las cosas (relojes, llaveros, pulseras, móviles, etcétera).

Cabe destacar que en el siguiente apartado de diseño es donde se profundizará en el ámbito del diseño de la placa de circuito impreso y los componentes electrónicos que acompañan al módulo de radiofrecuencia. En este, el foco está en el elemento que produce la mejora de esta parte del sistema, y es uno de los objetivos de esta tesis doctoral.

El número de dispositivos del denominado internet de las cosas (IoT) está en continuo crecimiento y todos ellos tienen como denominador común, como su propio nombre indica, la conexión a internet. Para ello se necesita establecer una comunicación inalámbrica mediante una o varias antenas, y dado que estos dispositivos cada vez son más pequeños, estas antenas también lo son.

El mundo del diseño de antenas estaba acostumbrado a la creación de elementos más grandes (a frecuencias más bajas) y actualmente, con la aparición de la banda ISM y los protocolos de comunicación asociados a la misma (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, etc.) surge una nueva necesidad de diseño, que son las antenas pequeñas (*small antennas*). Estas antenas ofrecen nuevos retos de diseño, ya que, miniaturizar este tipo de elementos

radiantes tiene unos inconvenientes como son: pérdida de eficiencia, dependencia del plano de masa, entornos cercanos variables, necesidad de embeber la antena en la PCB [8], zona de Fraunhofer alrededor de 1 metro (viable medir en campo lejano en cámara anecoica), etc.

Por lo tanto, el factor 'Q' o factor de calidad de una antena es uno de los parámetros más comunes a la hora de comprar y seleccionar antenas, ya que refleja a grandes rasgos cuánto de buena es una antena para una frecuencia o banda frecuencial.

Este parámetro suele llevar a confusión, ya que es directamente proporcional a la eficiencia de radiación 'r' (que se requiere alta para tener un mayor rango de cobertura) e inversamente proporcional al ancho de banda 'BW'; esto quiere decir que, para antenas con ancho de banda estrecho y muy eficientes 'Q' será alto, pero para antenas muy eficientes cuya aplicación requiera un ancho de banda amplio, este factor será bajo, y no necesariamente la antena está perdiendo calidad, ya que, también se valora lo sensible que es una antena a desintonizarse. Este desajuste o pérdida de sintonización ocurre normalmente por un cambio en el entorno cercano, que cambia la frecuencia de resonancia de la antena (cambio de constante dieléctrica ' ϵ '), y si el ancho de banda es muy estrecho pasará a ser ineficiente a la frecuencia esperada (más sensible a desajustarse cuanto menos ancho de banda tenga).

En resumen, las antenas pequeñas no se centran tanto en tener un buen factor de calidad Q, sino que interesa que sean eficientes en radiación 'r' y que, si van a ir en *wearables* o aplicaciones similares que cambien de entorno cercano o posición continuamente, también interesa que tengan un gran ancho de banda 'BW'.

En concreto, para una antena común como es la de tipo IFA (Inverted-F Antenna), existen varios factores que afectan a la eficiencia de la antena:

- Altura de la antena respecto del plano de masa o final del sustrato: cuanto más pequeña, menor 'r'.
- Superficie de la antena: cuanto más pequeña, menor 'r'.

- Sustrato: Simular con cobre con pérdidas en lugar de PEC (conductor perfecto) implica una variación en el comportamiento de la eficiencia. Menor r' .
- Plano de masa: Es el otro brazo del dipolo, solo se desprecia y se puede considerar un plano de masa estándar si es muy grande, pero esto no se cumple en dispositivos de Internet de las Cosas. Variando el plano, varían las prestaciones de la antena.
- Entorno cercano: La presencia del cuerpo o elementos metálicos, cambian la eficiencia si la antena se ha diseñado para espacio libre (aire), además de cambiar el diagrama de radiación; si se sabe que este entorno va a estar presente, se puede cambiar el diseño para que el nulo de radiación apunte a este elemento y así no perder tanta eficiencia por la absorción. Para este tipo de casos se recomiendan antenas tipo resonador dieléctrico (véase final de este apartado) cuyo campo cercano se concentra en el interior de la cavidad y los elementos cercanos le afectan menos.

Como detalle práctico, y aprovechando la experiencia de un curso de la *European School of Antennas and Propagation* dentro del marco de trabajo de esta tesis doctoral, en la empresa de telecomunicaciones Orange se considera que una antena con $r' > 30\%$ es una antena buena para este tipo de casos de uso y utilidad [9].

A continuación, y como punto y final a esta sección, se muestran varios tipos de antena para este tipo de dispositivos y así el lector podrá tener un resumen de las características de cada una y entenderá en posteriores apartados la elección del tipo de antena PIFA para el emisor Tag [10] [11] [12]:

- Antenas basadas en resonadores dieléctricos: Son menos sensibles a los cambios de constante dieléctrica de los medios contiguos, por el contrario, son voluminosas.
- Antenas tipo parcha: Tienen buen ancho de banda y directividad; también ocupan un mayor espacio que otros tipos de antenas.

- Antenas conformadas o dobladas en estructura metálica: Usadas en telefonía móvil antes de que llegara el concepto de «plastrónica» [13] o impresión de conductores en plásticos. Son antenas eficientes, permiten romper cierta dependencia de sus prestaciones con la placa de circuito impreso, pero se necesita un mayor volumen en altura, además de un proceso de soldadura manual en la mayoría de los casos.

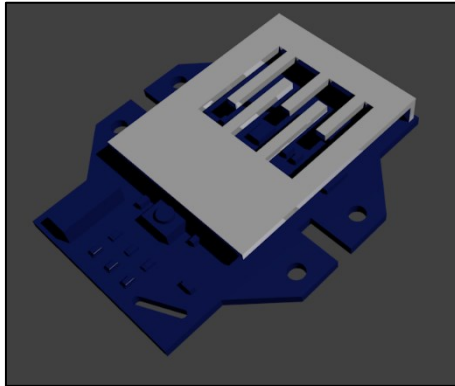


Fig. 11. Ejemplo de electrónica de Tag emisor con antena doblada en pletina metálica

- Antenas tipo ranura: Son antenas muy directivas y estables. Requieren de una estructura multicapa en la placa de circuito impreso o de una estructura conductora voluminosa para implementarse.
- Antenas PIFA (IFA plana) [14] [15] [16]: Son antenas basadas en el concepto de dipolo referido a masa (monopolo) que reducen espacio gracias a no ser diferenciales respecto a otro segmento de la antena. No son las antenas más eficientes, pero sí unas de las más reducidas. Utilizando técnicas como las siluetas tipo meandro se pueden reducir sus dimensiones [17].

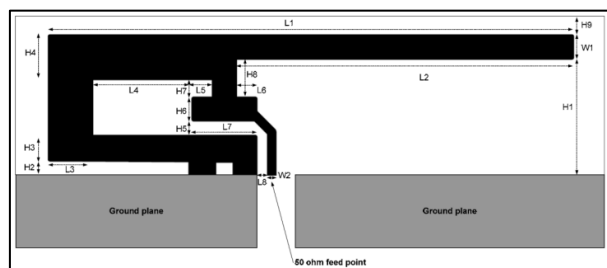


Fig. 12. Antena tipo PIFA de Texas Instruments

- Antenas cerámicas: Son antenas de prestaciones similares a las anteriores. Sus dimensiones son las más reducidas del mercado, ya que, gracias a tecnologías como LTCC permiten insertar una antena PIFA en un sustrato con otra constante dieléctrica, lo que hace desplazarse la frecuencia de funcionamiento y, por lo tanto, en este caso, miniaturizar la antena [18] [19].

3.3. Diseño

En lo referente al apartado anterior, el primer componente que se tiene en el modelo de Tag de partida y que se pretende respetar es la antena.

Esta antena es de tipo PIFA con silueta de meandro. Es uno de los tipos más utilizados por varias razones de peso [20]:

- Tamaño: Su tamaño, gracias a la forma de meandro (que reduce ligeramente la eficiencia) es óptimo para funcionar en 2.4 GHz e implementarse en un dispositivo del tamaño de un reloj o pila de botón común.
- Características de radiación: Su uso a lo largo de los años ha permitido depurar sus técnicas de ajuste y adaptación para aumentar la eficiencia y mejorar su diagrama de radiación, tal y como se puede ver en el siguiente apartado de análisis. Su diagrama base es de tipo 'donut', por lo que radia en varias direcciones del espacio y tiene unos nulos de radiación muy definidos. Además, su eficiencia de radiación, siempre y cuando esté bien adaptada mediante una red de pasivos o posición del punto de alimentación, es aceptable atendiendo al criterio que se mencionaba anteriormente de superar el 30%.
- Precio: Su coste es prácticamente nulo comparado con otro tipo de antenas destinadas a ser usadas en una placa de circuito impreso. Esto se debe a que la antena se fabrica en el mismo cobre y sustrato que el circuito electrónico y por lo tanto no tiene un coste adicional como sí lo tendría una antena cerámica o doblada, ya que se consideraría un componente aparte.

Por todas las anteriores razones, esta antena, tanto en el diseño de Tag inicial como en su posterior mejora, será la elegida y se mantendrá adaptando su longitud e impedancia para cada caso concreto.

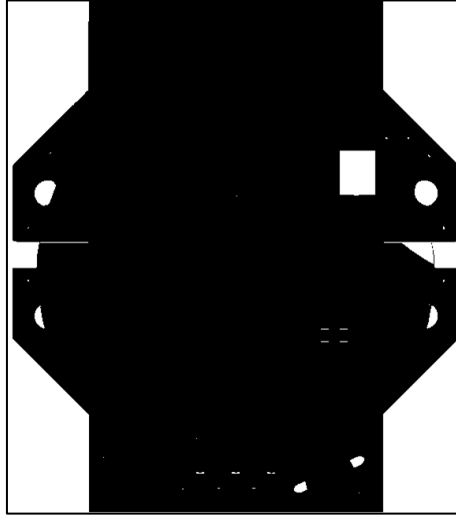


Fig. 13. Diseño electrónico de Tag Mysphera

Respecto al diseño electrónico, al margen de los componentes de interfaz de usuario descritos anteriormente, la pila de botón y algunos componentes pasivos requeridos, el circuito se basa en un microcontrolador estándar que lleva embebido un periférico de radiofrecuencia. Este periférico llamado transceptor es específico para los canales de envío de Bluetooth (2.402-2.48 GHz) y su salida mediante los terminales del encapsulado es diferencial.

Para poder adaptar la antena seleccionada a la salida diferencial/balanceada del transceptor se usa un componente electrónico adicional para convertir la señal en no balanceada y referirla a la masa o terminal negativo del circuito (también se debería de usar para cualquier antena referida a masa o monopolo). Este componente se llama balun (*balanced-unbalanced lines transformer*) y son diseñados específicamente para una banda frecuencial concreta y con una impedancia de entrada definida para adaptarse a la impedancia de salida del microcontrolador.

Además del balun, se requiere de una red de adaptación básica, con componentes pasivos, en forma de 'L' o ' π ' para corregir cualquier desadaptación producida por la fabricación o la no uniformidad del sustrato FR4. En este caso, en un primer lote de producción se debe de ir montando distintos valores para los componentes pasivos seleccionados hasta que la adaptación de la antena sea la óptima. Esta optimización vendrá determinada por el resultado de los parámetros S o la medida de la eficiencia de radiación.

A continuación, se puede ver una ilustración del esquemático donde se observan las distintas etapas descritas, desde que la señal se genera en el transceptor hasta que llega a la antena:

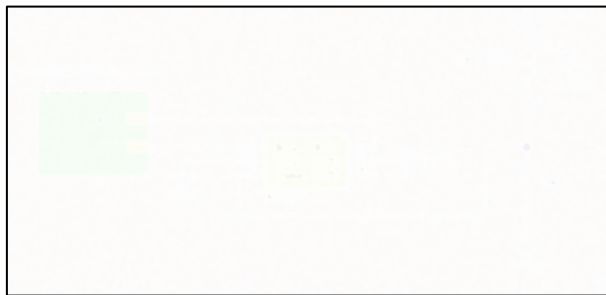


Fig. 14. Esquemático de la etapa de radiofrecuencia del diseño electrónico

3.3.1. Análisis

Con el objetivo de mejorar las prestaciones de radiación del emisor, se estudia, analiza y caracteriza el dispositivo existente. Tras el análisis se establecerán varios puntos de mejora y se tomarán decisiones al respecto.

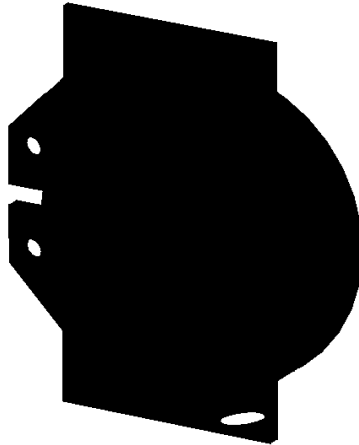


Fig. 15. Tag emisor original de Mysphera

Primeramente, se modela la antena en CST MICROWAVE STUDIO según las dimensiones proporcionadas por Texas Instruments en la nota de aplicación [21] (documento que sirvió de referencia para el diseño de esta versión del emisor de Mysphera), la cual será usada en todas las variantes de la simulación (véase ilustración siguiente), tomando como incógnita la longitud del plano de masa, ya que no se proporciona, y que, según documentos y diseños del propio fabricante, puede variar, cambiando así sus características. Se supone que, en el plano de masa en este tipo de antenas, y siendo sus dimensiones del mismo orden que la antena, la radiación en bordes del propio plano es relevante; se considera un elemento radiante que acompaña a la antena y que se modifica para cambiar las características de radiación de la antena como en la técnica de ensanchamiento de ancho de banda y la técnica de reducción del tamaño mediante cortocircuito [22].

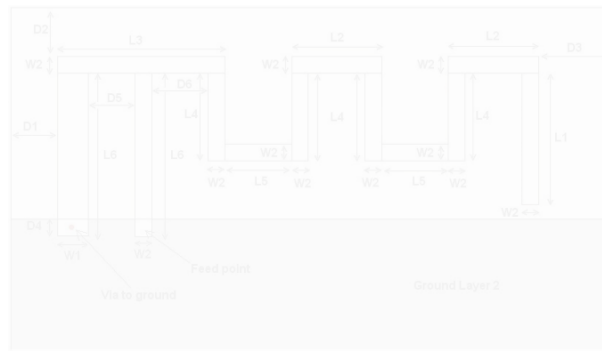


Fig. 16. Ejemplo de antena parametrizada por Texas Instruments

Seguidamente se introducen en el diseño varias modificaciones que, por un lado, acercan el dispositivo al elemento de referencia (*dongle* de Texas Instruments), como el cambio de propiedades en los materiales, la estructura multicapa y dimensiones. Por otro lado, las modificaciones acercan el dispositivo al Tag de Mysphera, clonando el contorno de este, añadiendo vías entre planos e introduciendo la batería (extensión del plano de masa) y la carcasa plástica que envuelve a dicho producto de la compañía.

Con este segundo paso se pretende conocer si las especificaciones de la antena proporcionadas por el fabricante americano y usada por la empresa se asemejan a las simuladas, modelando su diseño de la forma más parecida posible, sabiendo que no se introducen las condiciones de medida del propio fabricante porque no aplican al caso de uso (*dongle* insertado en un conector USB de una CPU). Una vez conocido lo anterior, se aproximan las simulaciones al Tag de Mysphera para cuantificar el error cometido al cambiar el diseño de referencia para adaptarlo a los requerimientos del producto (cambio en el plano de masa y elementos cercanos, así como en propiedades de los materiales).

Por último, se parte de la aproximación al Tag para conocer la influencia del cuerpo humano en dicho dispositivo [23] [24]. Para ello se modela un brazo partiendo de dimensiones proporcionadas por artículos de investigación y materiales de la librería de CST MICROWAVE STUDIO [25] [26] [27] [28].

Para todas las simulaciones, se han utilizado los materiales FR-4 (*Lossy*) ($\epsilon_r = 4.3$, $\mu_r = 1$, $\tan \delta = 0.025$) y *Copper (Annealed)* ($\sigma = 5.8e+007$, $\mu_r = 1$) de la librería

de CST para la caracterización de la placa de circuito impreso. Partiendo así de las propiedades originales del proveedor de Mysphera (Altura del dieléctrico (HD) = 0.8 mm; Altura del metal (HM) = 0.07 mm; ϵ_r dieléctrico = 4.3) y sufriendo modificaciones para asemejarse a otros proveedores (indicadas en la introducción de la simulación en cuestión).

Así pues, se van haciendo caracterizaciones de forma gradual para observar los comportamientos de los distintos elementos y parámetros de fabricación.

Antena simple

Se realiza una simulación de la antena base, con dimensión del plano de masa rectangular aproximada al Tag de Mysphera.

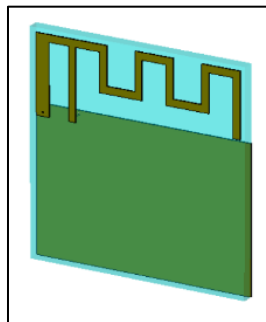


Fig. 17. Antena simple de inicio

A continuación, se observan los resultados de los parámetros S, impedancias y diagramas de radiación relevantes:

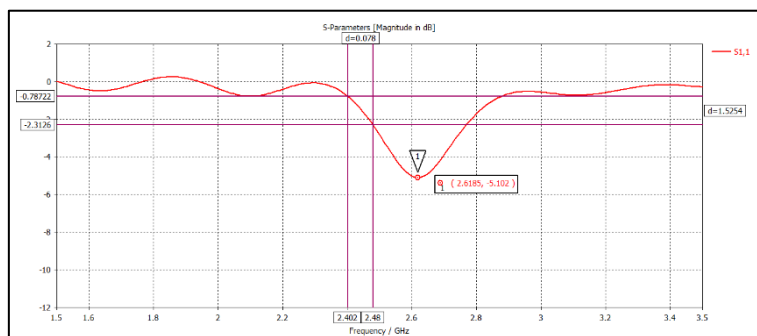


Fig. 18. Parámetro S11 de la antena simple

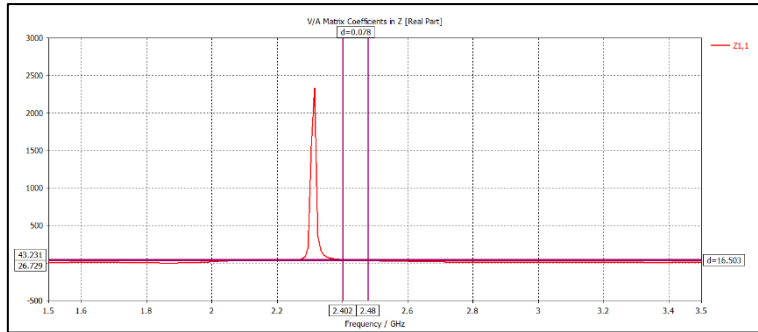


Fig. 19. Parte real del parámetro Z11

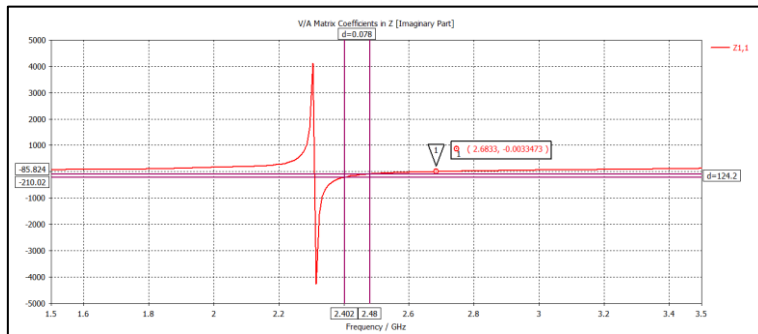


Fig. 20. Parte imaginaria del parámetro Z11

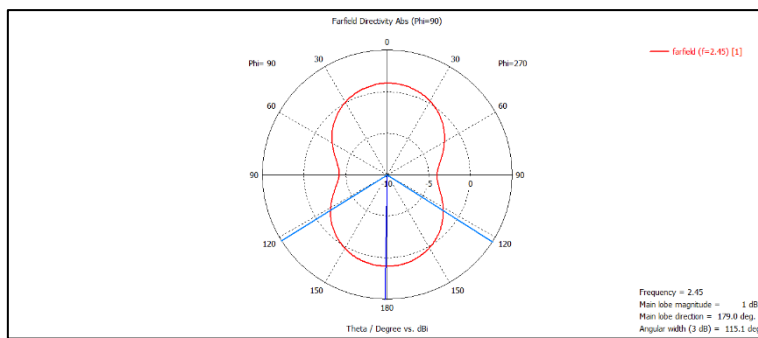


Fig. 21. Diagrama de radiación de la antena simple (Phi=90)

Como se puede observar en la gráfica del parámetro S11, la resonancia de la antena está centrada en 2.62 GHz, quedando así la banda de interés por encima de -6 dB (2.402 - 2.48 GHz), lo que significa que se refleja demasiada potencia como para obtener una buena transmisión.

En cuanto al diagrama de radiación, se muestra el corte más crítico, aun así, se puede observar en la siguiente ilustración el diagrama en 3D, que no deja de ser un diagrama típico de una IFA:

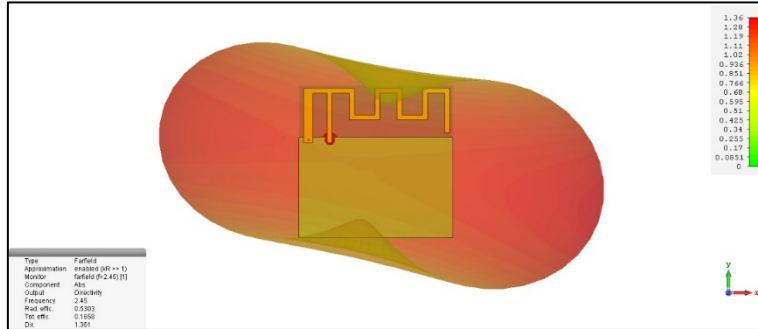


Fig. 22. Diagrama de radiación de la antena simple en 3D

En cuanto a las corrientes de superficie, que van a marcar los tramos del dispositivo que más radian, se obtiene la siguiente representación en 3D para 2.4 GHz:

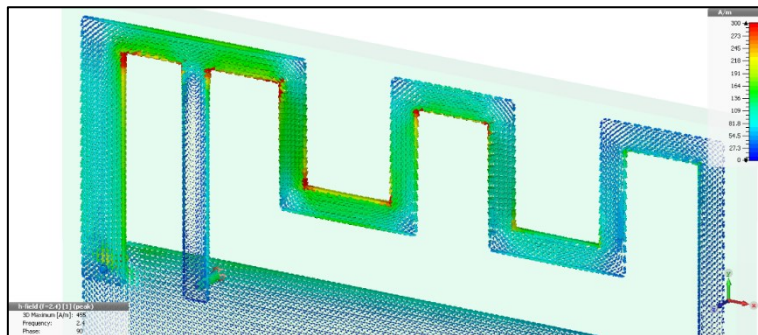


Fig. 23. Corrientes de superficie en la antena simple

En la anterior ilustración se puede observar cómo los tramos radiantes son los más próximos al punto de alimentación. Además, en las esquinas interiores, al existir una discontinuidad abrupta y al producirse reflexiones, es donde más se concentra la radiación, la cual se podría redirigir a los tramos longitudinales o transversales redondeando las esquinas, haciendo así una transición más suave y evitando la discontinuidad. De esta forma se conseguiría una distribución de corriente más ideal, donde la variación de

intensidad es menor y viene marcada por la oscilación de la propia corriente y no por las discontinuidades del camino (una línea de transmisión ideal tendría, únicamente, variaciones senoidales de corriente).

Plano de masa variable en eje Y

Se sigue con una simulación de la antena base, con plano de masa semejante al *dongle* de Texas Instruments. La longitud vertical del plano de masa se parametriza con L7, por lo que la simulación indica resultados para distintos valores de L7.

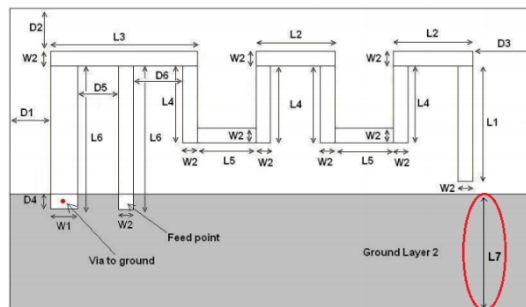


Fig. 24. Parámetro L7 a analizar en la antena

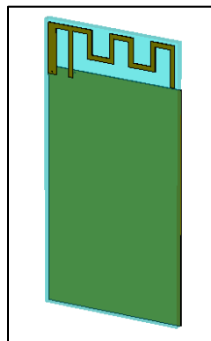


Fig. 25. Antena simple con plano de masa alargado en Y

A continuación, se observan los resultados paramétricos asociados a 10mm y 25 mm de longitud de plano de masa en el eje vertical Y (verde y rojo): parámetros S, parámetros Z y corte más relevante del diagrama de radiación.

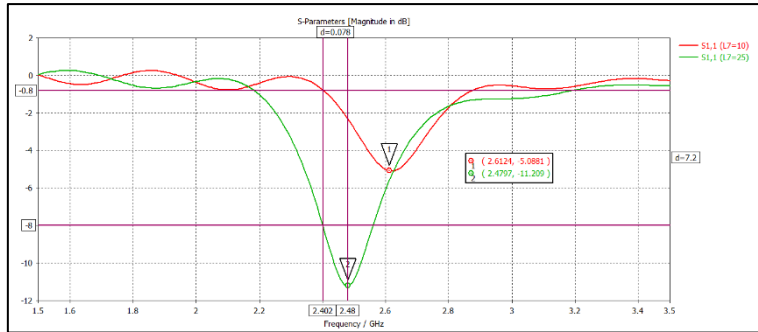


Fig. 26. Parámetro S11 de la antena simple para distintos L7

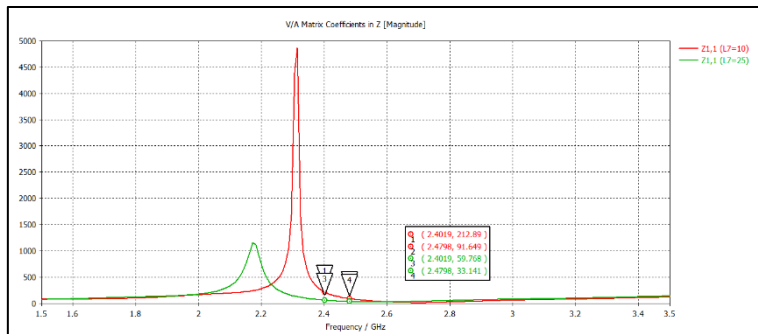


Fig. 27. Parte real del parámetro Z11 para distintos L7

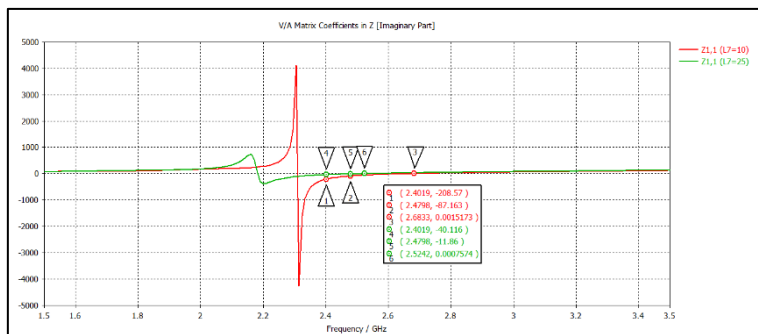


Fig. 28. Parte imaginaria del parámetro Z11 para distintos L7

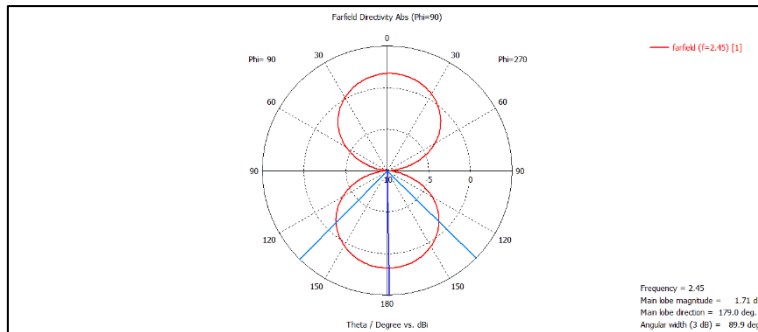


Fig. 29. Diagrama de radiación para $L7=25\text{mm}$

Se denota que la longitud del plano de masa afecta considerablemente a la sintonización de la antena. El pico del S_{11} se ha desplazado de 2.62 GHz para un $L7 = 10\text{ mm}$ (línea roja, simulación anterior) a 2.48 GHz (línea verde). Esto también se ve reflejado en la impedancia real e imaginaria de la antena. Al final, lo que se consigue con el aumento del plano de masa, es tener una mayor superficie que radia (plano de masa radiante), lo que es equivalente a alargar la antena, que normalmente se traduce en un desplazamiento hacia frecuencias menores.

En cuanto al diagrama de radiación, los nulos del diagrama en forma de 'donut' se acentúan de tal forma que llegan aproximadamente a -10 dB mientras que, en el caso anterior, con plano de masa más corto, se llega a -4 dB. Esto es debido a que la corriente tiene un plano más largo por donde propagarse y encontrar discontinuidades que hacen que se radie, así pues, los nulos se acentúan indicando que en esa dirección del Y en donde se incrementa el plano ($L7$) el dispositivo radia menos.

Plano de masa variable en el eje X

Se simula también la antena base, partiendo del punto anterior, con plano de masa ensanchado (parámetros D1 y D3).

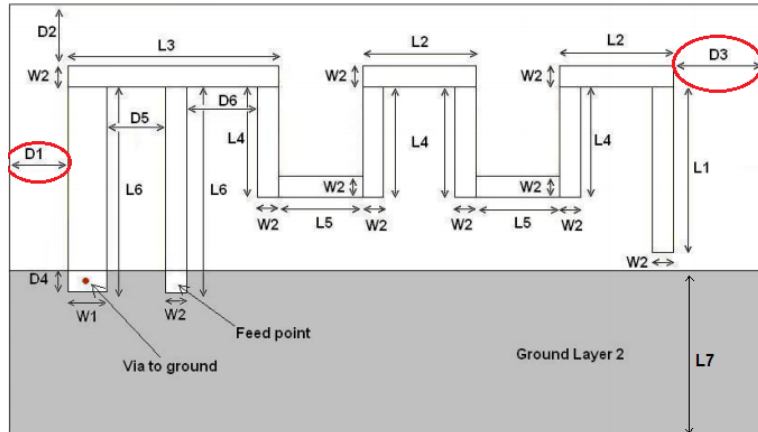


Fig. 30. Parámetros D1 y D3 a analizar en la antena

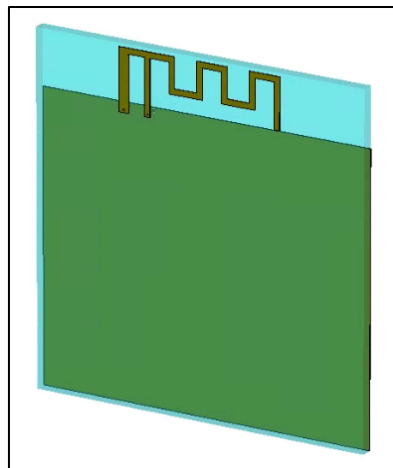


Fig. 31. Antena simple con plano de masa alargado en X

A continuación, se observan los resultados asociados a $D1 = 3 \text{ mm}$ y $D3 = 3 \text{ mm}$ ensanchando así el plano de masa y toda la placa de circuito impreso. Los resultados analizados son: parámetros S, parámetros Z y corte más relevante del diagrama de radiación.

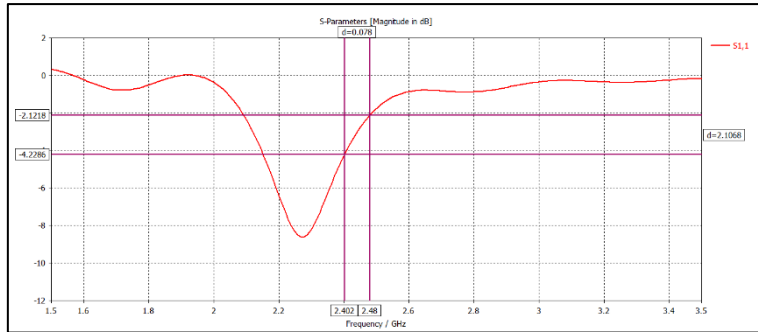


Fig. 32. Parámetro S_{11} de la antena simple para D1 y D3 concretos

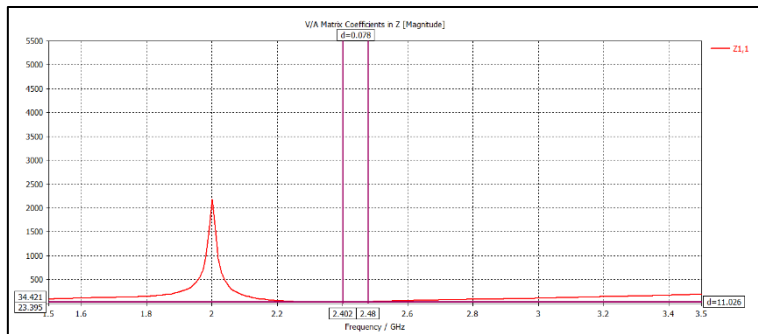


Fig. 33. Parte real del parámetro Z_{11} para D1 y D3 determinados

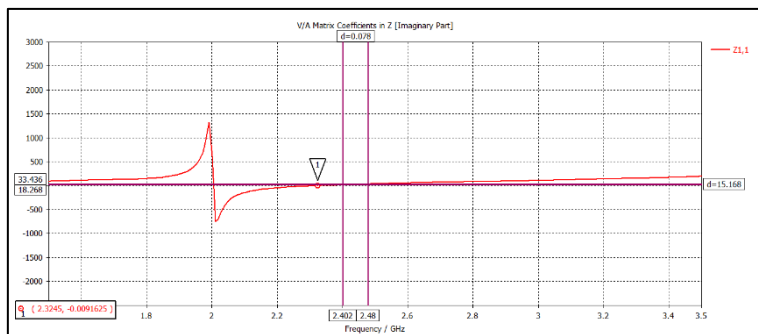


Fig. 34. Parte imaginaria del parámetro Z_{11} para D1 y D3 determinados

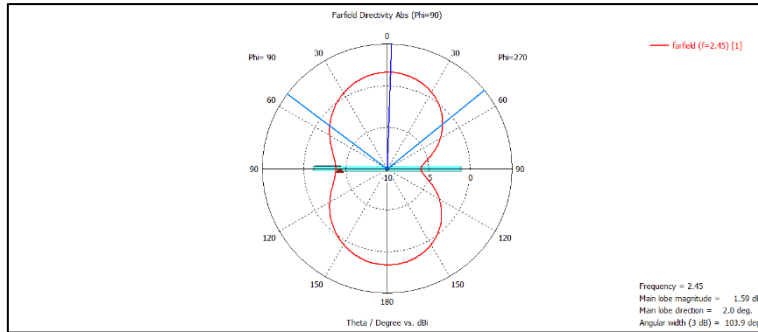


Fig. 35. Diagrama de radiación para D1 y D3 aumentados a 3mm

Tras ensanchar el plano de masa en el eje X, se observa como la antena se desintoniza. Esto se corresponde con el comportamiento que se viene observando en anteriores simulaciones, ya que se ha modificado el plano de masa nuevamente, lo que varía la superficie de radiación en la dirección de propagación de la corriente e implica un cambio en la frecuencia de resonancia. En este caso se puede establecer una relación de aumento de longitud con una bajada en frecuencia.

Además, al realizar dicha acción de ensanche en el eje X, también se está modificando el diagrama de radiación de la ilustración anterior, que en este caso se ha incluido el dispositivo superpuesto para observar la diferencia entre el borde cercano a la antena y el borde final. La diferencia radica en los distintos nulos que se obtienen. Por un lado, en el borde ensanchado cercano a la antena se produce una radiación, como se ha comentado en el párrafo anterior, por lo que el nulo que existía se ha suavizado en esa zona ya que ahora se radia en mayor medida. Por otro lado, en el borde opuesto a la antena, no se observa una mejora tan relevante debido a la lejanía con la antena, pero sigue existiendo mejora por la influencia de la radiación en el otro extremo del plano. Se puede observar la corriente de superficie del caso actual y del caso sin ensanche en la siguiente ilustración:

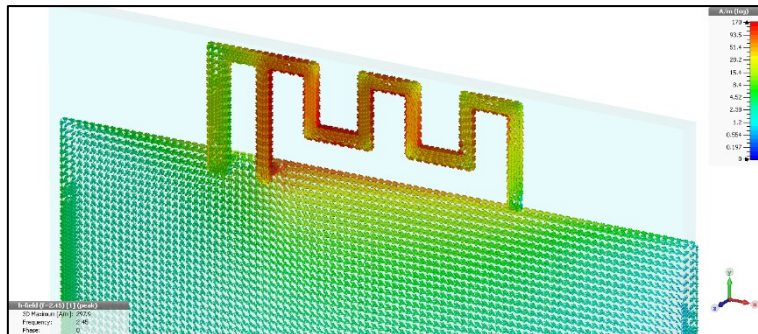


Fig. 36. Corriente de superficie con ensanchamiento del plano de masa en eje X

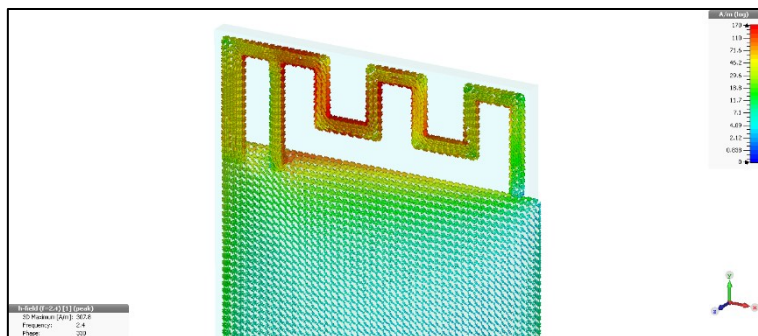


Fig. 37. Corriente de superficie sin ensanchamiento del plano de masa en eje X

Propiedades de los materiales

Se prosigue con una simulación de la antena base, con plano de masa semejante al *dongle* de Texas Instruments. En esta simulación se han cambiado las características de los materiales y de fabricación para aproximarse aún más al *dongle* de referencia (Altura del dieléctrico (HD) = 1 mm; Altura del metal (HM) = 0.035 mm; ϵ_r dieléctrico = 4.5).

A continuación, se observan los resultados (parámetros S, parámetros Z y diagrama de radiación) para el cambio en las características de los materiales de la placa de circuito impreso:

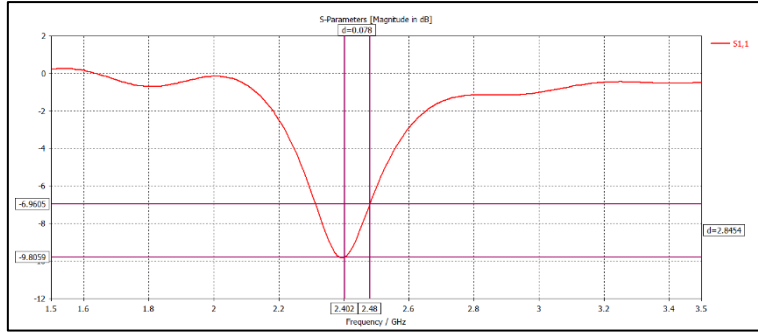


Fig. 38. Parámetro S_{11} de la antena simple para cambios en las propiedades de los materiales

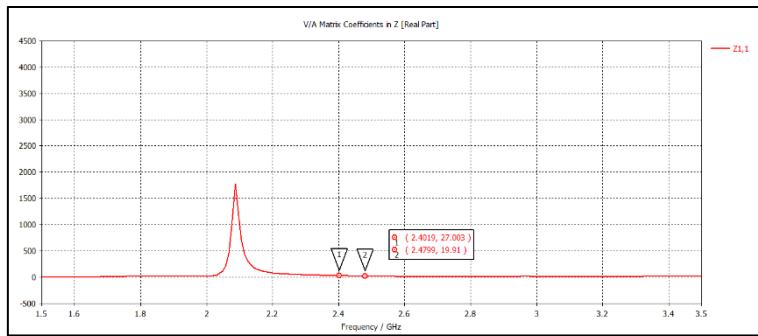


Fig. 39. Parte real del parámetro Z_{11} para cambios en las propiedades de los materiales

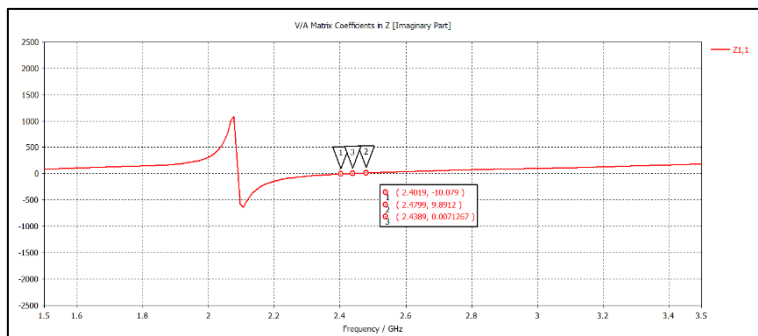


Fig. 40. Parte imaginaria del parámetro Z_{11} para cambios en las propiedades de los materiales

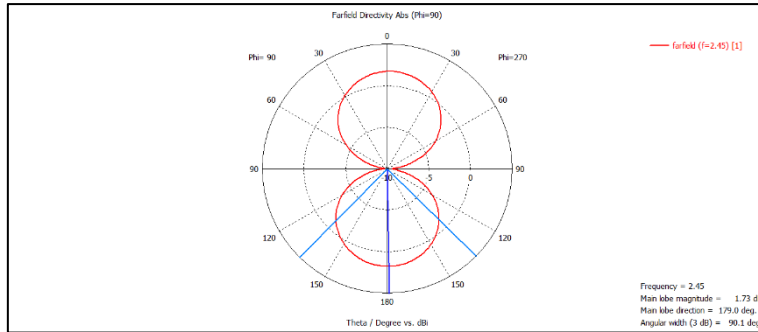


Fig. 41. Diagrama de radiación para cambios en las propiedades de los materiales

En lo referente al diagrama de radiación, la desviación es mínima en comparación a la simulación anterior de aumento del plano de masa en el eje Y.

En cuanto al parámetro S11, se observa como la sintonización ha bajado mínimamente en frecuencia, lo que centra la gráfica en el inicio de la banda de interés y no en el final, como ocurría en el caso anterior de modificación de la longitud del plano de masa en Y. Esto es debido al aumento de ϵ en el dieléctrico, y la altura de este, ya que la variación de altura en el metal no afecta prácticamente en este tipo de casos (podría reflejar más potencia porque cambiaría su resistencia al paso de corriente, pero la variación en este caso es pequeña; si fuera muy grande sí que podría actuar de condensador en donde las corrientes circularían desde arriba hacia abajo y afectaría de forma notable). A pesar de ello, el cambio es mínimo, se sigue teniendo el mismo ancho de banda desplazado ligeramente y la banda de trabajo sigue estando por debajo de -6 dB.

Cabe destacar que, a partir de esta simulación, se ha realizado otra similar, pero con un lateral extendido de material dieléctrico, para equiparar a la zona de los conectores del dispositivo origen. Al no cambiar prácticamente el resultado de la medida (en la banda de interés, 2.4 GHz; en 7 GHz cambia en amplitud), no se considera relevante.

Estructura multicapa

La siguiente es una simulación de la misma antena base, con plano de masa semejante al *dongle* de Texas Instruments. En esta simulación se parte de las características de los materiales del caso anterior (modificación sobre el primer caso). Además, se ha añadido la estructura multicapa del propio *dongle* y el trozo de dieléctrico sobrante.

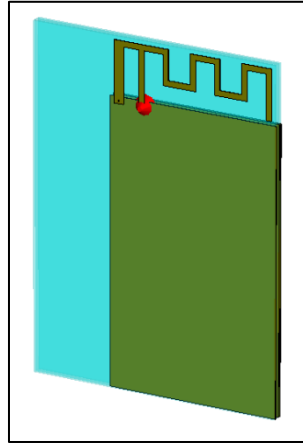


Fig. 42. Antena simple con dieléctrico extendido

Seguidamente se muestran los resultados habituales en las anteriores simulaciones, estableciendo una comparativa entre una estructura monocapa (placa de circuito impreso de 2 capas) y otra multicapa (placa de circuito impreso de 4 capas):

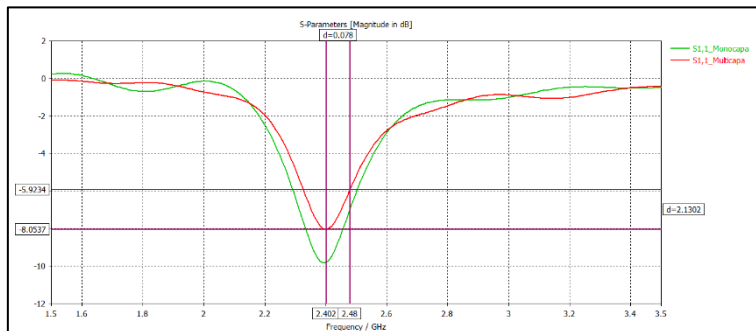


Fig. 43. Parámetro S11 de la antena simple para estructura monocapa y multicapa

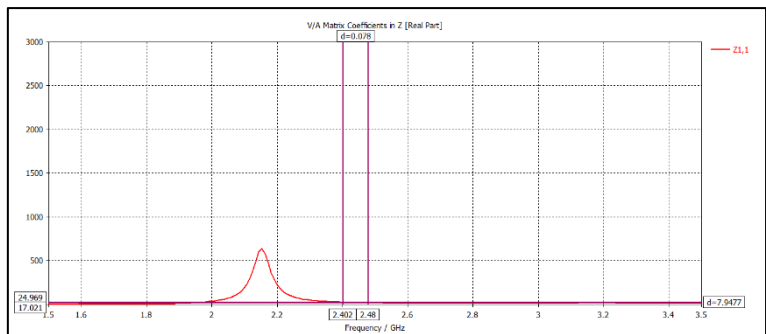


Fig. 44. Parte real del parámetro Z11 para estructura multicapa

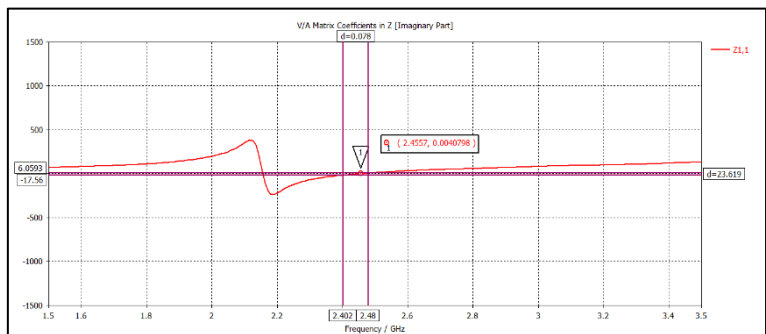


Fig. 45. Parte imaginaria del parámetro Z11 para estructura multicapa

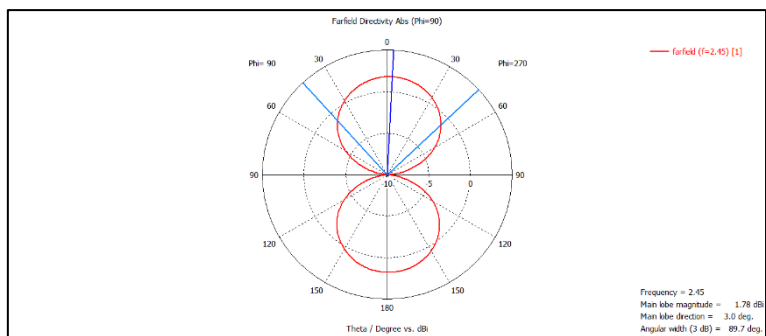


Fig. 46. Diagrama de radiación para estructura multicapa

La estructura multicapa no modifica en gran medida las prestaciones del diseño monocapa, aunque sí que es cierto que refleja más potencia en toda la banda de interés, lo que hace que el último canal de Bluetooth usado (2.402-2.42-2.48 GHz) esté por encima de -6 dB, lo que ya comienza a ser relevante. Esto puede ser debido a las interferencias que provocan los planos intermedios (simulados sin conexión, al aire, mientras que en la

realidad contienen pistas e islas conectadas a masa), que rompen ligeramente la simetría que se tenía en la estructura monocapa entre el brazo hábil del dipolo (IFA) y la imagen de este (plano en *bottom*). Por lo demás, no se ve afectado el diagrama de radiación ni la sintonización base de la antenna.

Longitud de la antenna variable

Por último, se realiza una simulación del elemento anterior, parametrizando la longitud del último brazo del meandro (L_1), cuyo valor original es 3.94 milímetros.

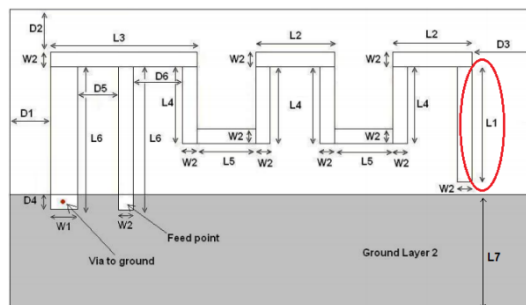


Fig. 47. Antena base con parámetro a modificar

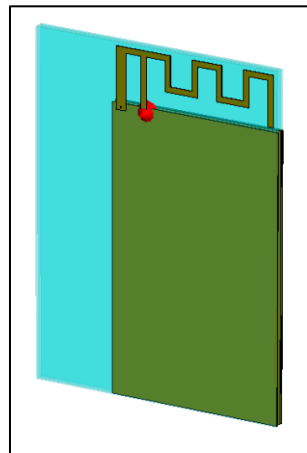


Fig. 48. Diseño multicapa a simular parametrizando L_1

A continuación, se representan los resultados mostrados en simulaciones anteriores de la simulación paramétrica de L1, que crece desde 1.5 a 3.94 milímetros:

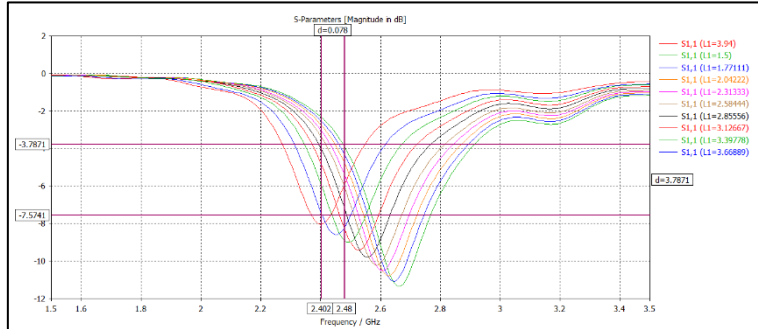


Fig. 49. Parámetro S11 de la simulación paramétrica de L1

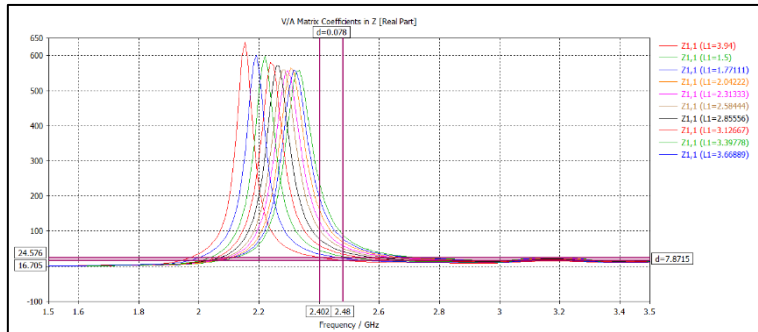


Fig. 50. Parte real del parámetro Z11 para la simulación paramétrica de L1

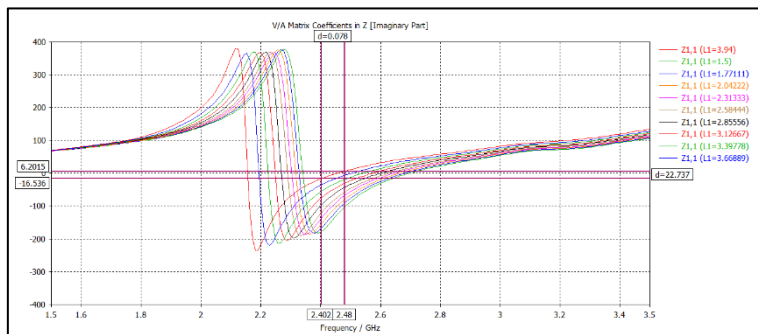


Fig. 51. Parte imaginaria del parámetro Z11 para la simulación paramétrica de L1

Los cruces por cero de la resonancia y antirresonancia, y parámetro S11, se van desplazando hacia la derecha a medida que se va acortando el brazo de la antena, es decir, se va acortando la longitud de la antena, por lo que sube la frecuencia.

Considerando que para $L1 = 3.94$ milímetros (medida original) se está trabajando en una zona de resonancia de impedancia imaginaria $[-16.536j \Omega, 6.2015j \Omega]$, impedancia real $[16.7 \Omega, 24.57 \Omega]$, lo que aparentemente resulta aceptable, pero con un S11 en el que la parte final de la banda de interés se sitúa por encima de -6 dB. Por lo tanto, sin desviarse mucho de las prestaciones que se obtienen con 3.94 mm, se pretende desplazar ligeramente la respuesta S11 hacia la derecha para que la potencia reflejada a 2.48 GHz sea menor, como, por ejemplo, reduciendo el brazo a 3.66889 milímetros. De esta forma se conseguirían mejores prestaciones, pero todo depende de la morfología del plano de masa en mayor medida, así que este ajuste se considera como un recurso secundario para afinar las características de la antena.

3.3.2. Caracterización

Tras el análisis del apartado anterior, se identifican los puntos de mejora del diseño de la antena del emisor de Mysphera con el objetivo principal de sintonizar de manera óptima la antena y que por lo tanto la eficiencia de radiación aumente sin modificar sustancialmente el diagrama de radiación.

En este apartado se realizan simulaciones adaptadas al caso específico y no únicamente al tipo de antena como en la sección anterior, aunque una vez optimizada esta, se caracterizan otros elementos inherentes al entorno de un producto electrónico de consumo como son la carcasa que recubre el dispositivo y la superficie próxima donde se utilizará.

Primera aproximación al factor de forma del Tag de Mysphera

La primera y siguientes simulaciones se centran en adaptar lo aprendido en el análisis previo a la forma del plano de masa del Tag de MYSPHERA. Esta silueta viene marcada por los requisitos mecánicos del producto, ya que

existe una carcasa que contiene al dispositivo y esta requiere de ciertas características para poder anclarse, cerrarse y ubicar la placa de forma estable; también se considera en las siguientes aproximaciones el uso de una batería de botón, lo que condiciona este factor de forma.

En este primer caso, únicamente se considera el plano de masa por la parte trasera, que es el requerido en cuestión para poder implementar el otro 'polo' de la antena. Además, también se ha ajustado la longitud del último tramo del meandro de la antena, la estructura multicapa y las propiedades de los materiales tal y como se ha ido viendo de manera incremental en anteriores secciones.

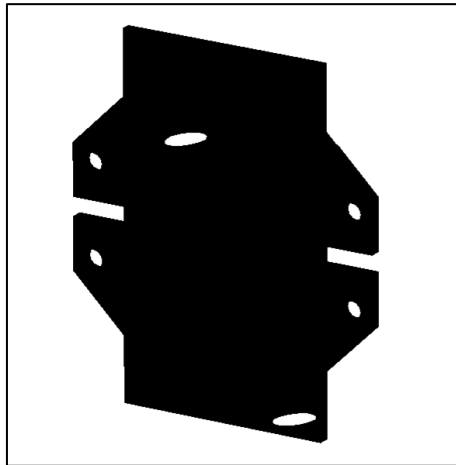


Fig. 52. Primera aproximación al factor de forma del Tag de MYSPHERA

Los resultados tras la simulación se pueden observar a continuación:

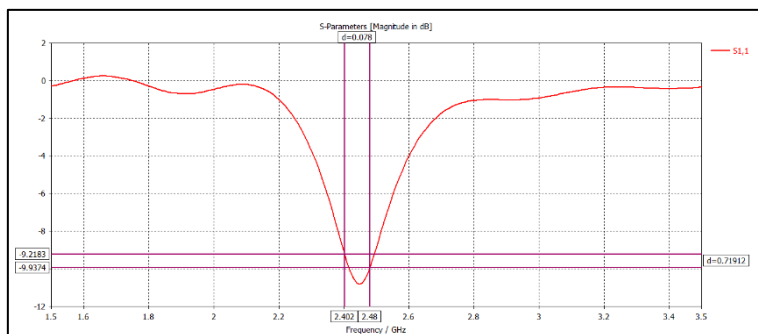


Fig. 53. Parámetro S11 de la primera aproximación al factor de forma del Tag Mysphera

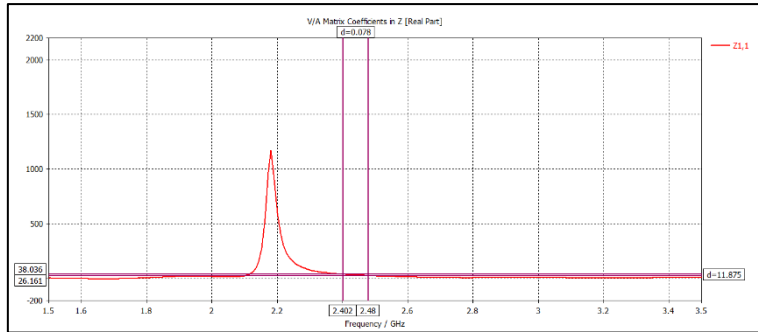


Fig. 54. Parámetro Z11 (Real) de la primera aproximación al factor de forma del Tag Mysphera

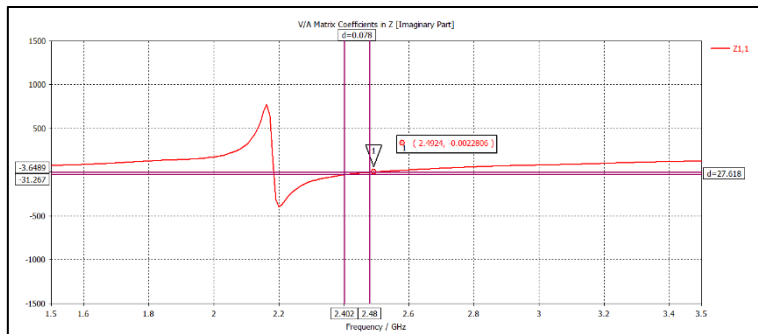


Fig. 55. Parámetro Z11 (Imaginario) de la primera aproximación al factor de forma del Tag Mysphera

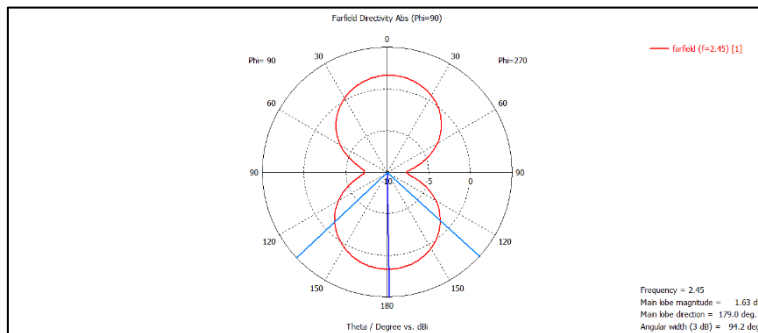


Fig. 56. Diagrama de radiación de la primera aproximación al factor de forma del Tag Mysphera

Por una parte, partiendo de la caracterización de cada elemento en las simulaciones generales, se puede afirmar que al modificar el plano de masa se ven pronunciados o suavizados los nulos del diagrama de radiación. En este caso, se ha cambiado el plano de masa rectangular del *dongle* USB de referencia por un polígono, que viene marcado por los requisitos mecánicos

y funcionales del producto. Esto hace que se suavicen los nulos del diagrama de radiación, los cuales pasan de -10 dB a -7.5 dB.

El ancho de haz se mantiene dentro del rango característico de la antena, independientemente de la morfología de los demás componentes, el cual se sitúa alrededor de 90°.

Por otra parte, al realizar el contorno del plano de masa como el del Tag de MYSPHERA, la antena se sintoniza de forma más precisa en la banda de interés, teniendo un ancho de banda suficiente por debajo de -6 dB, exactamente entre -9 dB y -10 dB. Este efecto es completamente accidental y no ha sido diseñado para tal efecto, ya que, al adaptar la forma del Tag a los requerimientos necesarios, no se pensó en la afectación a la radiación.

Segunda aproximación a la silueta del Tag de MYSPHERA

En la siguiente simulación se incluye plano de masa por ambas caras y se conectan mediante un array de vías periódico (técnica de *via stitching*). Cabe destacar que la longitud entre vías es importante para que no se propaguen corrientes por el plano de masa y disminuya la eficiencia de radiación; esta longitud suele recomendarse menor o igual a $\lambda/10$ (una décima parte de la longitud de onda).

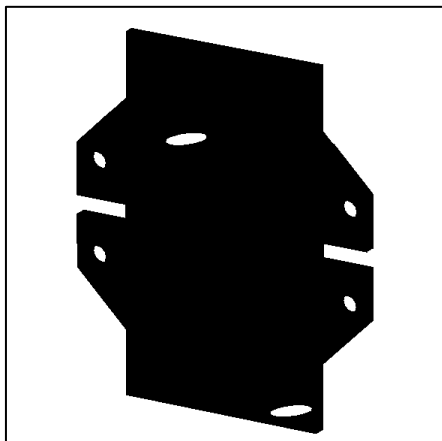


Fig. 57. Segunda aproximación al factor de forma del Tag de MYSPHERA

A continuación, se observan los resultados de los parámetros más relevantes, ya que la duplicidad del plano de masa varía mínimamente estos:

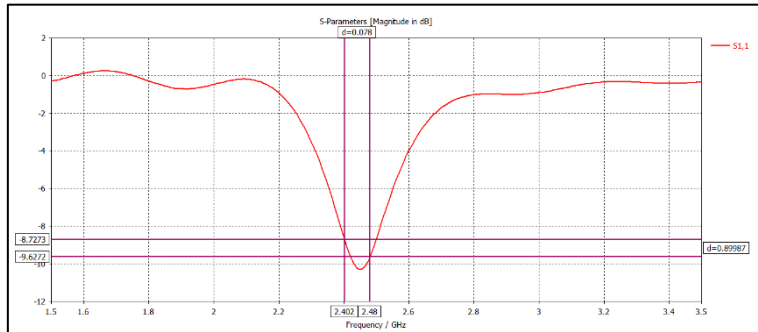


Fig. 58. Parámetro S11 de la segunda aproximación al factor de forma del Tag Mysphera

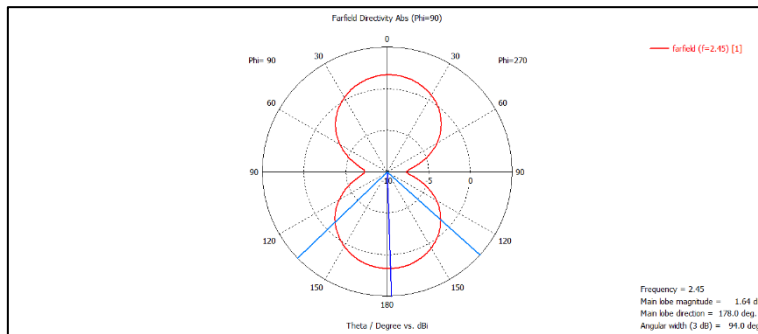


Fig. 59. Diagrama de radiación de la segunda aproximación al factor de forma del Tag Mysphera

Esta modificación varía mínimamente las características de la antena pese a tener un plano de masa paralelo, con el mismo contorno aproximadamente y conectado mediante un array de vías periódico. Esto se debe a que no es un plano el doble de largo, sino que, al estar conectado con vías, se trata como un sólo plano conductor más grueso, es decir, el camino de la corriente pasa a la vez por el plano anterior y por el posterior gracias a las vías, así que la corriente recorre el mismo camino y no el doble.

Terminal negativo de la batería

Tal y como se menciona en la introducción a este subapartado, se caracterizan otros elementos que acompañan normalmente a un producto electrónico de consumo. En este caso concreto se añade la parte del

terminal negativo de la pila que alimenta al dispositivo, que influirá en la longitud y características del plano de masa por el simple hecho de estar cortocircuitados mediante unos espadines de soldadura (es la masa del circuito).

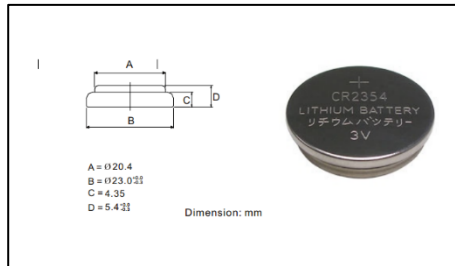


Fig. 60. Dimensiones y ejemplo de una pila de botón CR2354

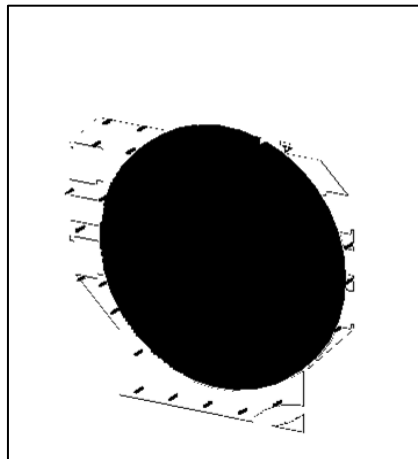


Fig. 61. Modelo de Tag Mysphera con el terminal negativo del batería incorporado

En esta ocasión los resultados sí varían ligeramente, pudiendo afectar a las características de radiación:

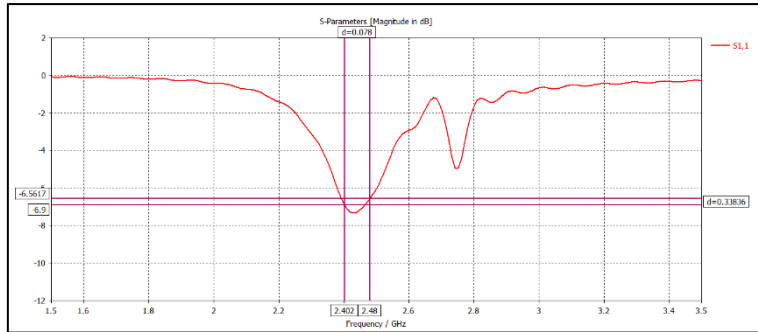


Fig. 62. Parámetro S_{11} de la segunda aproximación del Tag con terminal negativo de la batería

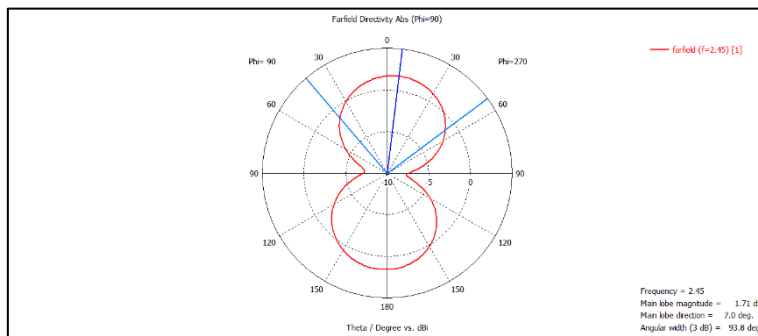


Fig. 63. Diagrama de radiación de la segunda aproximación del Tag con terminal negativo de la batería

Claramente, la presencia de la batería de botón afecta en la banda de funcionamiento de la antena, que sigue estando por debajo de -6 dB, pero más cerca del límite, es decir, la antena refleja mayor potencia (aun así, el pico de menor reflexión se sitúa en el centro de la banda). Además, aparece otra resonancia relevante sobre 2.75 GHz, que anteriormente no existía, pero que no entra dentro del rango de interés y no debe afectar al funcionamiento ni en la aplicación del mismo.

En cuanto al diagrama de radiación, se sigue obteniendo la misma forma e idéntica atenuación en los nulos, pero es destacable la inclinación que sufre, la cual pasa de un máximo desviado dos grados respecto de la vertical en el plano XY, a siete grados.

Observando la intensidad superficial, se puede ver como la antena y la pila están acopladas, ya que se observa una intensidad mayor en la zona de la

pila donde ambas se encuentran próximas. Esta es la razón por la que se refleja mayor potencia, ya que, al añadir una capacidad en un punto de una línea de transmisión, su impedancia cambia y por lo tanto se ve afectada la adaptación, que a su vez se traduce en una variación en la transferencia de la potencia. Véase ilustración siguiente:

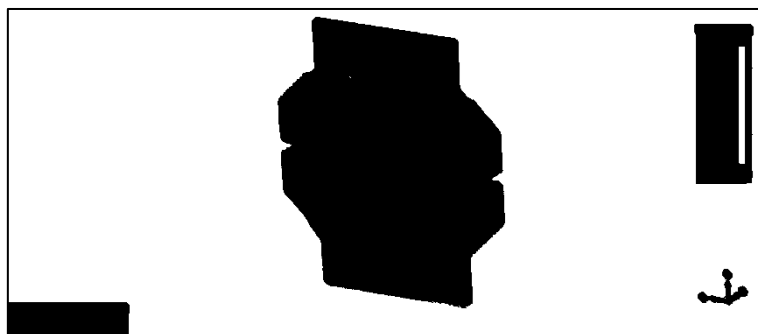


Fig. 64. Corrientes superficiales de la segunda aproximación del Tag con terminal negativo de la batería

Batería completa

El siguiente paso para analizar el comportamiento de la batería es añadir el terminal positivo para considerar la pila completa, que no influirá en la longitud y características del plano de masa ya que es un elemento metálico asilado que no llega a contactar con el terminal negativo y que su propagación por el circuito es a través de pistas de alimentación de superficie casi despreciable. Aun así, tal y como se observa en los resultados, afecta considerablemente a la radiación.

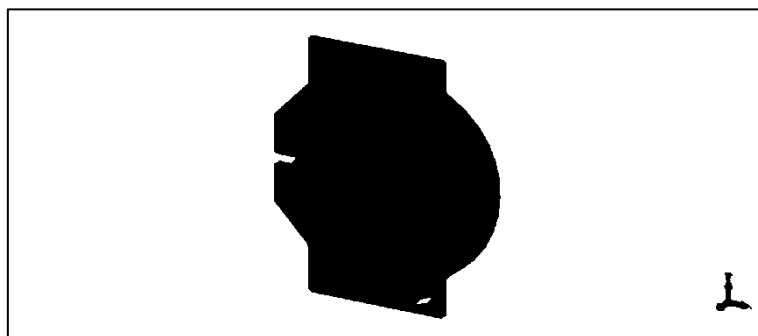


Fig. 65. Modelo de Tag Mysphera con la batería incorporada

A continuación, se puede ver la batería o pila modelada, donde se ha dejado un hueco de aire entre el terminal positivo y negativo que simula la goma que separa ambos polos internamente [29].

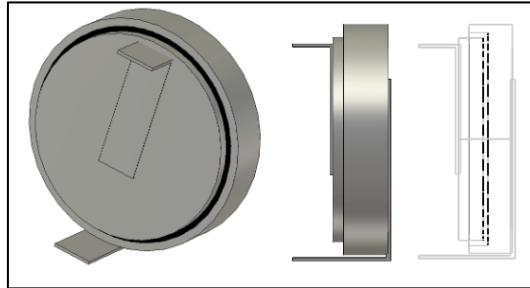


Fig. 66. Batería CR2354 modelada para simulación

A continuación, se muestran resultados comparativos de parámetros S y diagrama de radiación para los siguientes casos: sin batería, con terminal negativo de la batería y con batería completa:

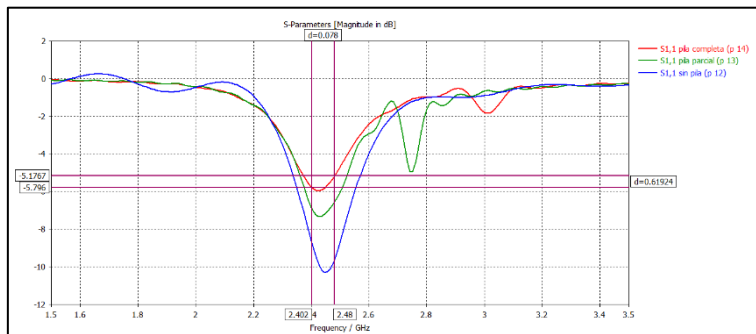


Fig. 67. Parámetro S11 de dispositivo sin pila, con pila parcial y con pila total

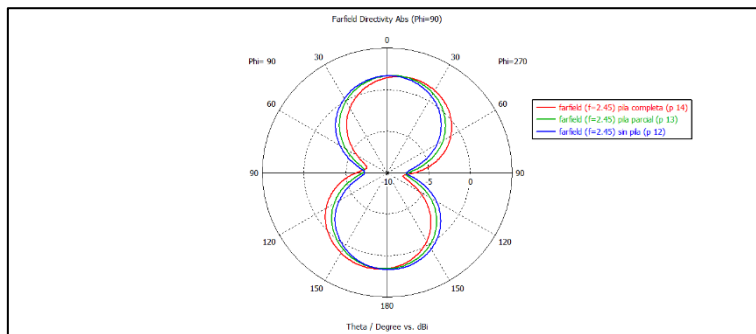


Fig. 68. Diagrama de radiación de dispositivo sin pila, con pila parcial y con pila total

La nueva forma de la pila afecta en la banda de funcionamiento de la antena, ya que ahora se sitúa por encima de -6 dB, por lo que no se cumplen los requerimientos mínimos para un buen funcionamiento. En cuanto a la resonancia extra que aparecía en el apartado anterior, ahora se ha visto desplazada a 3 GHz, que continúa fuera del rango de interés y no debe afectar.

El diagrama de radiación sigue siendo idéntico en forma, pero sufre una inclinación más acentuada que el caso anterior, ya que pasa de siete grados de desviación respecto de la vertical en el plano XY, a quince grados (línea verde frente a línea roja).

La intensidad de superficie se observa en la ilustración siguiente, donde se puede observar como la antena y la pila (en ambos terminales) están acopladas, ya que se observa una intensidad mayor en la zona de la pila donde se encuentra cerca de la antena:

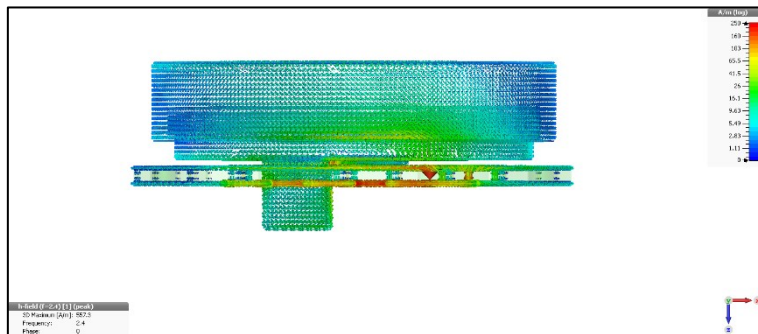


Fig. 69. Corrientes superficiales de la segunda aproximación del Tag con la batería completa

Cabe destacar que este tipo de dispositivos denominados *wearables* suelen alimentarse con este tipo de baterías de botón, y que, dependiendo de la capacidad en mAh requerida, la altura y el diámetro de estas varían afectando así en mayor o menor medida a las propiedades de radiación del producto por solapar en una superficie distinta con los elementos radiantes y por generar una altura constante (mayor o menor) entre la placa de circuito impreso y el siguiente medio: aire, carcasa plástica, cuerpo humano, etcétera.



Fig. 70. Imagen comparativa entre distintos modelos de batería de botón

Carcasa de plástico ABS/PC

En esta simulación se da un paso más para la aproximación al Tag de Mysphera. Una vez caracterizada toda la parte electrónica, se procede a caracterizar los demás elementos que envuelven al producto y pueden afectar en las prestaciones de radiofrecuencia.

Para incorporar la carcasa al software de simulación se parte del archivo con extensión STL proporcionado por el diseñador de la misma. Este archivo se importa a CST MICROWAVE STUDIO y se le añade la propiedad del material del que se compone, que es un polímero -----
-----.

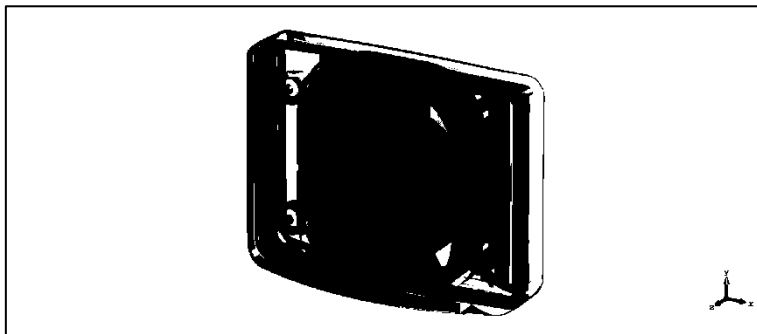


Fig. 71. Modelo de Tag con carcasa plástica incorporada

Véanse los resultados obtenidos tras la incorporación de la carcasa al modelo de simulación:

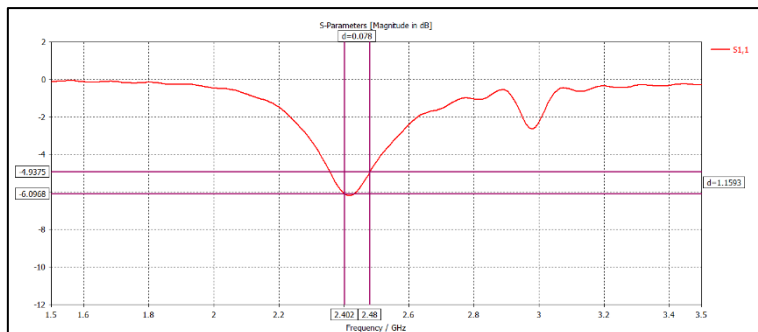


Fig. 72. Parámetro S11 para aproximación de Tag con carcasa de plástico

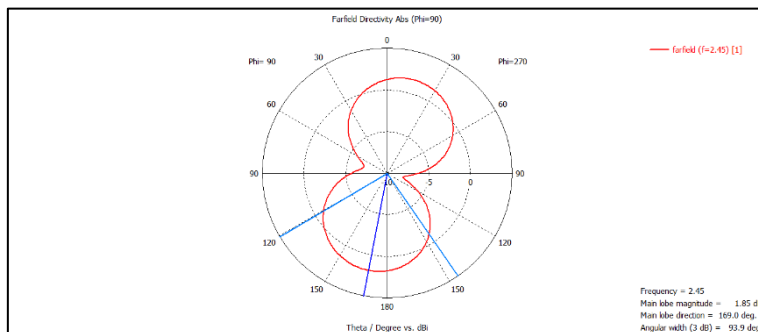


Fig. 73. Diagrama de radiación para aproximación de Tag con carcasa de plástico

En líneas generales, se observan variaciones minúsculas respecto al modelo sin carcasa, lo que indica, como era de esperar, que la carcasa plástica no afecta prácticamente a las prestaciones de la antena [30].

Aun así, este caso puede darse para una carcasa en concreto, con un gap interno y grosor determinados, por lo tanto, se procede a simular una carcasa rectangular del mismo material, parametrizada tanto en grosor como en dimensiones de cada eje.

Para realizar las simulaciones, se modela una carcasa que queda aproximada en dimensiones internas a la carcasa original del Tag de Mysphera:

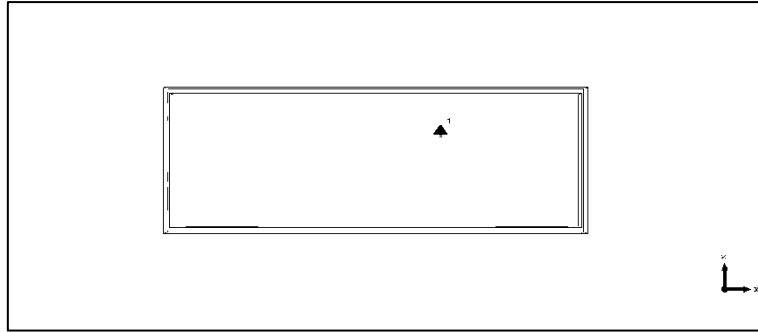


Fig. 74. Modelo de Tag con carcasa simple rectangular para buscar afectación de prestaciones a causa del plástico

Para poder observar que dimensión de la carcasa afecta más, se realizan simulaciones aumentando el grosor hacia dentro y hacia fuera para las dimensiones fijas que se ven en la ilustración anterior. Seguidamente, se varían las dimensiones en todos los ejes, y también de forma individual, para un grosor fijo de 2 milímetros (semejante a la carcasa original).

Parametrizando el grosor hacia el interior de la carcasa mostrada anteriormente, se obtiene que, para más grosor, es decir, menos distancia entre la carcasa y la antena, menor frecuencia de resonancia. Esto tiene su porqué, ya que la antena se encuentra otro material distinto al aire, cada vez más próximo, y con una constante dieléctrica superior, lo que siempre disminuirá la frecuencia de funcionamiento.

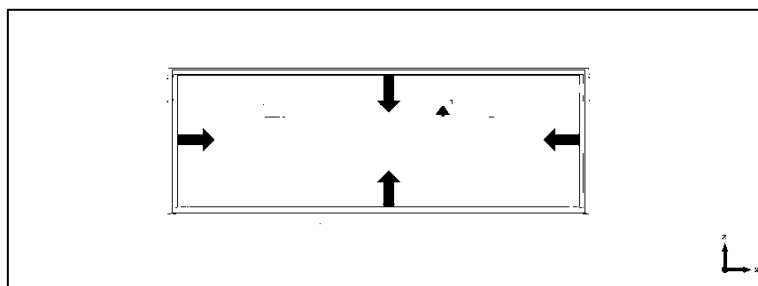


Fig. 75. Sentido de disminución del grosor de la carcasa de plástico

Principalmente interesa caracterizar la capacidad que tiene la carcasa simple al aumentar su espesor de desintonizar el elemento radiante del emisor, es por ello por lo que se analiza el parámetro S11:

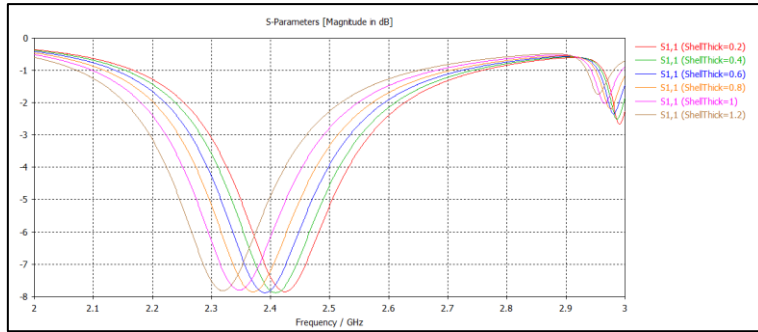


Fig. 76. Parámetro S₁₁ para distintos grosores de carcasa en sentido interior (ShellThick en milímetros)

Por otra parte, se tiene que, para la variación del grosor de la carcasa hacia el exterior, siendo el hueco interno constante, es necesario aumentar en pasos más grandes (0.2 mm anterior, 0.5 mm actual) para poder obtener una respuesta parecida en cuanto a la disminución en frecuencia con el aumento del grosor. Es algo esperado, ya que ahora la primera discontinuidad de medio aire-ABS/PC permanece constante, pero se alarga la segunda discontinuidad ABS/PC-aire, que está más alejada de la antena.

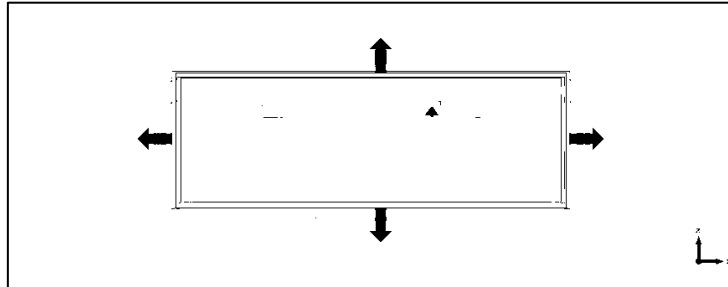


Fig. 77. Sentido de aumento del grosor de la carcasa de plástico

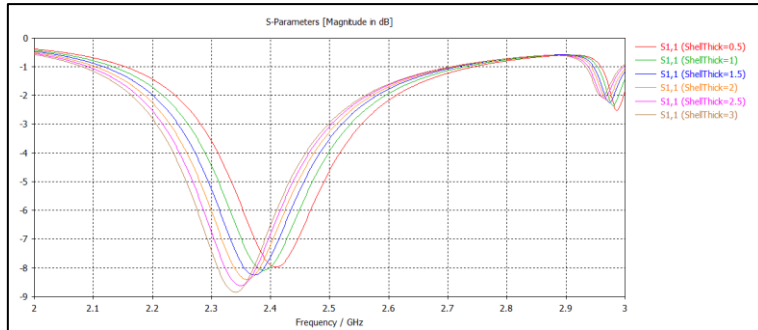


Fig. 78. Parámetro S11 para distintos grosores de carcasa en sentido exterior (ShellThick en milímetros)

Por último, el grosor permanece constante, mientras que las dimensiones de la propia carcasa varían.

En la primera gráfica se puede observar la variación de todos los ejes simultáneamente con el parámetro '*DimCaseOffset*', que indica los milímetros que varía la carcasa hacia el exterior. De donde se deduce que cuanto más grande es el hueco interno, es decir, más alejado está el cambio de medio, mayor es la frecuencia central de trabajo; cabe destacar una zona a partir de *DimCaseOffset* = 2 mm, donde la variación en frecuencia comienza a ser muy pequeña con las dimensiones de la carcasa, por lo que se puede afirmar que existe un umbral de distancia en el que la frecuencia central de la antena depende mínimamente de su envoltura.

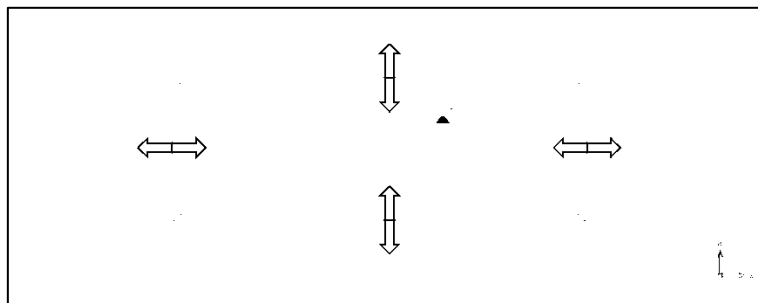


Fig. 79. Sentido de aumento del tamaño de la carcasa de plástico

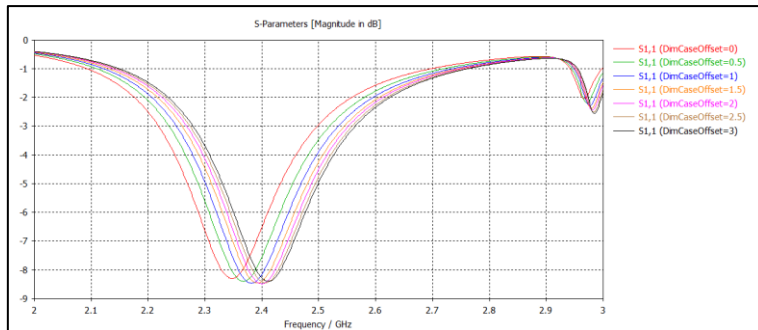


Fig. 80. Parámetro S11 para distintos tamaños de carcasa en sentido

En las siguientes tres gráficas, se observa la variación en frecuencia con un aumento de la distancia en cada uno de los ejes X, Y, Z (en este orden), para una distancia en los ejes que se mantienen fijos de 1.5 milímetros.

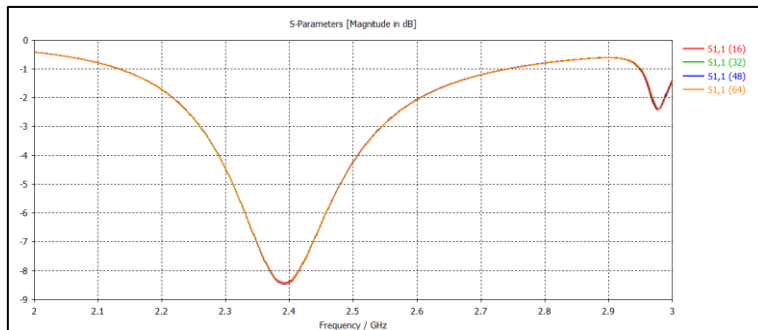


Fig. 81. Parámetro S11 para distintos tamaños de carcasa en el eje X

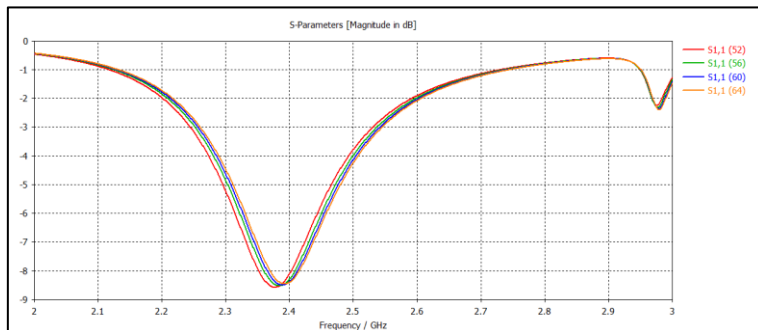


Fig. 82. Parámetro S11 para distintos tamaños de carcasa en el eje Y

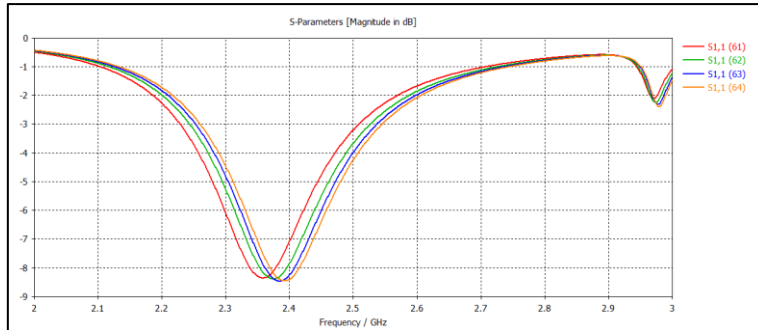


Fig. 83. Parámetro S11 para distintos tamaños de carcasa en el eje Z

Observando cada gráfica por separado, se puede afirmar que la variación en el eje X de la carcasa no afecta a la sintonización de la antena (relacionado con la ubicación de los nulos de radiación), mientras que en el eje Y y eje Z (por proximidad a la antena y paralelismo de planos) afectan en menor y mayor medida respectivamente las características de su contenedor.

Efecto del cuerpo humano

En la siguiente simulación se pretende analizar el efecto del cuerpo humano en el Tag de MYSPHERA. Para ello se ha modelado un brazo usando los materiales estándar de CST MICROWAVE STUDIO [31] [32] y se ha colocado el dispositivo en un punto del propio brazo en el que esté centrado y tenga tejido influyente por ambos lados del eje Y [33]. Véase la ilustración siguiente.

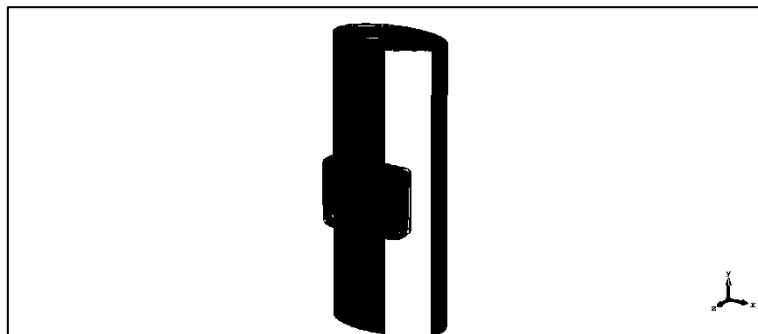


Fig. 84. Tag Mysphera con carcasa y modelo de brazo humano

Para modelar el brazo, se ha tomado como referencia el artículo de investigación [34] [35] [36] donde se distinguen las diferentes texturas de un brazo humano y sus dimensiones. Además, se ha consultado bibliografía

online para ver exactamente cómo es la estructura real de dicho brazo, tomando como referencia [37] [38] [39]. En la siguiente imagen se puede ver una sección del brazo cuyos materiales de la librería Bio Tissue del software de simulación son: Piel/Skin (Marrón), Grasa/Fat (Amarillo), Músculo/Muscle (Rosa) y Hueso/Bone (Blanco).

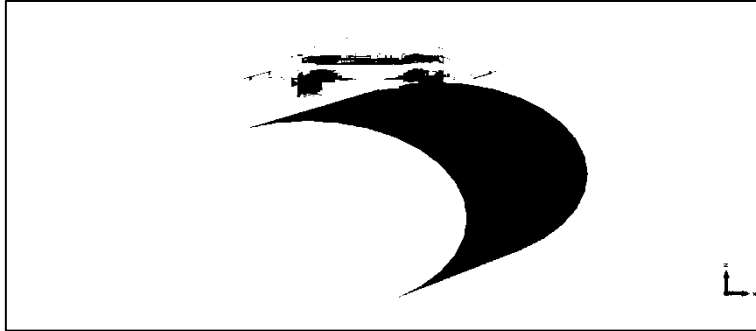


Fig. 85. Sección del modelo de brazo humano

Véanse las siguientes gráficas para analizar los resultados de parámetros S, Z y diagrama de radiación para electrónica, electrónica con carcasa y electrónica con carcasa y brazo:

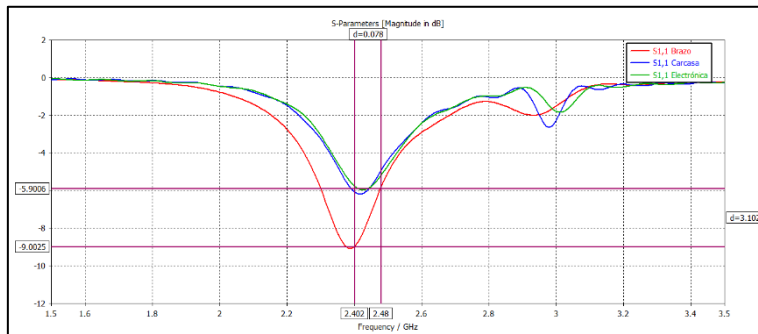


Fig. 86. Parámetro S11 comparativa de electrónica con brazo y carcasa

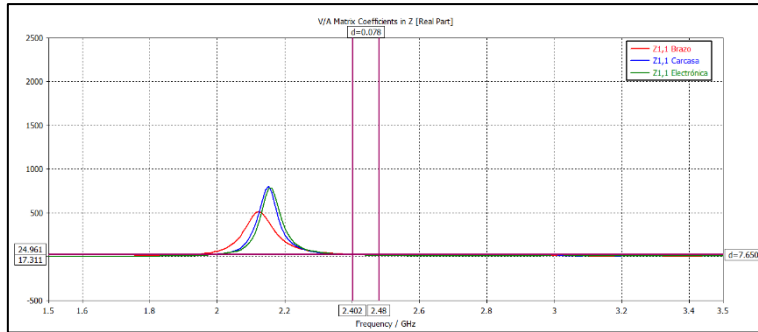


Fig. 87. Parámetro Z11 (Real) de comparativa de electrónica con brazo y carcasa

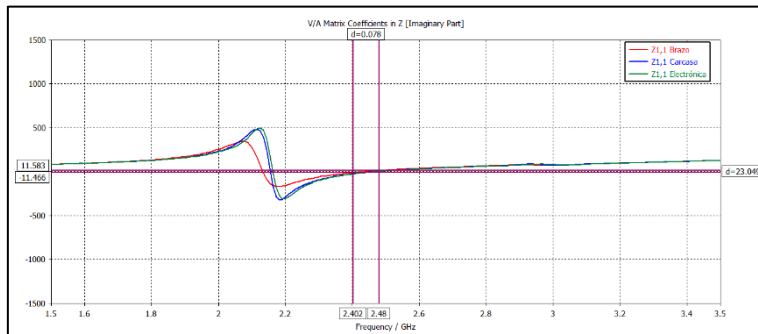


Fig. 88. Parámetro Z11 (Imaginaria) de comparativa de electrónica con brazo y carcasa

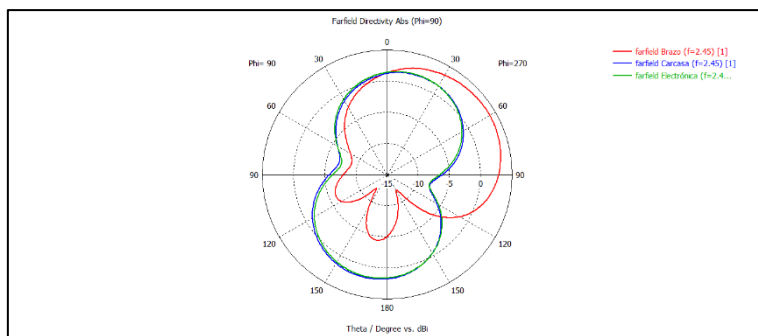


Fig. 89. Diagrama de radiación de comparativa de electrónica con brazo y carcasa

En las gráficas se observa como la inclusión del brazo produce un efecto relevante en las prestaciones del dispositivo, ya que desplaza la frecuencia de resonancia, varía la potencia reflejada y además modifica en gran medida el diagrama de radiación.

Como era de esperar, dichos efectos se producen al cambiar la constante dieléctrica del material contiguo a la antena, que como es superior a la del aire, implica una disminución en frecuencia.

Por otra parte, el diagrama sufre el cambio más relevante respecto a todas las anteriores simulaciones ya que pasa de tener una cobertura de 360° a 180° aproximadamente. Como se observa en la representación anterior, el cuerpo humano bloquea la radiación y redirecciona o reparte la potencia en los 180°, es por esto que se observa el máximo del lóbulo principal en torno a 5 dB mientras que se venía observando alrededor de 0 dB (relación entre el diagrama una antena isotrópica y la antena real).

3.3.3. Medidas experimentales

Se han realizado unas pruebas experimentales para corroborar que las simulaciones anteriores no difieren mucho de la realidad, extremando las precauciones oportunas en los métodos de medida ya que se considera, que, en este rango frecuencial, hay componentes implicados en las medidas que pueden distorsionar el resultado.

Son unas pruebas simples donde se mide el parámetro S11 únicamente mediante un analizador de redes inyectando una señal de 0 dBm de potencia referenciados a una impedancia de 50 Ω . Esto ya permite ver si las simulaciones son coherentes, sin necesidad de medir el diagrama de radiación en una cámara anecoica.

Se plantean varias medidas analizando la variación de algunos parámetros como la distancia de la antena al cuerpo, la constante dieléctrica del material inferior y la variación de distintos cuerpos y posiciones sobre el mismo. Algunas de ellas implican el montaje de la pila del dispositivo y la carcasa y otras no; se describe detalladamente en cada gráfica.

Las siguientes medidas han sido realizadas en laboratorio con un analizador de redes Keysight N5227A y cable GORE PHASEFLEX, además se ha añadido un latiguillo de transición entre SMA y HIROSE UFL para poder realizar la medida en el punto de alimentación de la antena, en donde se disponía de

una huella para soldar dicho conector UFL. Véase la siguiente ilustración en la que aparece el dispositivo junto con el tramo de transición [40].

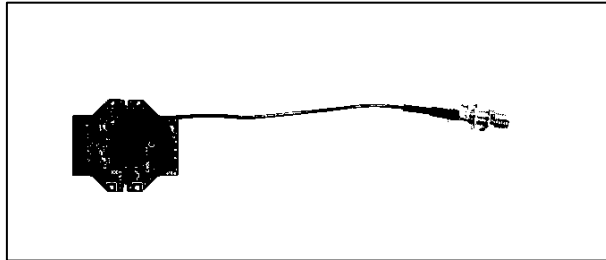


Fig. 90. Tag emisor Mysphera con transición UFL-SMA para medidas de S11 en laboratorio

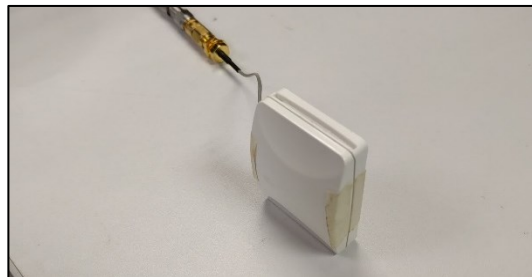


Fig. 91. Tag emisor Mysphera con carcasa y transición UFL-SMA para medidas de S11

Diferencia entre materiales contiguos

Como prueba inicial, se ha obtenido la respuesta S11 de la antena con distintos materiales junto a la parte trasera de la misma, cubriendo toda su silueta y dejando en menor espacio de aire posible entre ambos, lo que implica la inexistencia de la pila. En la siguiente gráfica se pueden observar los resultados, donde se sitúa al dispositivo en el aire (suspensión con espuma), dentro de la carcasa, apoyado en el brazo con/sin carcasa, y apoyado en materiales como madera o teflón [41] [42]:

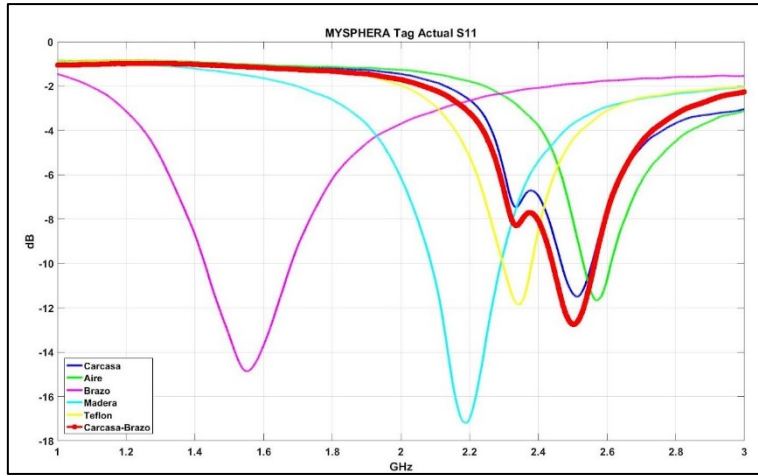


Fig. 92. Parámetro S11 para diferentes materiales contiguos a la antena del Tag

Los resultados obtenidos son coherentes, ya que a medida que aumenta la constante dieléctrica del material contiguo a la antena, la frecuencia de resonancia de esta disminuye.

Distancia de separación entre antena y brazo

Con la intención de conocer la variación de las prestaciones de la antena con la altura de la batería o hueco interno inferior de la carcasa, se han realizado pruebas con la antena dentro de la carcasa y sin pila, añadiendo trozos de espuma de 1.1 mm que van suplementando la misma dentro de la carcasa y alejándola del cuerpo. Como referencia se incluye el resultado de la medida en el aire:

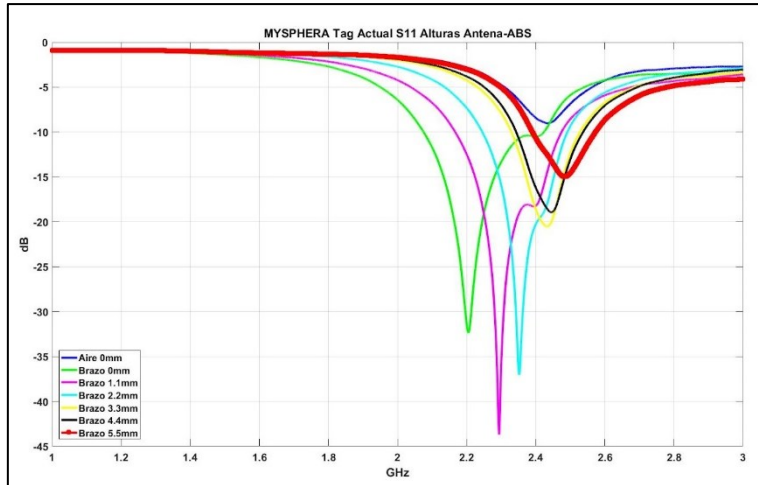


Fig. 93. Parámetro S11 para Tag Mysphera con carcasa y distintas distancias al brazo humano

Como era de esperar, el aumento de distancia entre el brazo y la antena, añade espuma o aire, los cuales tienen una constante dieléctrica más baja que el cuerpo (sumando siempre el grosor de la carcasa, fabricada con plástico ABS), y por lo tanto aumenta en frecuencia en cada iteración.

Diferentes brazos y posiciones

Como prueba final se simula una situación real en el que el usuario final lleva el dispositivo en el brazo, tanto en la posición correcta (posición habitual de un reloj) como girado (contactando con la parte inferior de la muñeca).

La configuración de montaje en este apartado es la más realista posible, con la pila puesta, la carcasa cerrada y colocada en la muñeca con una correa.

En la siguiente gráfica se tiene la respuesta S11 de cada caso junto con algunas curvas de referencia de casos de prueba anteriores (separación de aire de 5.5 mm y aire total) y dos brazos distintos de dos usuarios (Marc y Bernat):

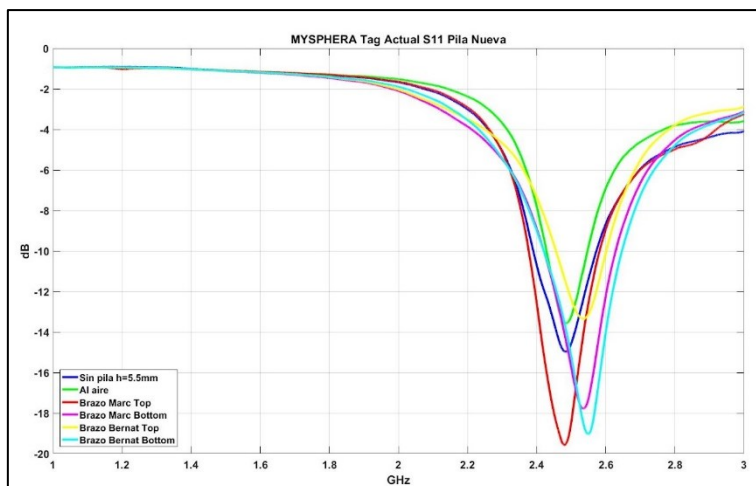


Fig. 94. Parámetro S11 para Tag Mysphera con carcasa para distintos casos y brazos humanos

Se deduce que en todas las situaciones la respuesta es parecida, por lo que no se observa ningún efecto negativo relevante. Aun así, existen desviaciones que entran dentro del rango de variación contemplado para este tipo de montajes y de antenas, como se indica y justifica al inicio de este apartado de medidas experimentales.

Efecto de la fabricación: Comparativa de simulación y dispositivo real

Se ha realizado una comparativa para poder observar si las simulaciones corresponden con el funcionamiento real, ya que, aunque las simulaciones indiquen que se trabaja en una banda de frecuencias correcta, puede que en la práctica la antena esté desintonizada por algún efecto proveniente del tramo no simulado entre el oscilador y el punto de alimentación de la antena. También puede darse una desviación por las impurezas o no uniformidades del dieléctrico FR4 con el que se fabrica el núcleo de las placas de circuito impreso, ya que internamente es un mallado de fibra que contiene resina, y esta puede no distribuirse de manera uniforme. Véase la comparativa a continuación:

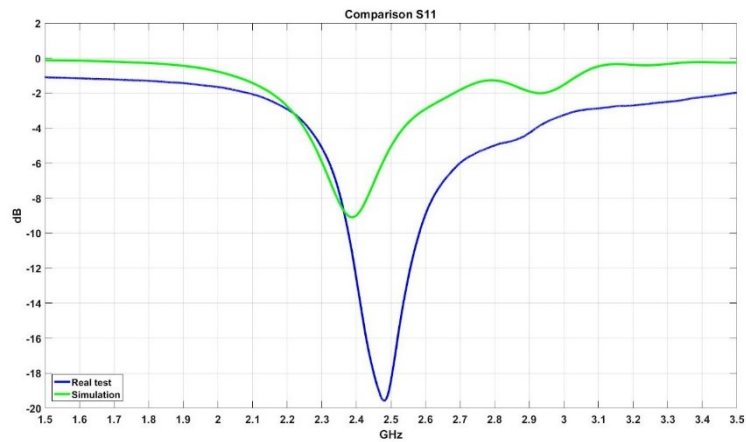


Fig. 95. Parámetro S11 del Tag emisor simulado en CST frente a Tag emisor fabricado y medido en laboratorio

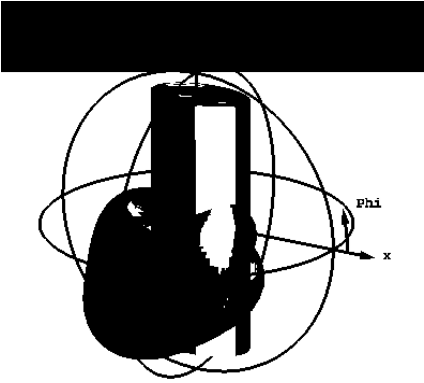
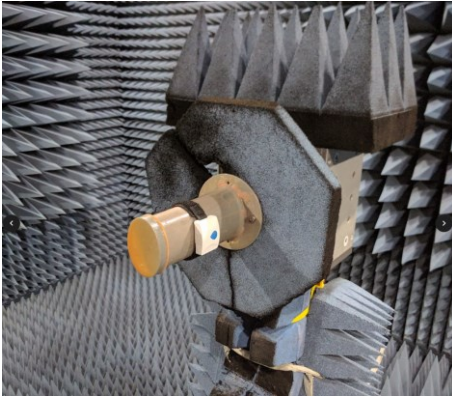
La comparativa se realiza entre la simulación final con el cuerpo humano incluido y una de las pruebas prácticas mostradas en el caso anterior [40] [43].

Las conclusiones que se extraen de la gráfica no son muy relevantes, ya que considerando la variación provocada por el método de medida experimental, las diferencias que existen entre un brazo real y el modelado, y las variaciones que se registran entre el empleo de distintos tipos de mallado y tipo de simulación (tiempo y frecuencia), se puede afirmar que son unos resultados semejantes pero no lo suficientemente parecidos como para asegurar que se ha producido una reducción de las inexactitudes en los procesos y que la simulación y el caso real están aproximadas al máximo.

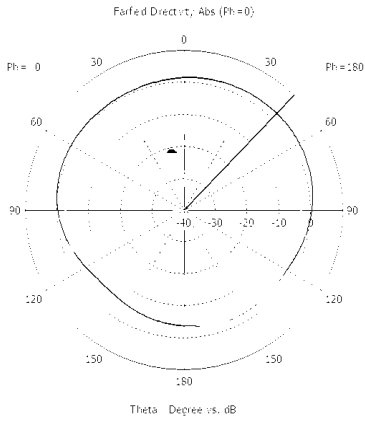
Como posibles refinamientos de la comparativa, se podría modelar en el simulador el conector UFL y demás elementos de inyección de la señal en el caso práctico, creando el puerto de alimentación en el inicio de dichos componentes. Estos elementos no han sido modelados porque se considera válida la aproximación obtenida para el objetivo que se tiene, que no es más que conocer el comportamiento y poder rediseñar la antena a partir del modelo actual.

Finalmente, otro de los parámetros relevantes a estudiar en esta comparativa es el diagrama de radiación, que mediante la siguiente tabla se puede comparar entre el caso simulado y el real (fabricado) para el canal de anuncio Bluetooth central de 2.42 GHz. Cabe destacar que en las medidas en cámara anecoica para el caso real se ha aproximado el brazo humano con un *phantom* de dimensiones estándar y líquido interior de constantes dieléctricas y propiedades similares al cuerpo humano [44] [45]:

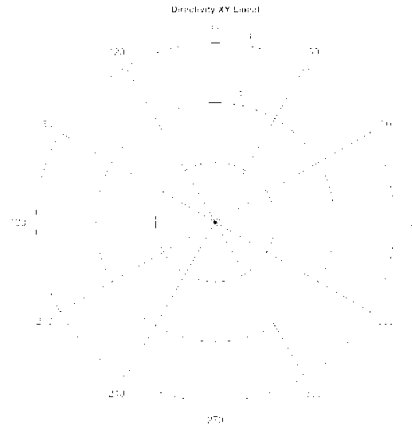
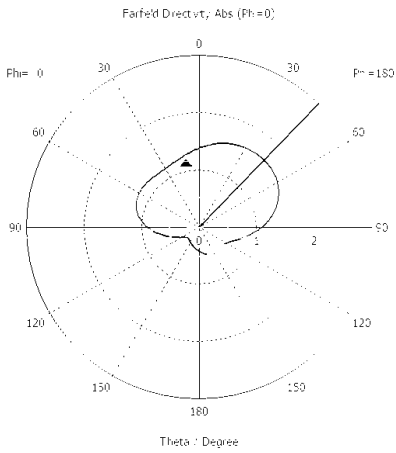
Tabla 4. Comparativa de diagramas de radiación del Tag emisor en simulación y caso real fabricado

SIMULACIÓN	MEDIDA REAL
Vista previa de la simulación o medida en cámara anecoica	
	

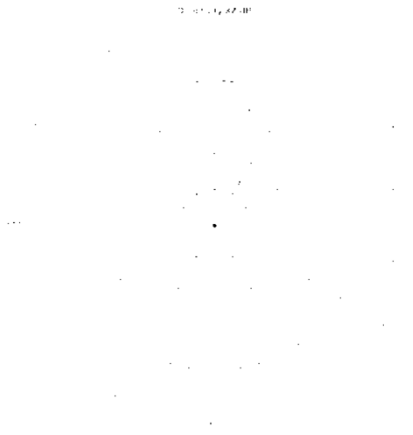
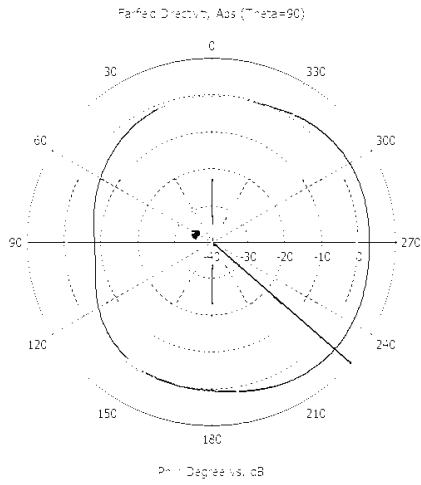
Corte XZ ($\varphi = 0^\circ$) en dB



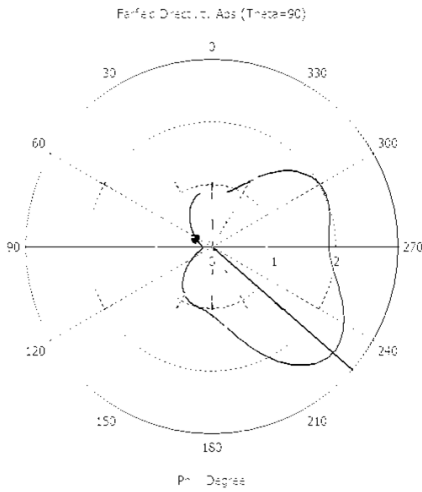
Corte XZ ($\varphi = 0^\circ$) en lineal



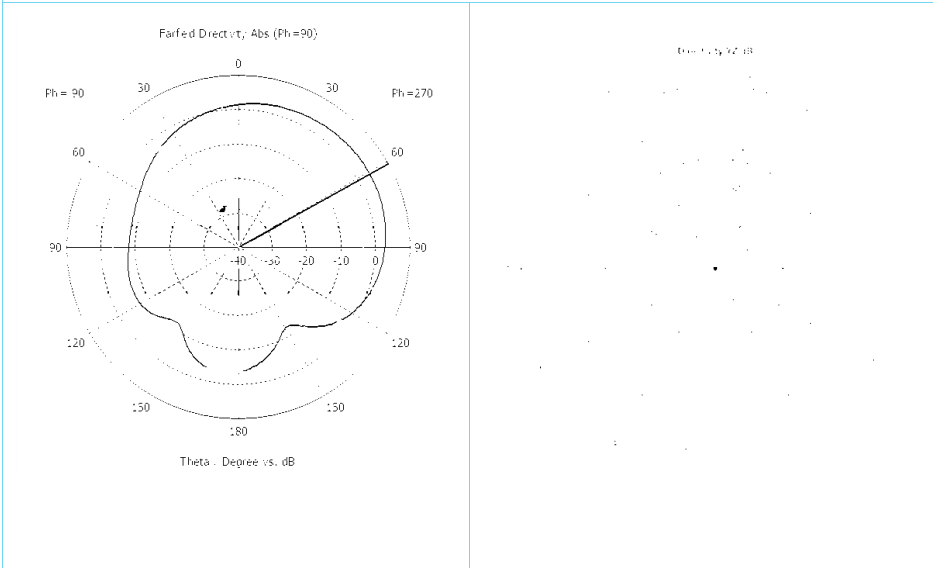
Corte XY ($\theta = 90^\circ$) en dB



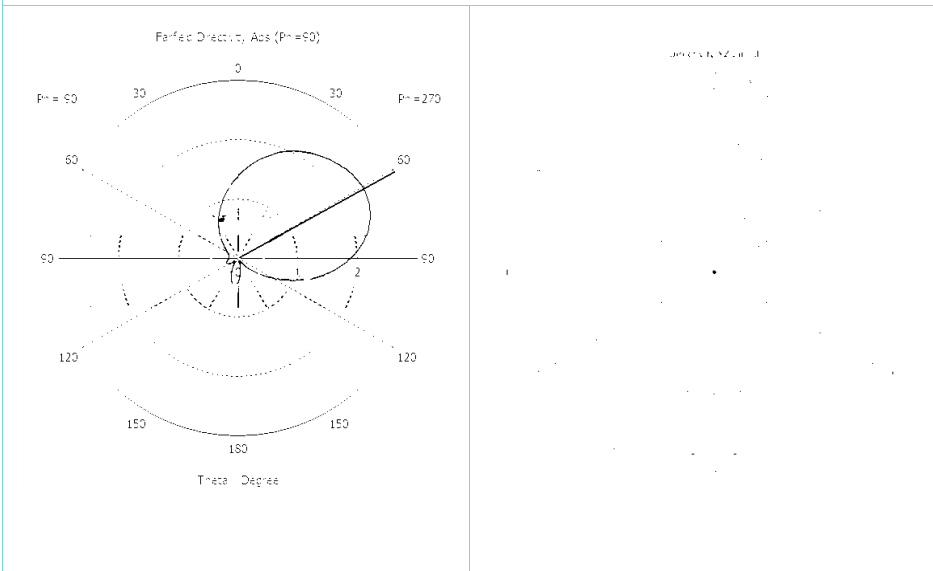
Corte XY ($\theta = 90^\circ$) en lineal



Corte YZ ($\theta = 0^\circ$) en dB



Corte YZ ($\theta = 0^\circ$) en lineal



De la tabla anterior se puede deducir que tras medir el elemento real respecto a su simulación:

- Los nulos de radiación se acentúan más
- Existen muchas más uniformidades en el diagrama de radiación
- La inclinación que provoca el brazo humano no es tan abrupta

Aun así, los resultados son similares en directividad y forma, aunque deja patente que la medida real sobre el dispositivo fabricado puede diferir lo suficiente como para cambiar las prestaciones de radiación del dispositivo para algunos casos de uno específicos.

3.3.4. Implementación

CONFIDENCIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

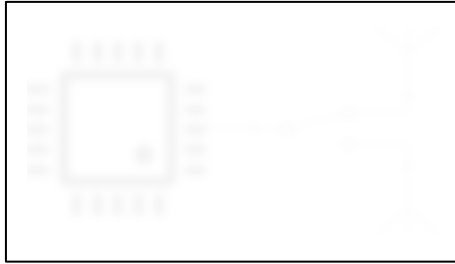


Fig. 96. Esquemático del circuito de radiofrecuencia del Tag emisor

-----impares.

3.4. Resultados



Fig. 97. Electrónica del Tag de doble antena fabricada

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENCIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

4. Elemento receptor: Gateway

4.1. Introducción

El Gateway es el otro dispositivo fundamental en el sistema de localización de la solución de Mysphera junto con el Tag presentado en el capítulo anterior. Este dispositivo es el elemento receptor del RTLS que se encarga de recibir señales Bluetooth procedentes de los elementos emisores y procesarlas para posicionarlos dentro de un área definida.



Fig. 98. Gateway receptor de Mysphera

Este producto puede ser utilizado para la localización de todo tipo de objetos y seres vivos que porten un emisor compatible con la tecnología utilizada.

Tras la publicación del estándar Bluetooth 5.1 y el perfil de *Direction Finding*, este elemento se reafirma como una pieza fundamental en el ámbito RTLS y su precisión, puesto que para implementar la técnica *Angle of Arrival* propuesta, es necesario un rediseño del elemento receptor en cuanto a sus antenas se refiere respecto de otras técnicas utilizadas en el pasado. En otras palabras: La técnica AoA implica un gran cambio en los Gateway receptores, así como en el algoritmo, mientras que un cambio más liviano en los elementos emisores, por lo tanto, en el diseño descrito a continuación recae gran parte de la responsabilidad del aumento de precisión del sistema.

4.2. Estado del arte

Los sistemas de localización en tiempo real, a la par que las técnicas y algoritmos de posicionamiento, y, por ende, los receptores asociados, han sufrido una relevante evolución a lo largo de la realización de esta tesis doctoral; de hecho, en el comienzo de este trabajo, únicamente era pública la especificación Bluetooth 5.1 y no existían soluciones en el mercado que implementaran AoA bajo esta tecnología.

En su momento surgieron varias dudas sobre la eficacia de *Angle of Arrival* en Bluetooth, ya que podía quedar en saco roto y ser un intento de funcionalidad perdido por parte del Bluetooth SIG, como muchos otros, hasta que algunos de los fabricantes que se encontraban en el grupo de trabajo oficial, apostaron por ello y lanzaron sus primeros microcontroladores capaces de implementar esta funcionalidad. Entonces, únicamente quedaba garantizada la implementación física del estándar, es decir, el muestreo de la señal recibida para poder captar información de la fase y la amplitud, pero los resultados eran inestables por falta de experiencia en los algoritmos necesarios y las compensaciones requeridas por las diferencias entre antenas y caminos de conmutación.

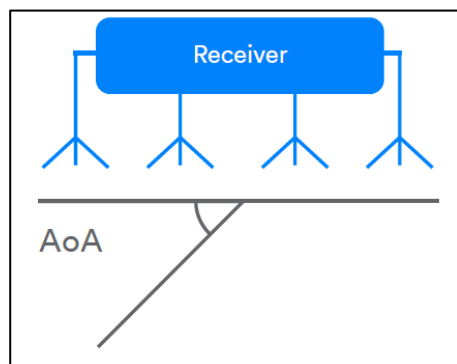


Fig. 99. Diagrama sobre la técnica de AoA [5]

A medida que se ha ido desarrollando esta tesis, han ido apareciendo algunas soluciones en el mercado que decían y dicen implementar AoA en tecnología Bluetooth: algunas lo implementan y otras utilizan antenas directivas para realizar la técnica de *beamforming* y así discernir el ángulo de

llegada de la señal, como si de MIMO en comunicaciones móviles o de un radar monopulso se tratase. Esta última aproximación necesita de un intervalo entre envíos en el emisor muy rápido y de unos recursos en el receptor de alto coste; no está enfocado al bajo consumo ni a la optimización de costes en un sistema RTLS.

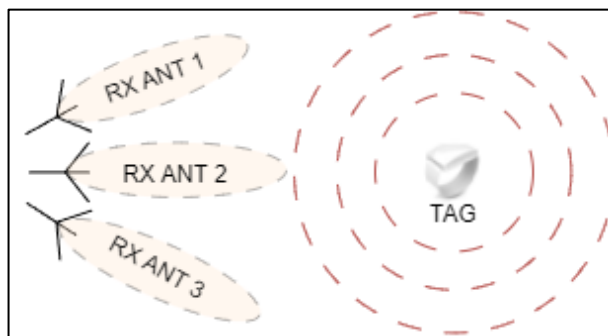


Fig. 100. Ejemplo de técnica de beamforming

Uno de los primeros fabricantes en diseñar su AoA propietario fue Texas Instruments y su publicación fue casi a la par que la del propio estándar Bluetooth. Sacó al mercado un microcontrolador con módulo radio (CC2640R2F [50]) capaz de operar bajo dicha técnica. En este caso, bajo el marco de este trabajo, se probó el resultado de la localización con la placa de evaluación del fabricante y la localización, a grandes rasgos, no era estable ni permitía ofrecer una precisión por debajo del metro de error.

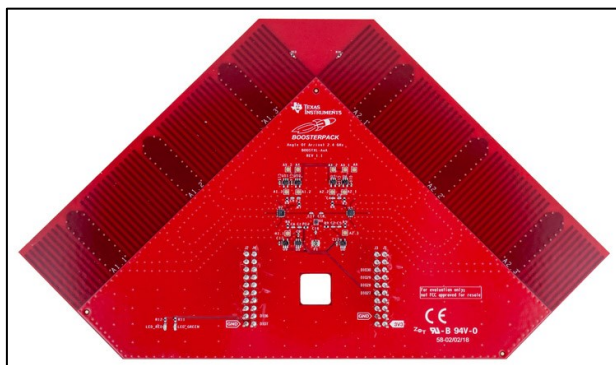


Fig. 101. Placa de evaluación AoA de Texas Instruments [51]

Seguidamente, sobre el año 2019, Nordic Semiconductor bajo su referencia nRF52833/40 [52] también publicó su primera solución basada en Angle of

Arrival con una placa de evaluación para el receptor. También se probó esta solución, que mejoraba la propuesta de Texas Instruments en cuanto a precisión, pero seguía siendo inestable, en gran medida por el efecto multi-camino en entornos de interior.

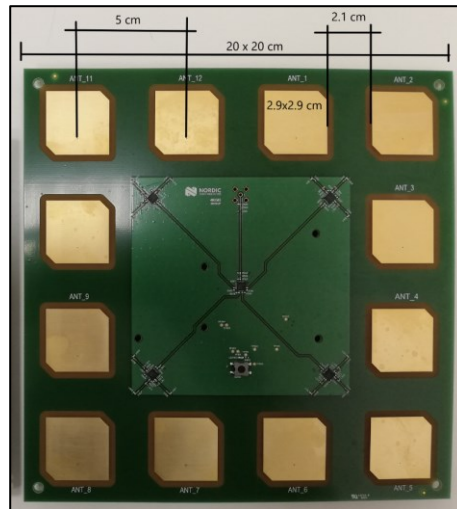


Fig. 102. Placa de evaluación AoA de Nordic Semiconductor

La mayoría de los fabricantes que han sacado al mercado microcontroladores o microprocesadores que soportan AoA, cuyo modelo de negocio se centra en dicho componente, han entendido que el mercado estaba muy inmaduro y los clientes necesitaban de un receptor y/o algoritmos ya diseñados para probar la solución. Hoy en día, Silicon Laboratories es otra compañía referente en el ámbito del *Direction Finding*.

Analizando las agrupaciones de antenas propuestas en las placas de evaluación de los distintos fabricantes, llama la atención de que todos ellos apuestan por antenas planas en placa de circuito impreso [53], siguiendo la línea de lo redactado en el estado del arte del capítulo 3, donde se expresa la motivación del uso de este tipo de antenas. Este hecho demuestra que la estrategia general de la gran mayoría de productos y diseños de radiofrecuencia para RTLS siguen el camino de optimizar la relación coste-efectivo y el tamaño de los dispositivos.

Respecto a los tipos de agrupación de antenas más comunes, tal y como reflejan los documentos técnicos asociados a la versión Bluetooth 5.1 liberada, suelen presentar patrones de disposición simétricos y separados una distancia d proporcional a la longitud de onda λ ; si bien es cierto que algunas empresas han optado por soluciones mixtas. Los tipos de agrupaciones definidos en el estándar son:

- Agrupación lineal
- Agrupación rectangular
- Agrupación circular

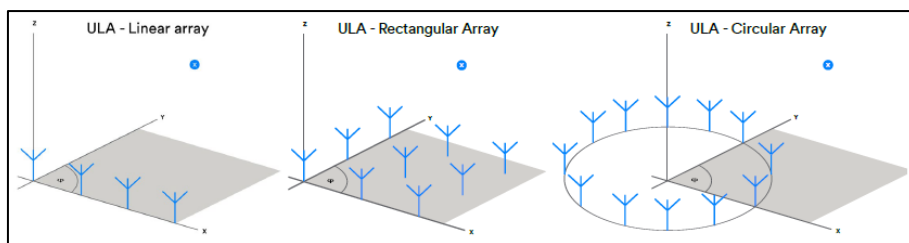


Fig. 103. Ejemplos de tipos de agrupaciones de antenas para AoA

El algoritmo utilizado para el cálculo del ángulo de llegada debe conocer esta disposición de elementos de antena para aplicar correctamente las fórmulas o cálculos que se muestran en el apartado 5.3 del capítulo que detalla el algoritmo de localización.

Por último, tal y como cita la especificación de la tecnología, con el objetivo de reducir costes y utilizar un mismo transceptor de radio para toda la agrupación de antenas (un chip para todas las antenas de la agrupación y no uno para cada una), cabe destacar el uso de los conmutadores que habilitan la recepción secuencial, realizando así un barrido de la agrupación y procesando la misma señal recibida proveniente de todas las antenas en un solo transceptor. Esto es posible gracias a que la señal generada por el emisor contiene una funcionalidad llamada CTE descrita en la sección homóloga del capítulo 5 que permite al receptor tener margen suficiente

para conmutar entre las distintas antenas, incluso realizando más de un barrido.

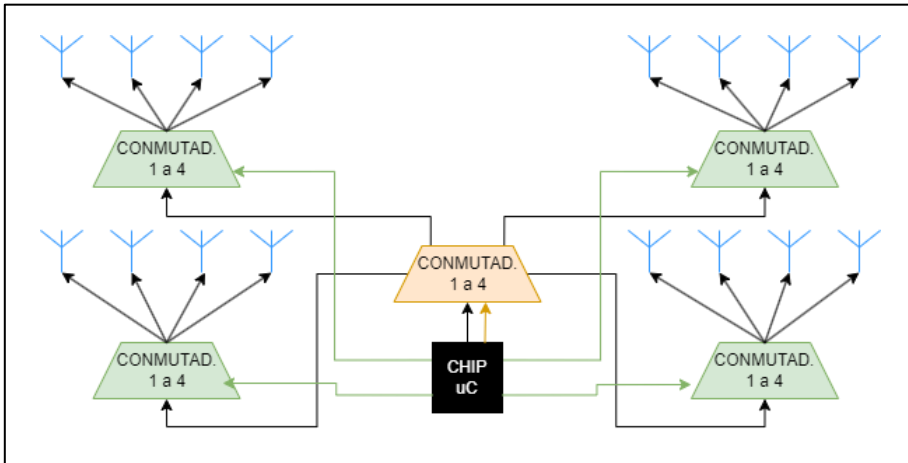


Fig. 104. Ejemplo de esquema de conmutación para agrupación de 16 antenas

Tal y como se observa en la figura anterior, los caminos de conmutación de la radiofrecuencia se suelen disponer en forma de árbol siendo el propio conmutador de una entrada y n salidas. Dependiendo de n , las etapas de conmutación serán más o menos (1 = naranja, 2 = verde), y la selección de este parámetro en la mayoría de los casos viene determinada por la gama de producto que menores pérdidas ofrezca. Además, tal y como aparece en las flechas naranjas y verdes, el microcontrolador tendrá que ordenar un patrón de conmutación mediante las líneas de control, por lo que el barrido de toda la agrupación se hará en el orden que marquen estas señales lógicas.

4.3. Diseño

CONFIDENCIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENCIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

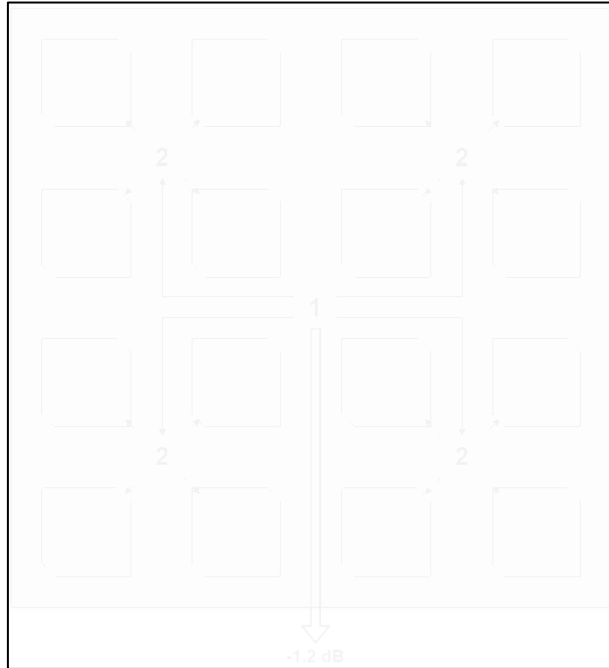


Fig. 105. Agrupación 4x4 con elementos centrales y etapa de conmutación con pérdidas

4.4. Resultados

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENCIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENCIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

4.5. Conclusiones

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

5. Algoritmo de localización

5.1. Introducción

El algoritmo de localización es la pieza software que completa, junto a los dispositivos de radiofrecuencia de los capítulos 3 y 0, el sistema de localización en tiempo real basado en la técnica AoA.

Este conjunto de cálculos, procesado e interpretación de datos de localización recibe el nombre de «algoritmo» por simplicidad, pero técnicamente es un conjunto de componentes que, tras la recepción de los datos provenientes de los Gateway asociados a uno o varios Tag que interesa localizar, tiene como misión ofrecer el resultado más fiable y exacto posible evitando y mejorando las limitaciones de la propia tecnología mediante herramientas matemáticas.

Entre sus funciones principales está la de conocer la posición de cada receptor, contextualizar los ángulos o muestras IQ relativizando esa información un sistema de coordenadas global, y, entonces, analizar el conjunto de los datos para poder posicionar al Tag a localizar. Además, los datos recibidos tienen que ser filtrados con distintas técnicas para evitar distorsiones debidas a efectos del entorno (multi-camino) y a las inestabilidades puntuales de algunos receptores.

Por otro lado, y enlazando con lo que se trata posteriormente en el capítulo 6, la capacidad de escalar de este componente es importante puesto que existen instalaciones con decenas de Gateway y Tag mientras que otras cuentan con centenares de ambos. Computacionalmente, los recursos de las máquinas destinadas a este fin no son infinitos, y, por lo tanto, que el algoritmo sea un artefacto modular capaz de abordar parte de una instalación de grandes dimensiones o la totalidad de una instalación sencilla, es un punto a favor para la fiabilidad y flexibilidad de la solución.

5.2. Estado del arte

El diseño y evolución del algoritmo de localización vienen marcados por la incorporación de la técnica de localización llamada *Angle of Arrival* (AoA) a la tecnología Bluetooth que cambia el paradigma de la localización por potencia de la señal recibida (RSSI) mediante la técnica de trilateración comúnmente utilizada años atrás. Más que una mejora, es un cambio de contexto y un nuevo diseño, ya que AoA se basa en otro principio físico de la señal electromagnética y las técnicas matemáticas utilizadas con algoritmos anteriores tienen poco que contribuir a esta nueva forma de localizar dispositivos.

La base de los algoritmos anteriores para estimar la posición en la que un emisor se encuentra usa la potencia de la señal recibida para traducirla a una distancia aproximada. Esta técnica no es muy precisa en la mayoría de los casos de uso debido a todos los elementos del entorno que afectan en el camino a la potencia de la señal enviada por el emisor. Aun así, esta técnica RSSI conjuntamente con algoritmos complejos (trilateración, filtrado, modelos de propagación, etcétera) ha sido suficiente para cubrir parte de los casos de uso del mercado, puesto que la precisión no es muy exacta pero suficiente.

A medida que han ido transcurriendo los años, han aparecido nuevos casos de uso que requieren mayor precisión en la localización de la que la técnica RSSI puede ofrecer. Es por ello que en 2019 se liberó la especificación Bluetooth 5.1 donde se recoge el perfil de *Direction Finding* [5] mediante el que se incorpora oficialmente la técnica AoA para cubrir las nuevas necesidades emergentes y pasar a una precisión de localización por debajo de un metro.

Desde la publicación de la especificación 5.1, varios fabricantes han ido incorporando la capacidad AoA a sus productos (aunque no todas las compañías cumplen con el estándar oficial): Texas Instruments (2018), Nordic Semiconductor (2019), Silicon Labs (2020), etcétera.

La técnica de Angle of Arrival, como su propio nombre indica, se basa en discernir de que ángulo proviene la señal como se observa en la figura anterior; esto se consigue gracias al análisis y la capacidad de captar una de las propiedades principales de las ondas electromagnéticas: la fase de la señal.

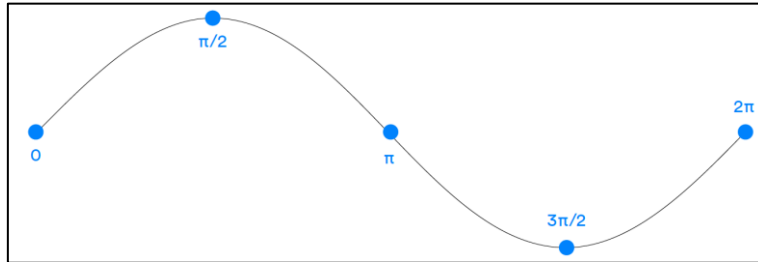


Fig. 106. Distintos puntos de la fase de una señal recibida

La fase de la señal se muestrea y mide a su llegada al receptor, y para poder conocer el ángulo de llegada del frente de ondas se necesita una agrupación de antenas en donde a cada una de dichas antenas le llegará la señal del emisor Tag con una fase distinta. Siendo conocida la separación entre las antenas y habiendo captado la fase de la señal recibida en cada una de ellas se procede al cálculo que determina el ángulo de llegada mediante una fórmula trigonométrica sencilla:

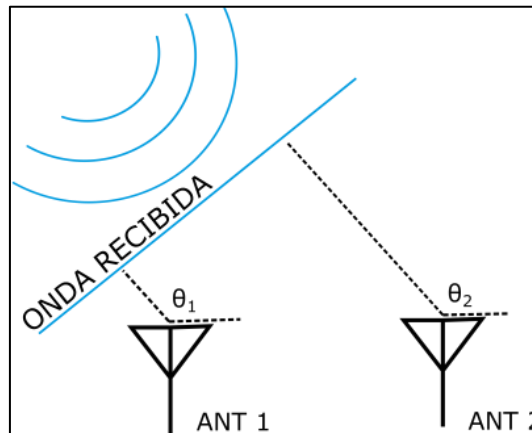


Fig. 107. Ejemplo de cálculo de Angle of Arrival

En concreto, Bluetooth trabaja dentro de la banda ISM (industrial, científica y médica), específicamente entre 2.40 GHz y 2.41 GHz dividiendo el espectro en 40 canales de 2 MHz de ancho de banda cada uno.

Aquí es donde surge una particularidad sin precedentes de la técnica de AoA, ya que, al aplicarla a este rango frecuencial, la capacidad de muestreo de los sistemas existentes no cumple con el criterio de Nyquist y no posibilita una velocidad de muestreo igual o superior al periodo de la señal, por lo tanto, se produce un submuestreo (se mide la fase de la señal recibida asociada a cada antena de la agrupación en periodos no contiguos y separados entre sí varios periodos). Para compensar este posible desajuste producido por el efecto de *aliasing* se muestrea cualquier antena respecto a una antena de referencia en la agrupación. Ver ilustración siguiente donde el muestreo de la fase de la señal recibida asociado a cada antena de la agrupación se representa con un número distinto:

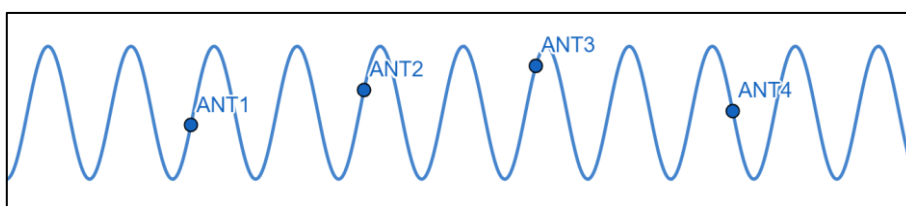


Fig. 108. Submuestreo en la señal Bluetooth recibida

Además, el hecho de contar con una antena de referencia para normalizar cada una de las muestras recogidas posibilita la corrección de errores inherentes al entorno, electrónica o transitorios inestables producidos por el hardware en la conmutación entre antenas. La siguiente representación para una agrupación de 1 x 4 antenas muestra un ejemplo de la fase de la señal en donde hay algún error en modo diferencial y no común (solo aplica a una de las antenas) [55]:

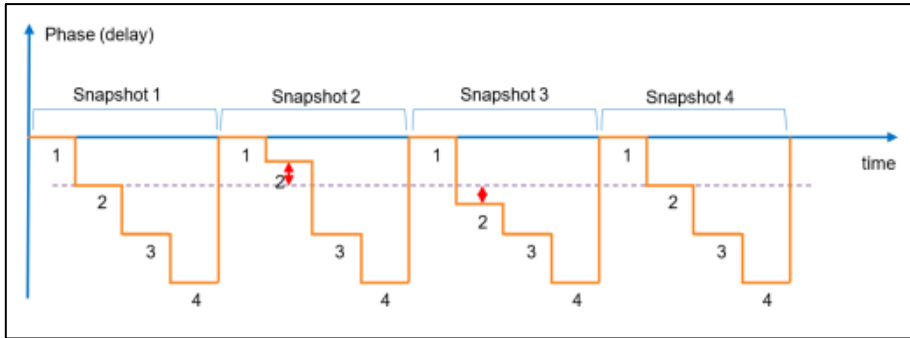


Fig. 109. Error en una de las antenas durante el muestreo de la señal recibida

Para la segunda antena de la agrupación durante las instantáneas 2 y 3 se observa un retardo en los valores de fase detectados. Esto provocaría un error en la localización estimada, de ahí que la antena de referencia sirva como mecanismo de compensación de errores puntuales en el muestreo.

El muestreo de la señal citado anteriormente se realiza tomando medidas de amplitud y fase en instantes concretos y diferentes antenas a lo largo de la duración de la onda recibida. Es un proceso extendido y conocido como muestreo en fase y cuadratura (IQ). Una muestra IQ consta de la amplitud y el ángulo de la fase de la onda representados en coordenadas cartesianas al igual que se representan los números complejos en fasores.

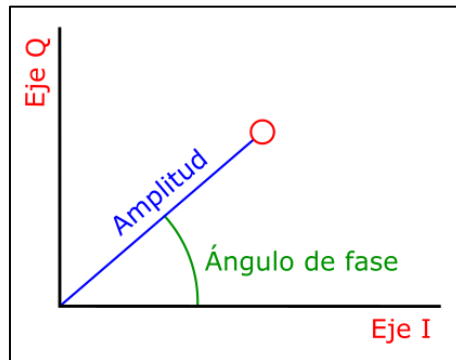


Fig. 110. Representación gráfica de muestra IQ

Al realizar el muestreo para la agrupación completa de antenas, se atribuye una muestra IQ (o varias si hay distintos «barridos») a cada una de ellas. Esta muestra IQ se tomará a propósito en un instante de tiempo estable para cada una de las antenas y de la señal recibida, dejando un tiempo de guarda

para estabilizar las oscilaciones producidas por la conmutación física a cada una de las antenas; cabe recordar que la conmutación es secuencial y se realiza antena por antena (no se paraleliza) tal y como se explica en los capítulos 0 y 6.

Para que lo anterior sea posible, la fuente emisora de la señal (en este caso el Tag) debe de emitir una señal constante para que el muestreo IQ entre antenas del Gateway receptor sea viable. La forma en la que el estándar Bluetooth resuelve este aspecto es incluyendo al final de la trama que contiene la información típica de un mensaje Bluetooth se añade un tono constante llamado CTE (*Constant Tone Extension*) para que pueda ser muestreado y analizado. Este tono, a nivel lógico es un conjunto binario de '1', ya que el cambio a '0' provoca una distorsión en la fase por ser una modulación en frecuencia GFSK (*Gaussian frequency-shift keying*); de esta forma se consigue algo similar a una función seno estable en el tiempo.

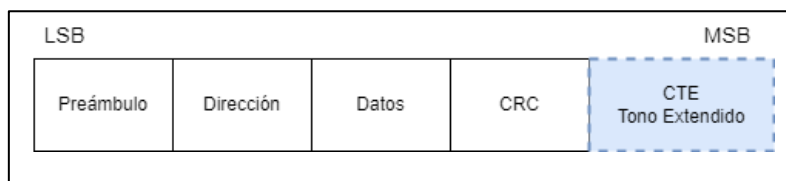


Fig. 111. Estructura de trama Bluetooth Direction Finding con tono extendido para AoA

Una vez recogidas todas las muestras IQ de la agrupación de antenas del receptor, se deben de procesar para calcular el ángulo de llegada de la señal a un receptor concreto. Aquí comienza la primera tarea que se le atribuye al algoritmo de localización, ya que, como se ha visto anteriormente y se verá en párrafos posteriores, existen limitaciones y muestras erróneas que pueden distorsionar el resultado. Por lo tanto, la primera tarea del algoritmo de localización analizar y filtrar las muestras IQ y los ángulos resultantes para proveer información fiable a la siguiente etapa de dicho algoritmo, y así, no acumular error.

El algoritmo de localización también es el encargado de realizar las tareas de contextualización y puesta en común de los ángulos provenientes de los distintos Gateway atendiendo a su posición en la instalación para poder ubicar al emisor, ya que, cada Gateway contribuye con unos ángulos

asociados a su posición absoluta (no conocen la presencia de los demás receptores) y no de su posición relativa respecto al origen de coordenadas del plano global de la instalación.

Posteriormente, como tarea final, el algoritmo debe de proveer una posición en coordenadas cartesianas X, Y, Z relativas al mapa o plano con el que se trabaje. Para que esta información sea fiable y coherente, tal y como se describía en el párrafo anterior sobre la primera tarea encomendada a este, se deben de paliar y filtrar todas las oscilaciones y distorsiones provocadas por el entorno o las limitaciones del sistema, por lo tanto, un filtrado y procesado final es prácticamente necesario.

Y, ¿qué son esas limitaciones del entorno que afectan a la precisión y fiabilidad del resultado de localización? Considerando que, dentro de este marco de trabajo, el sistema de localización en tiempo real está enfocado a entornos cerrados o interiores, la propagación de la señal en este tipo de medios es compleja y surgen muchos rebotes que podrían cambiar la percepción del ángulo de llegada, y concretamente en hospitales se acentúa este efecto, donde hay mobiliario metálico y elementos de construcción de distintos materiales que cuentan con diferentes reflexiones, refracciones y atenuaciones [56]:

- Dos señales procedentes de distintos emisores pueden ser coherentes en el receptor si una llega retardada, pero con amplitud parecida (interferencia constructiva)
- El receptor puede tomar como coherente una señal rebotada en una pared respecto de la original, proviniendo de otro ángulo distinto.
- La polarización de la señal emitida afectará a la amplitud recibida

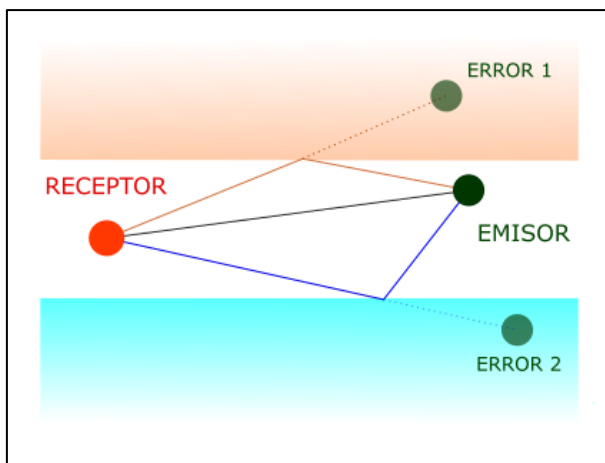


Fig. 112. Efecto multi-camino con posibles errores de posicionamiento por rebotes

El efecto multi-camino en interiores (también en espacio abierto) ha sido estudiado durante muchos años y hay muchas fuentes que pueden distorsionar la muestra IQ en concreto y corromperla. La intensidad con la que los distintos elementos pueden generar un error dependerá de la posición concreta del Gateway receptor y del Tag emisor. Además, las posibles fuentes de ruido extra principales pueden ser:

- Ruido analógico del receptor de radio (ruido en la electrónica, señales que se acoplan, corrientes conducidas).
- Ruido de conmutación.
- Ruido de cuantificación procedente del muestreo
- Ruido por acoplamiento de señal radiada en canales de transmisión adyacentes (misma tecnología) o idénticos (otra tecnología)

En otras palabras, las fuentes de ruido y de error en este tipo de escenarios existen y son relevantes, incluso en condiciones relativamente buenas. Esto es importante a la hora de procesar las muestras IQ (primera etapa), ya que, cualquiera de las fuentes citadas anteriormente podría tener un patrón o comportamiento estadístico a detectar y paliar.

5.3. Diseño e implementación

La tecnología Angle of Arrival (AoA) aplicada en Bluetooth, como en otros estándares de radio, presenta inestabilidades, y, por lo tanto, pierde precisión en la localización por efecto multi-camino, como ya se citaba en el apartado anterior. Por lo tanto, el algoritmo de localización es una pieza clave del sistema RTLS y debe de aportar los mecanismos suficientes para compensar estas inestabilidades inherentes al modo de funcionamiento de los otros componentes: Tag emisor y Gateway receptor.

Para poder evaluar la utilidad del algoritmo propuesto y el grado de inexactitud que el efecto multi-camino provoca sobre la estimación del ángulo de llegada o localización del dispositivo a monitorizar, se realiza un diseño en Matlab sobre los dispositivos desarrollados en los capítulos anteriores (Tag y Gateway) cuyo código se muestra en el Anexo 2: Utilidades matemáticas para los resultados.

El modelo implementado se basa en captar el campo eléctrico recibido en varios puntos de un espacio (agrupación de antenas del Gateway receptor) de una fuente de onda esférica (modelo de Tag ideal) basado en la función de Green [57], que se va desplazando, comprendido dentro de una habitación rectangular con cuatro paredes, techo y suelo. La siguiente función de Green ofrece resultados para distintas distancias (d) y amplitudes atenuadas (A):

$$G(r) = A \frac{e^{-jkd}}{4\pi d} ; \text{ donde } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

En este modelo se consideran los seis rayos reflejados en cada una de las paredes, techo o suelo, que por teoría de imágenes se simulan como fuentes externas al habitáculo habiendo sido reflejadas a igual distancia de las paredes y techo que la fuente real; similar al caso ilustrado en Fig. 112. Esto se traduce en realizar el sumatorio de la fórmula anterior para la señal original y todas las reflejadas.

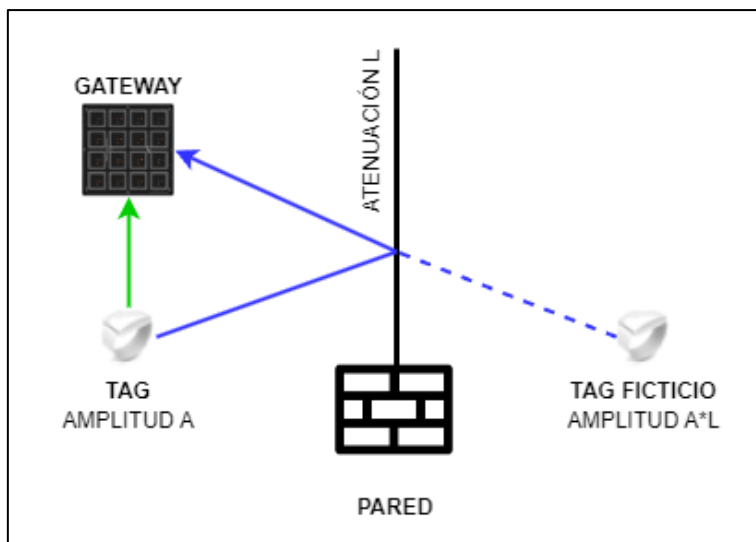


Fig. 113. Simulación gráfica de la teoría de imágenes

Una de las adaptaciones y pruebas propuestas consiste en eliminar la atenuación por reflexión en una de las paredes (pared izquierda en las vistas en planta que se observarán en adelante) para que dicho rayo reflejado o rebote tenga mayor contribución en el campo captado en cada una de las antenas del receptor, y así, la transformada rápida de Fourier (FFT), que es la herramienta de cálculo utilizada para estimar el ángulo de llegada, se vea o no deformada y por lo tanto el resultado varíe.

Esta modificación aproxima el modelo a la realidad, ya que, aunque se tienda a pensar que un rayo reflejado siempre se va a ver atenuado, por condiciones del entorno puede recibirse con mejor amplitud que el supuesto rayo directo. Además, en el caso en que una antena, por sus prestaciones, favorece la recepción desde el ángulo donde se produce el rebote y no la del rayo directo también queda recogido en este planteamiento.

Respecto a la herramienta de cálculo de la posición de la fuente emisora, se presenta un modelo trigonométrico básico en la siguiente ilustración y fórmula, que permite estimar el ángulo de llegada entre dos o más antenas de la agrupación del receptor:

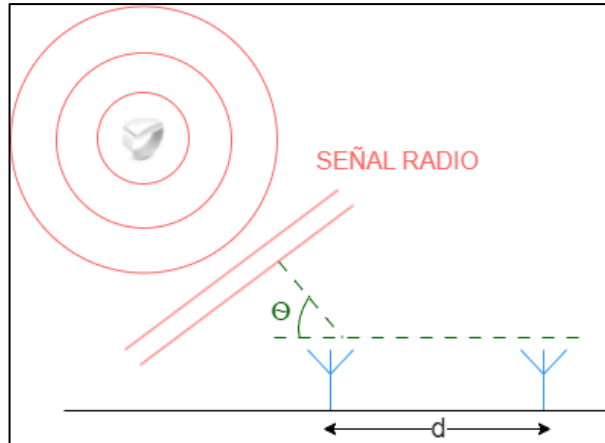


Fig. 114. Representación gráfica de la técnica de AoA y parámetros para fórmula

$$\theta = \arccos \frac{\Psi \lambda}{2\pi d} ; \quad \text{donde } \begin{array}{l} \Psi = \text{diferencia de fase} \\ d = \text{distancia de antenas} \\ \lambda = \text{longitud de onda} \end{array}$$

Esta herramienta anterior es un modelo simple y básico que no tiene en cuenta la contribución de más de una señal al frente de ondas recibido, ya que se basa en un modelo ideal con una única señal incidente, onda plana y fase lineal. En un entorno real, la contribución o interferencia de la onda directa, las reflejadas (rebotes) y otras señales de otras fuentes en la misma frecuencia hacen que la fase no sea lineal y se componga de una suma de todas ellas; el cálculo entonces se realiza a través de una suma de Fourier de los fasores complejos. Además, para utilizar la fórmula trigonométrica anterior, habría que sumar las contribuciones de cada antena con una fase lineal y repetir el proceso iterativamente para todas las direcciones posibles, siendo este proceso muy costoso computacionalmente, y para una fase no lineal (caso real), este procedimiento no sirve. Por lo tanto, si se quiere distinguir entre varias ondas incidentes y una fase no lineal, se debe recurrir a la transformada rápida de Fourier (FFT), cuyo coste computacional es mucho menor y más eficiente y rápido, obteniendo en una sola interacción todas las posibles contribuciones de distintas señales recibidas. Cabe destacar que el uso de la FFT, considerada como un algoritmo eficiente para calcular la transformada de Fourier discreta (DFT), está muy extendido en el

ámbito de las agrupaciones de antenas y se ha utilizado a lo largo del tiempo para diversas aplicaciones.

$$DFT = X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn}, \text{ donde } k = 0, \dots, N - 1$$

Siendo x_n una señal discreta en el tiempo

A continuación, se puede ver la primera aproximación al modelo, en donde hay dos vistas 2D. En el primer gráfico se muestra el escenario representando con asteriscos rojos las antenas de la agrupación, asteriscos azules la fuente original y las ficticias (simulación de rebotes en tres paredes por teoría de imágenes) y las paredes con trazo verde; en el segundo gráfico se muestra la resolución de la FFT para las tres reflexiones en las paredes y sin reflexiones:

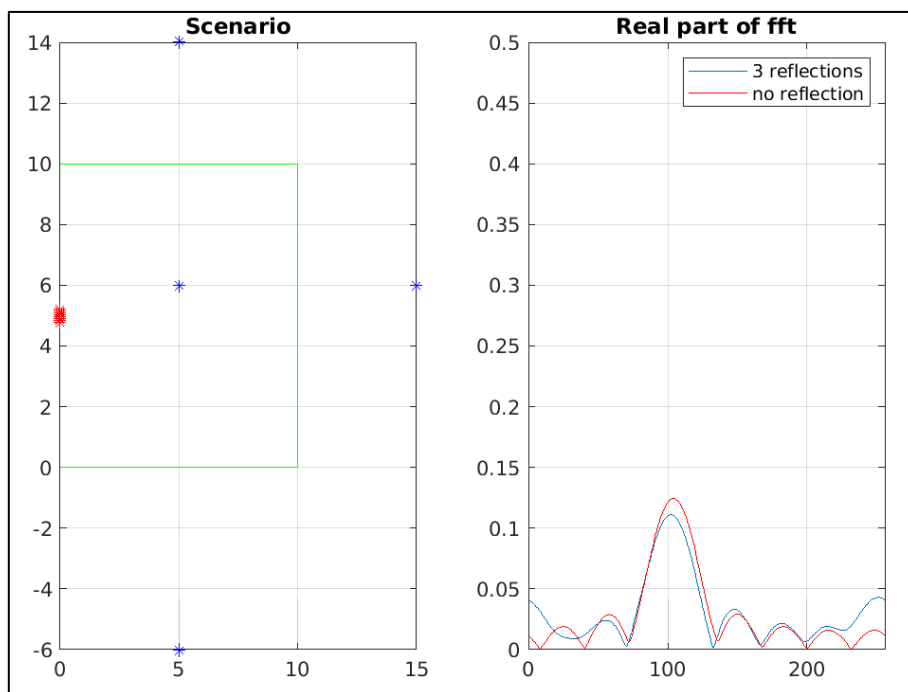


Fig. 115. Modelo del algoritmo con escenario y FFT con y sin reflexiones

Como era de esperar, la FFT con reflexiones presenta una relación de lóbulo principal a secundario (SLL) menor, lo que indica que los rebotes pueden

distorsionar el resultado de la posición estimada de la fuente, entendiendo como posición estimada el apuntamiento máximo de la FFT en su lóbulo principal. Para entender mejor este caso se muestra una segunda aproximación del modelo con la FFT en coordenadas polares:

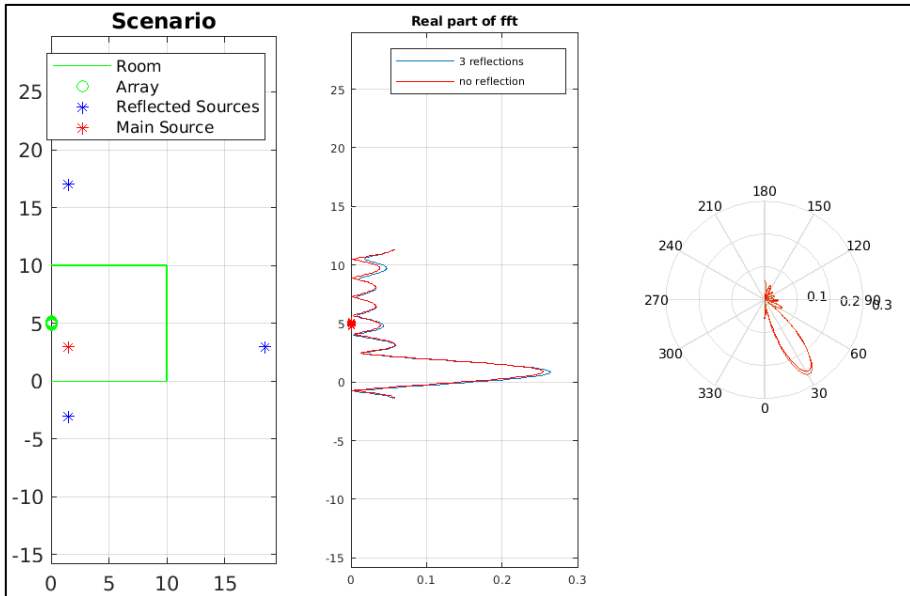


Fig. 116. Modelo del algoritmo con escenario y FFT con y sin reflexiones y FFT en coordenadas polares

Una vista en planta de la FFT en 3D también resulta un buen apoyo visual para entender cómo funciona el algoritmo diseñado y analizar las desviaciones respecto de la fuente emisora (asterisco azul) del máximo (amarillo). También se puede estudiar la afectación de los máximos o lóbulos secundarios, las réplicas y el espejado de los máximos cuando el resultado se acerca al contorno. Esto último no debería de ser un problema al aplicar un filtrado óptimo y un enventanado de las muestras:

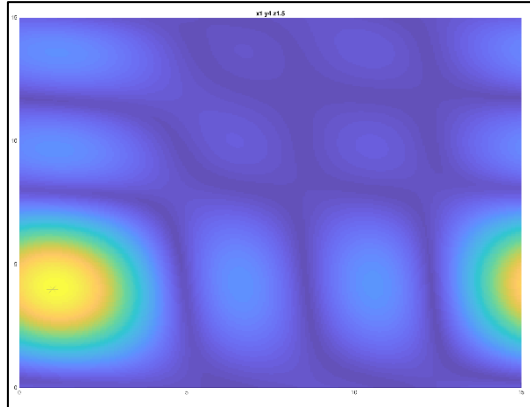


Fig. 117. Ejemplo de resolución de posición del emisor (asterisco) mediante FFT

Una vez analizados los gráficos anteriores, se añade una componente más pasando de dos dimensiones a tres. Esta tercera aproximación pretende acercarse a la realidad introduciendo la Z en la resolución del algoritmo, puesto que los casos reales contarán con las tres dimensiones. En la siguiente figura se ve un escenario en 3D con la fuente como un asterisco azul y el receptor en rojo; se acompaña del mismo modelo que la Fig. 117 para que el lector comprenda la relación. Obsérvese la coincidencia del máximo de la FFT en amarillo (derecha) con la posición de la fuente (izquierda; asterisco azul):

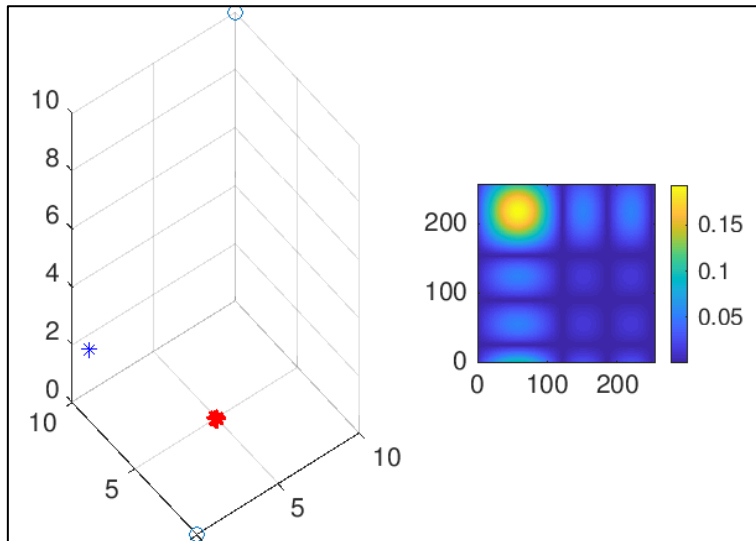


Fig. 118. Ejemplo de resolución de posición del emisor mediante FFT con escenario 3D

Dando un paso más allá en la información representada, siguiendo en la tercera aproximación del modelo, se pueden ver en la siguiente imagen elementos adicionales que aportan contexto a la visualización como la estancia en 3D que se pretende simular y la FFT en perspectiva isométrica donde se observan mejor las fluctuaciones de los picos y el alcance del máximo. Cabe destacar que la fuente emisora (Tag) se representa en verde en este caso, mientras que las fuentes ficticias en azul:

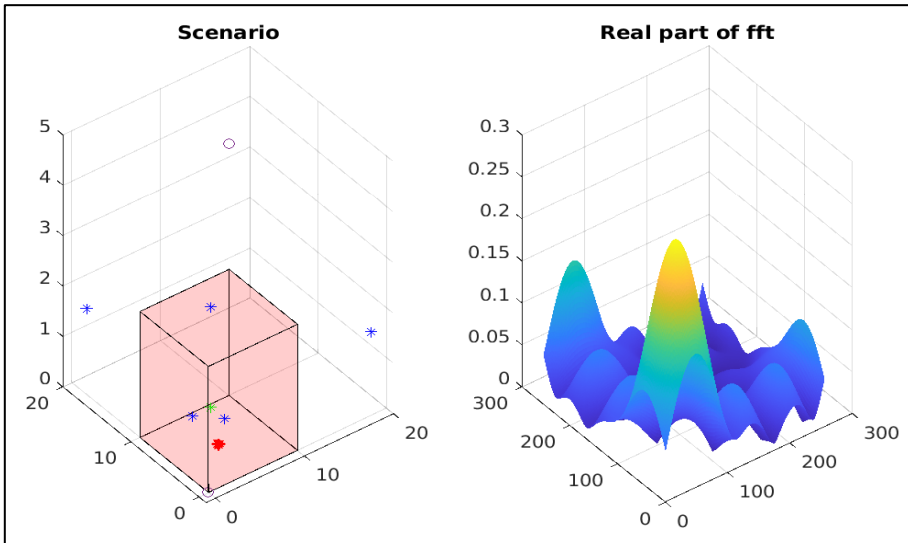


Fig. 119. Ejemplo de resolución de posición del emisor mediante FFT en 3D con escenario y paredes

Por completar el análisis gráfico del diseño propuesto, se muestran distintas vistas que clarifican la implementación de la teoría de imágenes con fuentes emisoras secundarias (fuera de la estancia; asteriscos azules). También se acompañan las representaciones de la FFT y de un rayo que indica, desde el origen del receptor, en que ángulo se estima que está la fuente.

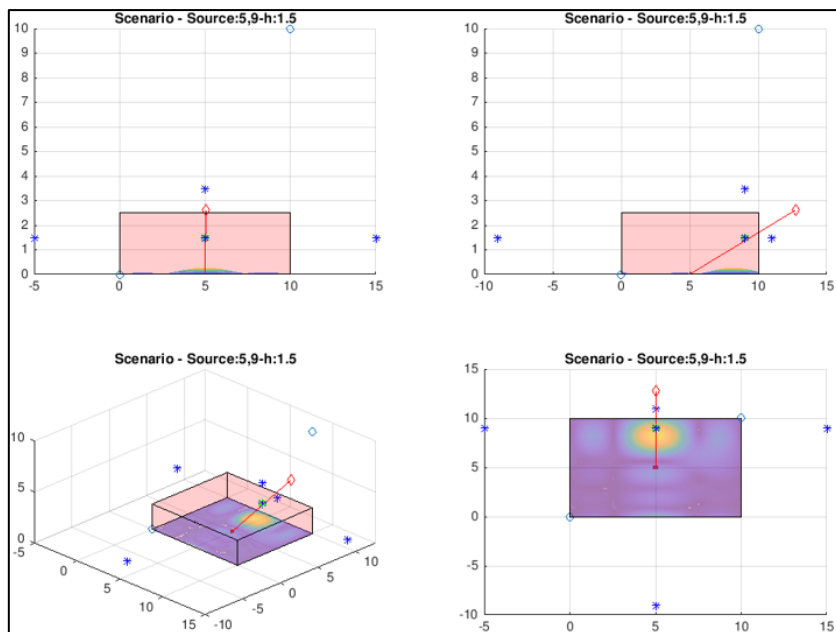


Fig. 120. Vistas en planta, alzado, perfil e isométrica de un escenario y resolución del algoritmo

Por último, tal y como se ha dejado ver en la representación anterior del rayo de color rojo que apunta hacia el resultado estimado de la posición del Tag emisor, se añade esta característica a la cuarta y última aproximación del modelo. Se considera necesario representar la FFT de forma volumétrica (coordenadas esféricas con origen en el receptor) y trazar una línea que comience en el máximo de esta y se proyecte a lo largo de la estancia para observar si intersecciona o cruza con la fuente original, de esta forma se valida la precisión del resultado del algoritmo propuesto. El resultado ideal esperado es que para todas las posiciones de la fuente y del receptor, el rayo rojo (estimación de la posición de la fuente) interseccione al asterisco verde (fuente real), pero no siempre es así; esta desviación marcará la calidad del resultado e indicará si cumple el objetivo esperado de aumentar la precisión del sistema RTLS mediante la incorporación de la técnica AoA con Tag, Gateway y algoritmo incluidos.

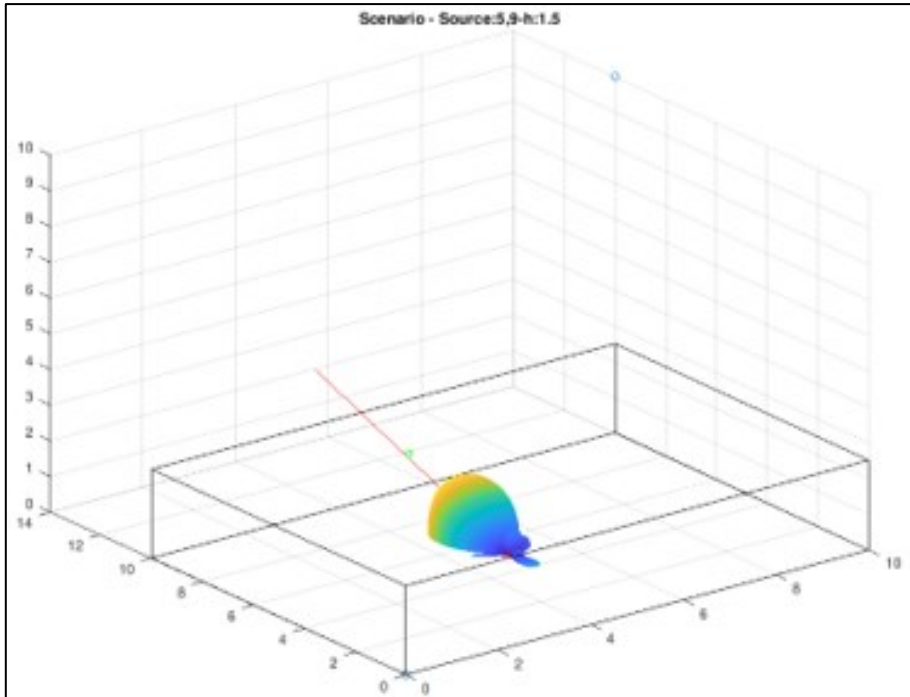


Fig. 121. FFT en 3D y en coordenadas polares representando estimación de la posición del emisor

Por otro lado, poniendo el foco en la implementación final, en donde cada vez más los sistemas RTLS no tienen una única fuente de datos, se plantean dos mecanismos de localización:

- Intersección de los ángulos que provee la técnica AoA: La intersección aproximada de las líneas que siguen los ángulos reportados por los receptores forman un polígono o zona concreta en donde el Tag emisor se encuentra.
- Intersección de los ángulos + distancia estimada: La combinación de la técnica anterior por RSSI (trilateración) y la contribución del nuevo desarrollo de AoA: La intersección de los ángulos del caso anterior, sumado a otro mecanismo que indica la distancia estimada a la que está el Tag, da como resultado la posición donde se encuentra el emisor.

Pensando en la precisión y la fiabilidad, y considerando que la técnica de RSSI por trilateración no funciona mal para escenarios que no requieren una alta precisión, la opción de combinar ambas técnicas resulta la más

conservadora y óptima puesto que los casos de uso son diversos y tener un mecanismo de redundancia de la localización es un punto positivo. Podrían darse casos en los que la técnica de AoA falle por sus propias limitaciones, rebotes de la señal u otras razones y la alternativa RSSI ofrezca un indicador de que los resultados difieren y sus diferencias están por encima de lo normal, entonces, se podría descartar esa muestra de posición X, Y, Z o reprocesarla. Además, según se ha podido analizar en el apartado del estado del arte, la señal Bluetooth sigue enviando la trama de forma idéntica, pero con un añadido al final, lo que hace compatible la coexistencia de ambas técnicas actuando en paralelo sobre la misma señal recibida.

5.4. Resultados

En los distintos resultados gráficos se va a observar una vista en planta de la FFT, elegida como herramienta matemática principal del algoritmo, con la posición de la fuente marcada con un asterisco, en donde arriba aparecerá el resultado sin modificaciones (los rayos reflejados se ven atenuados de forma similar a la realidad) y abajo aparecerá el resultado con la variante en la que la pared izquierda no atenúa el rebote de la misma. La distribución de antenas receptoras se sitúa en el centro del área de estudio, cuya posición no se dibuja para no confundir el resultado, pero que se establece exactamente en $[7,5, 7,5, 0]$ haciendo referencia a los ejes X, Y, Z respectivamente. Todas las unidades de esta sección se expresan en metros.

La interpretación del resultado es la siguiente: el máximo de la FFT aparecerá de color más amarillo dentro del gradiente representado, y es en ese máximo en donde se interpreta que el receptor estima la procedencia de la señal. El resultado ideal sería que el máximo (resultado del cálculo) se dibuje justo en el asterisco azul (fuente original).

El título de cada figura marca la posición tridimensional de la fuente, ya que la altura de dicho elemento no se puede percibir en la vista en planta o corte XY. Cabe destacar que para cada bloque de resultados dentro del apartado siguiente se reflejan tres variaciones en altura de la fuente (eje Z) para la misma posición X e Y.

Los materiales de construcción, a efectos de atenuaciones aplicadas a los rebotes de la señal, obedecen a las características de una pared estándar de pladur. Se han realizado pruebas para paredes de ladrillo, cemento y cristal y los resultados no sufren variaciones relevantes. El pladur se considera el material más ajustado a los casos reales, ya que es el utilizado en los hospitales de nueva construcción, incluso en estancias tan especiales como los quirófanos con rayos X, donde se apantalla toda la sala con doble capa de pladur y un aislante intermedio.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del modelo de algoritmo diseñado para distintas posiciones de la fuente emisora:

Tabla 5. Resultados del algoritmo para $X=1, Y=1$

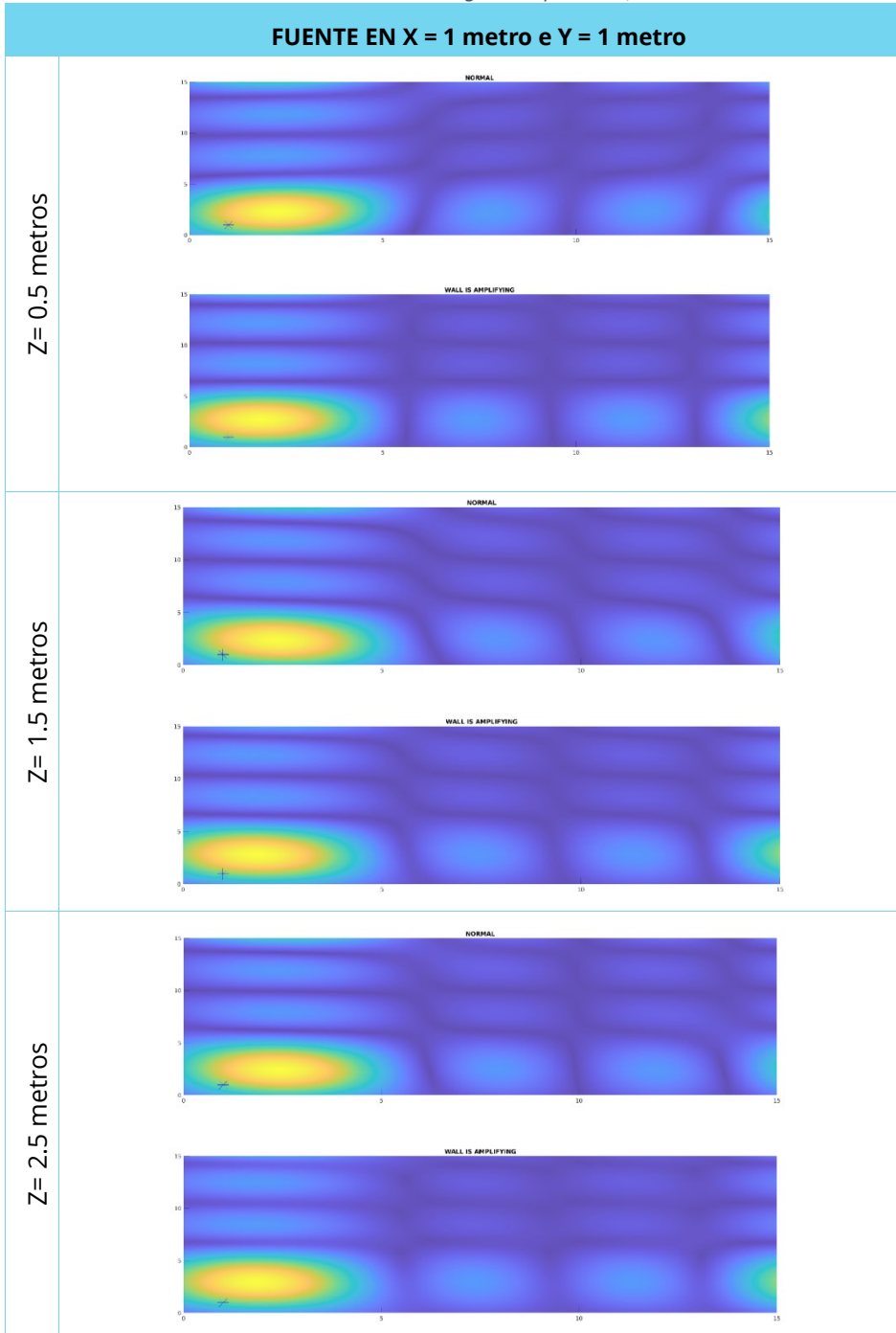


Tabla 6. Resultados del algoritmo para $X=1, Y=3.5$

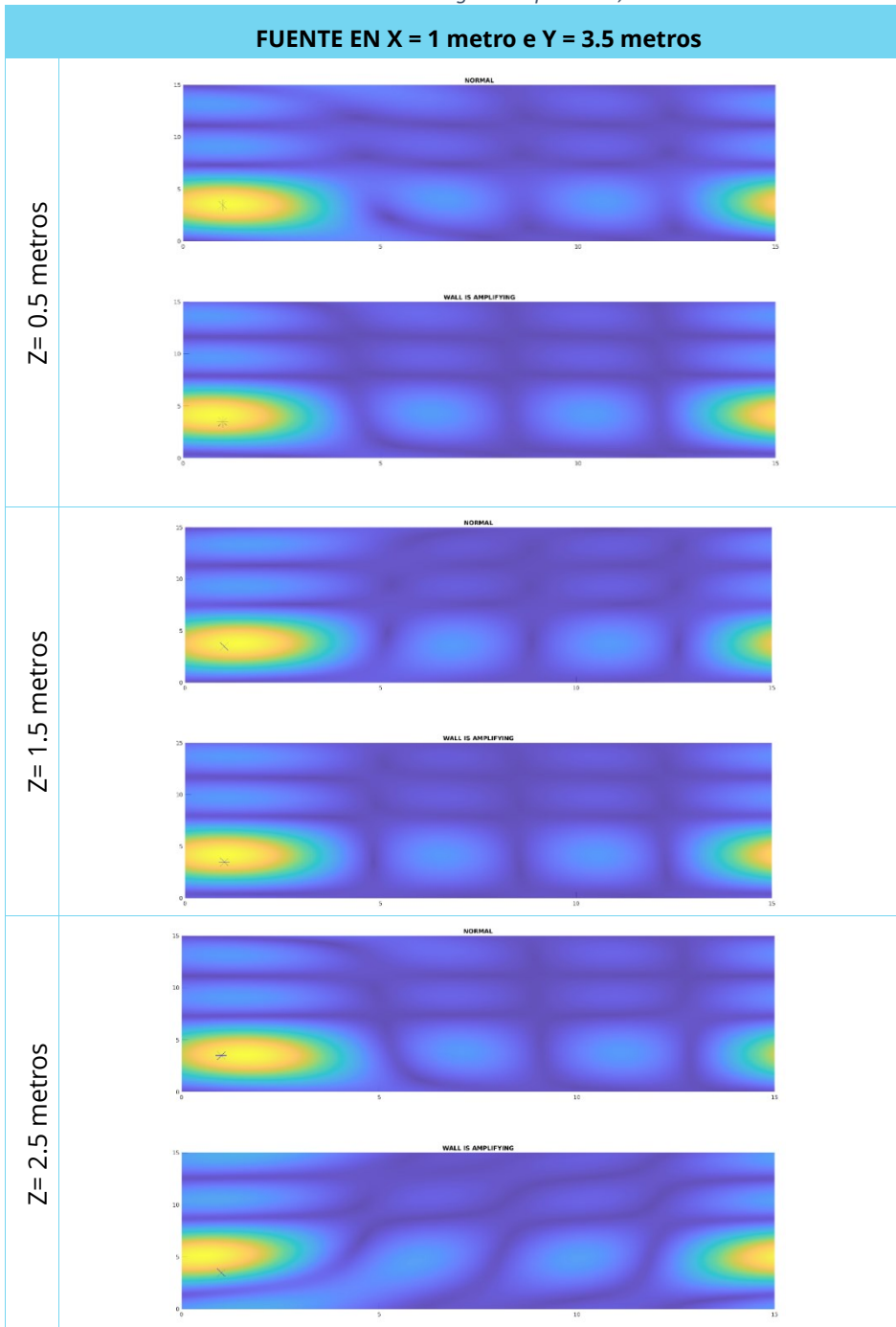


Tabla 7. Resultados del algoritmo para X=1, Y=6

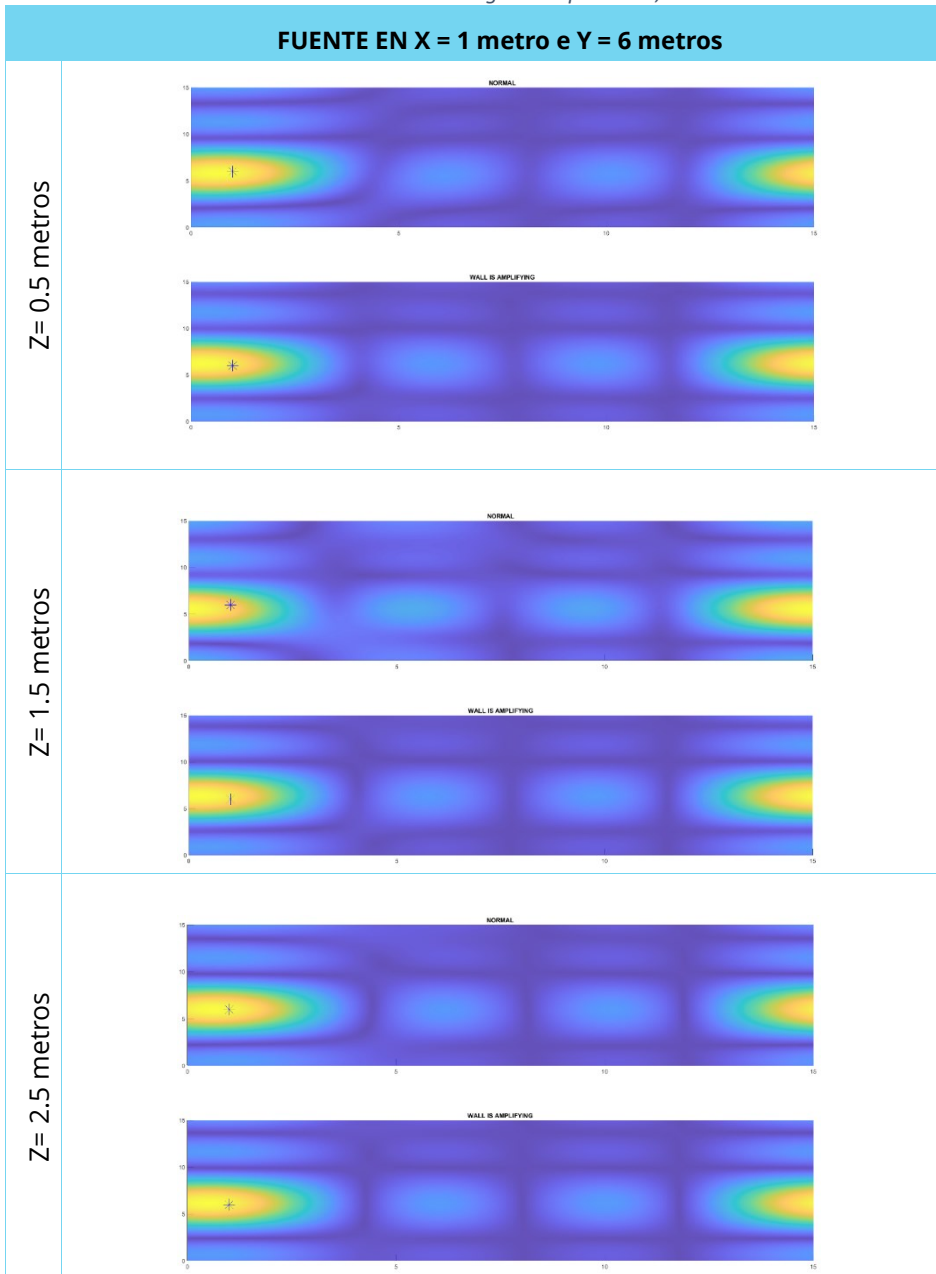


Tabla 8. Resultados del algoritmo para $X=1, Y=8.5$

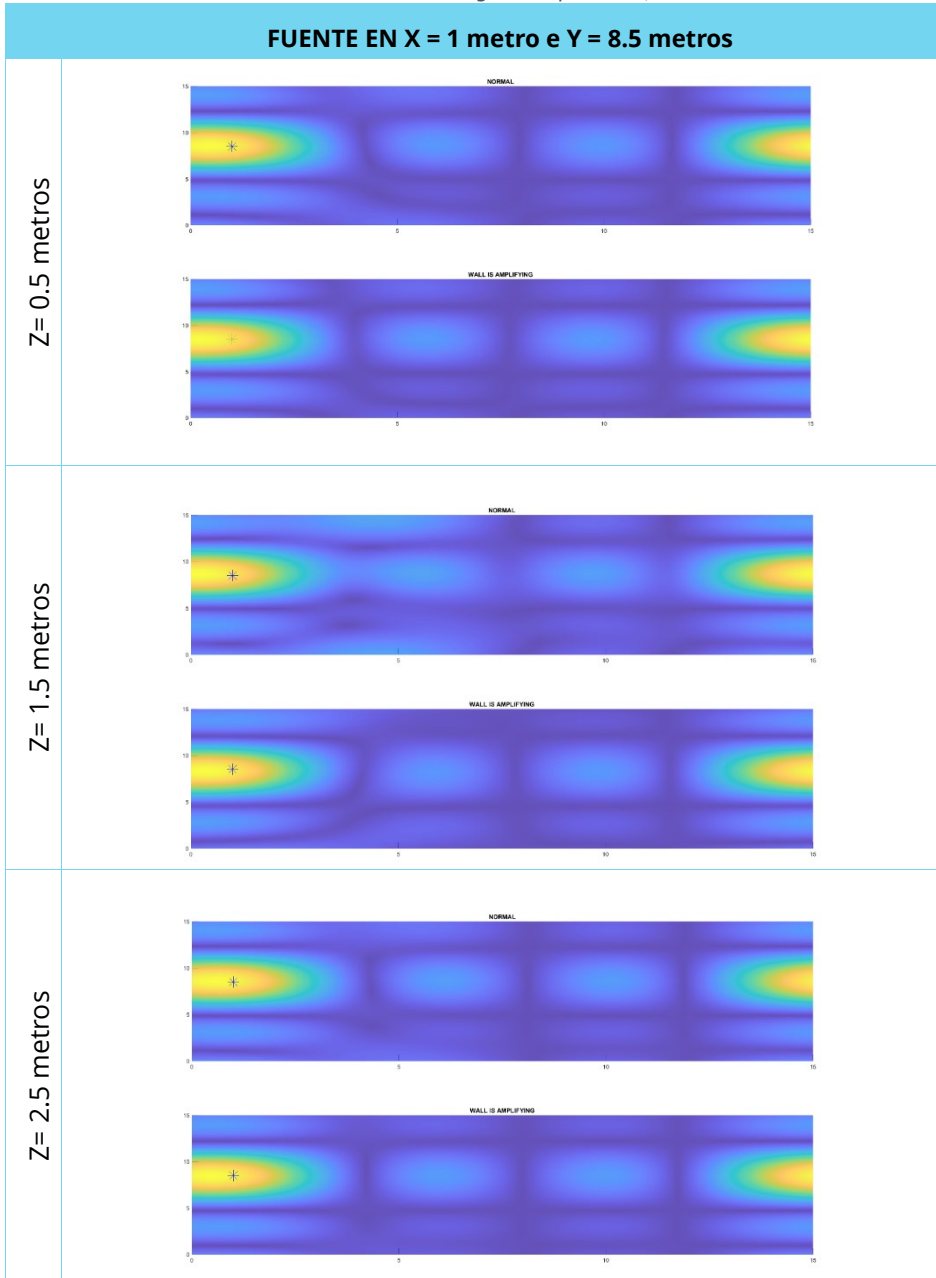


Tabla 9. Resultados del algoritmo para X=1, Y=11

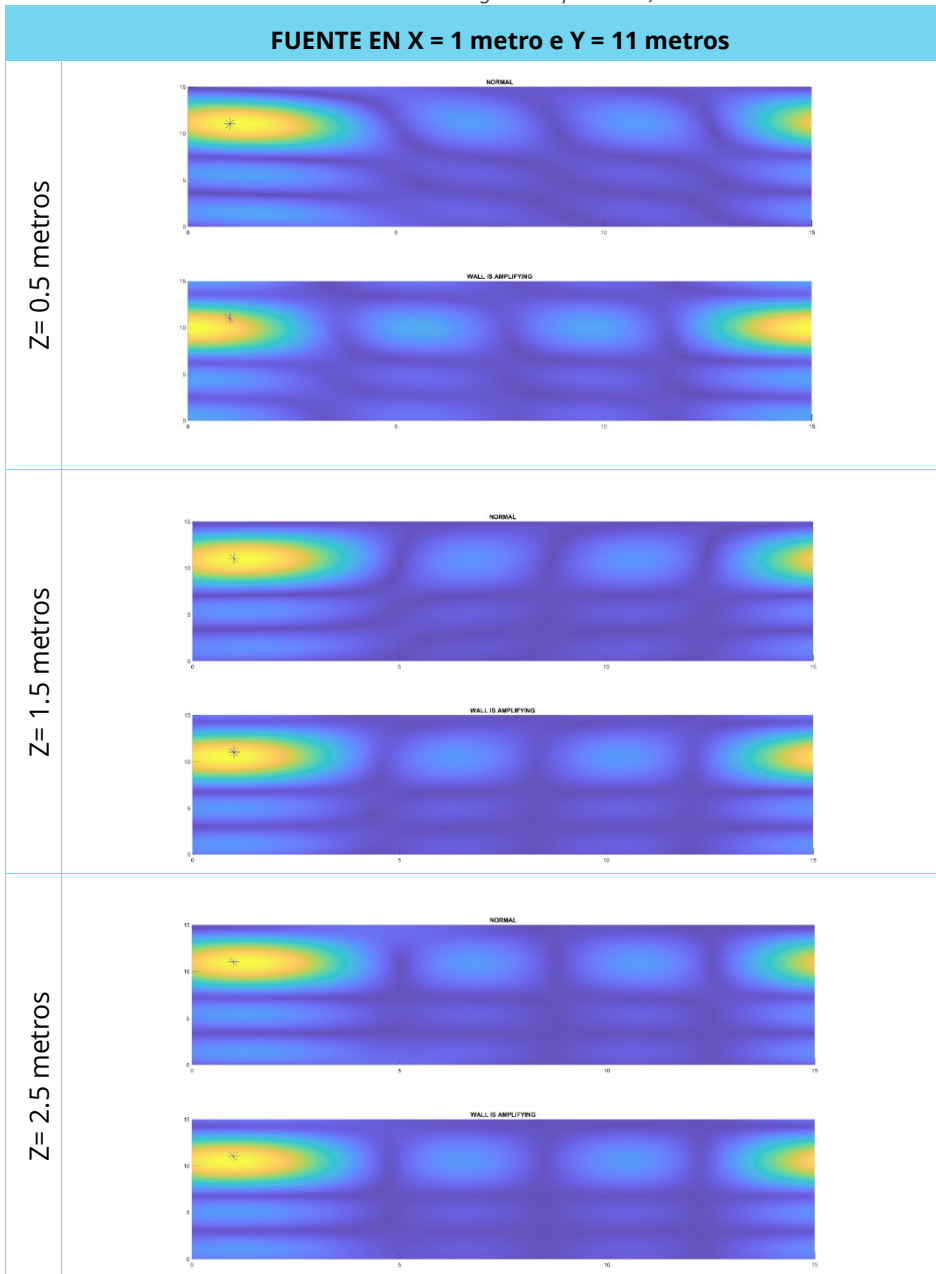


Tabla 10. Resultados del algoritmo para X=1, Y=13

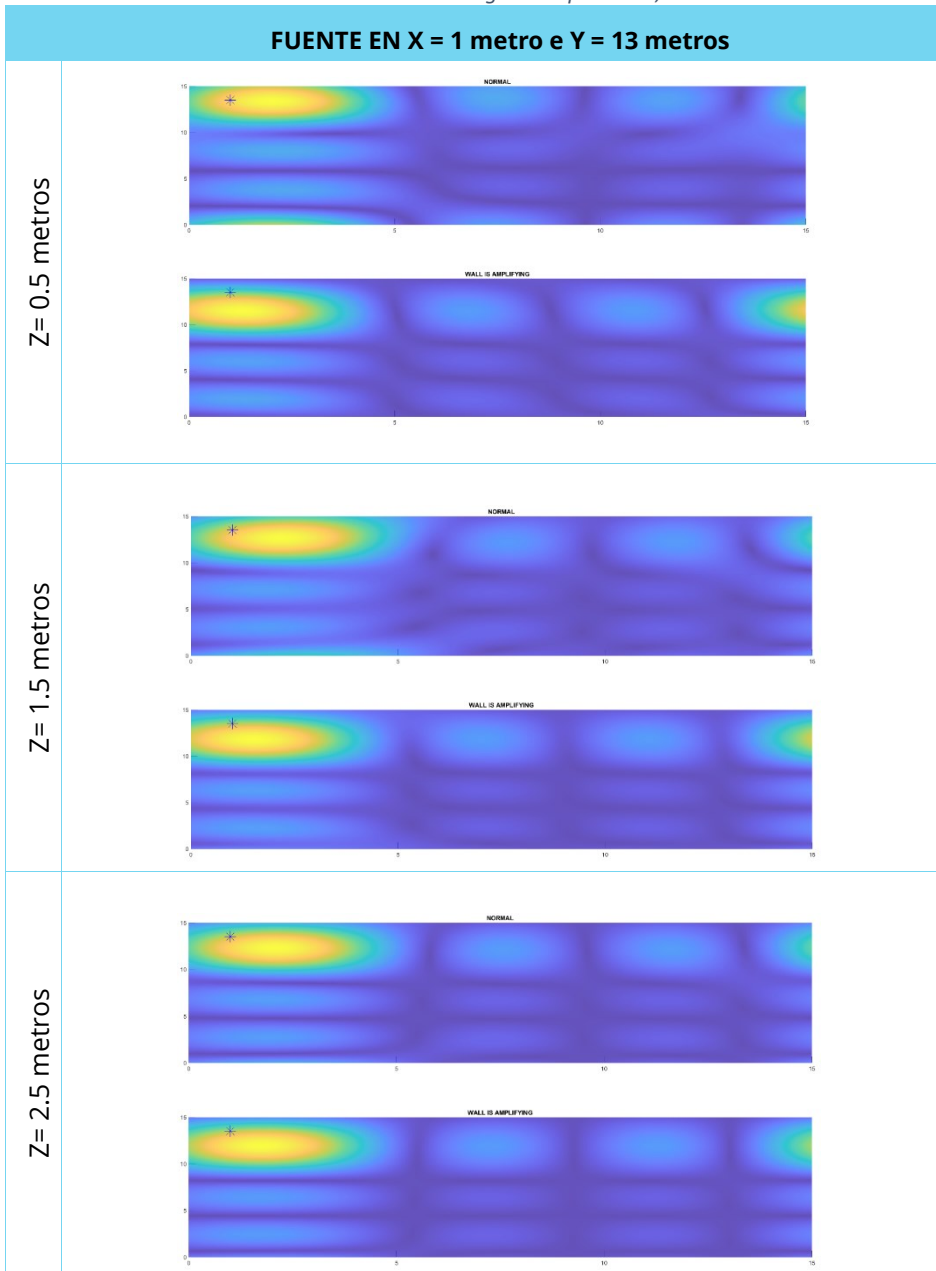


Tabla 11. Resultados del algoritmo para $X=3.5$, $Y=1$

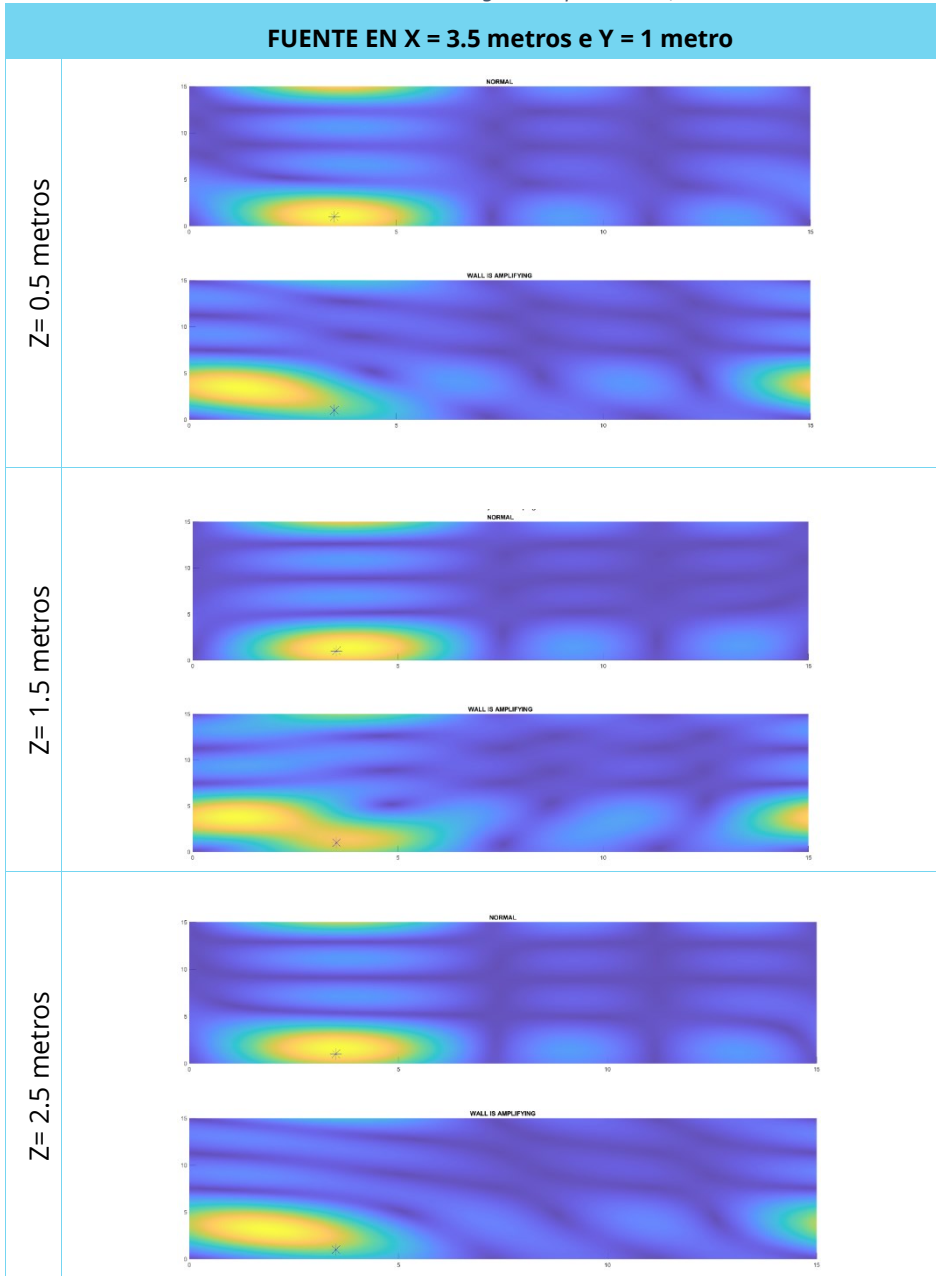


Tabla 12. Resultados del algoritmo para $X=3.5, Y=3.5$

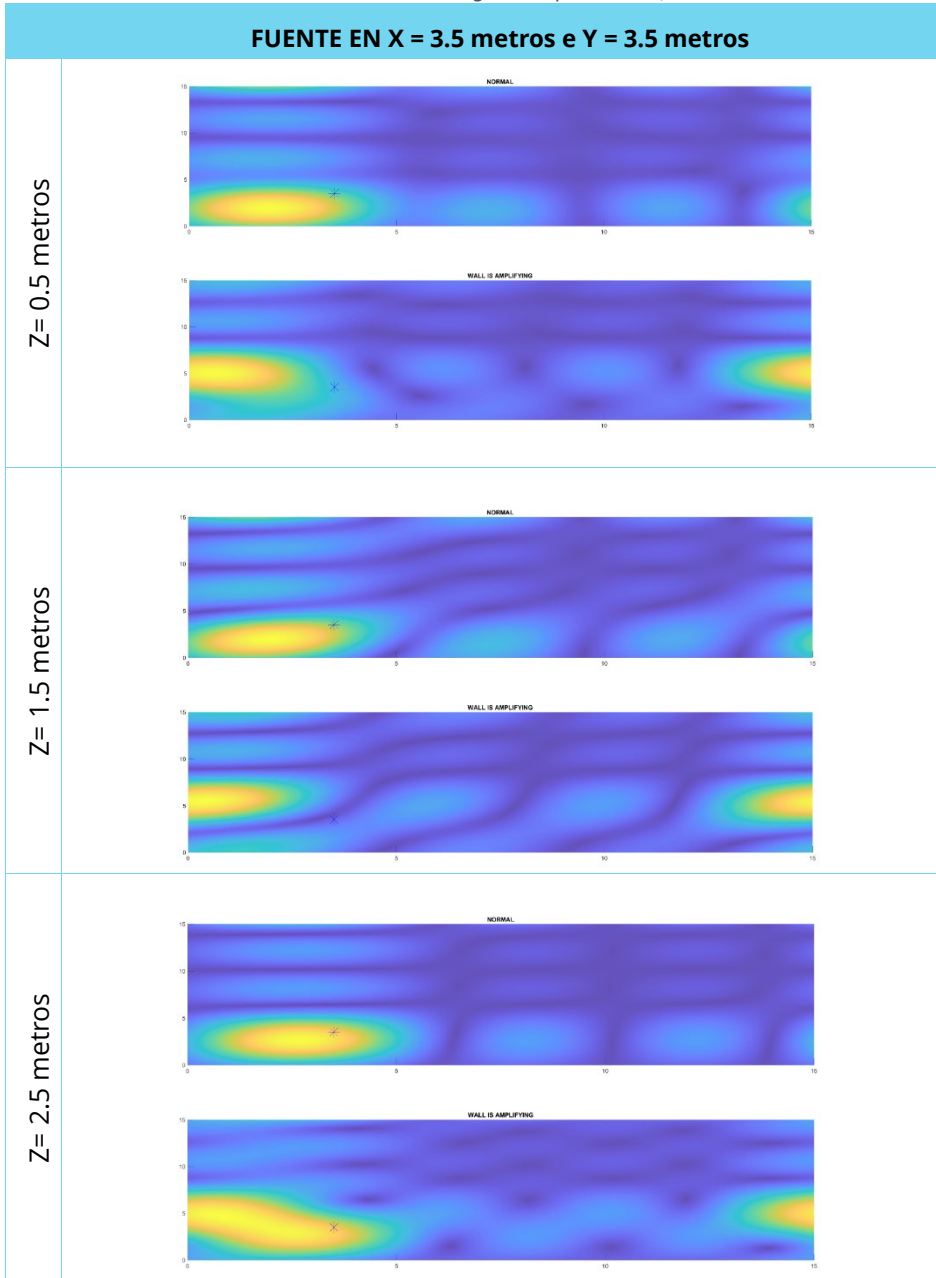


Tabla 13. Resultados del algoritmo para $X=3.5$, $Y=6$

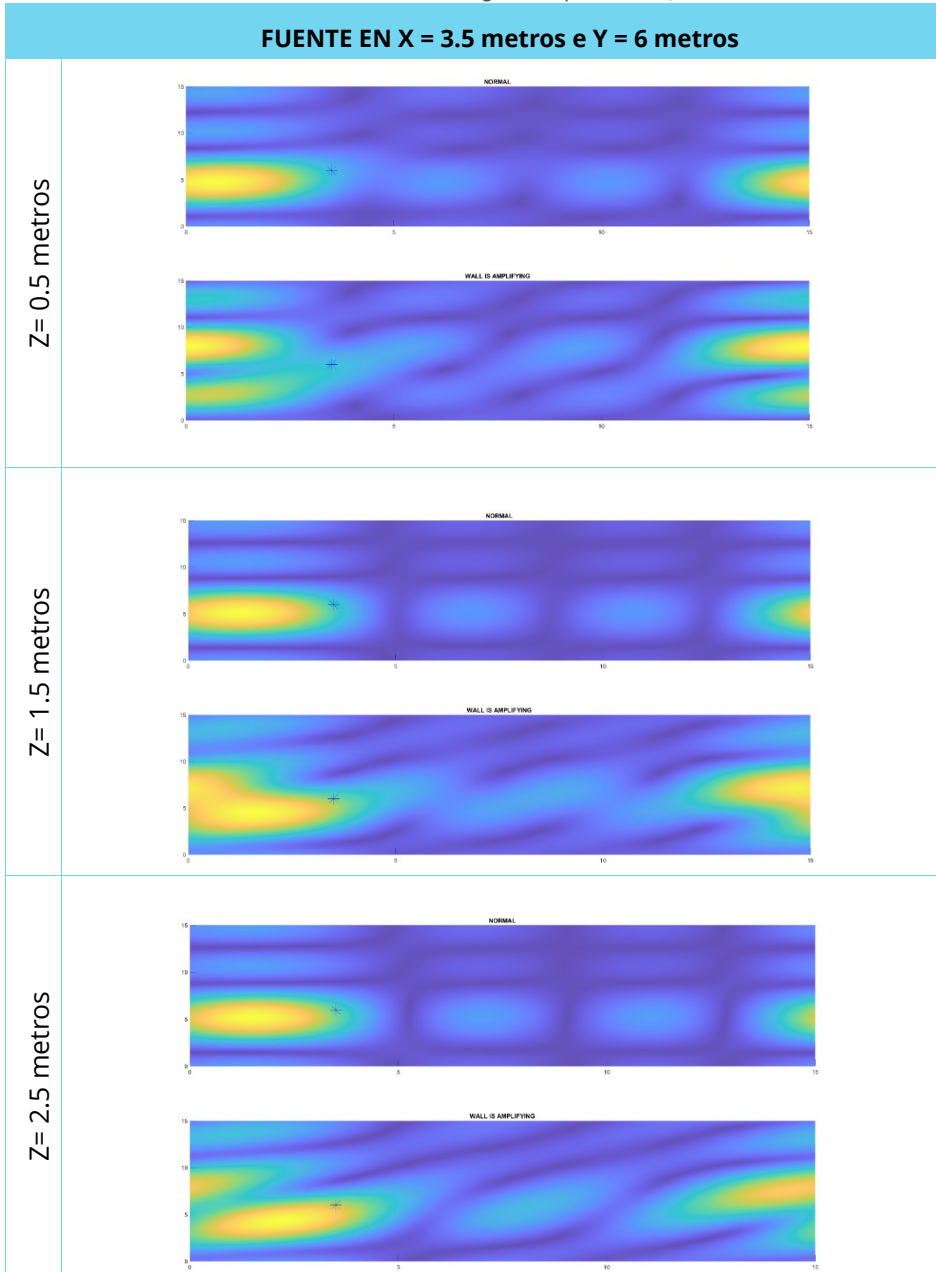


Tabla 14. Resultados del algoritmo para $X=3.5$, $Y=8.5$

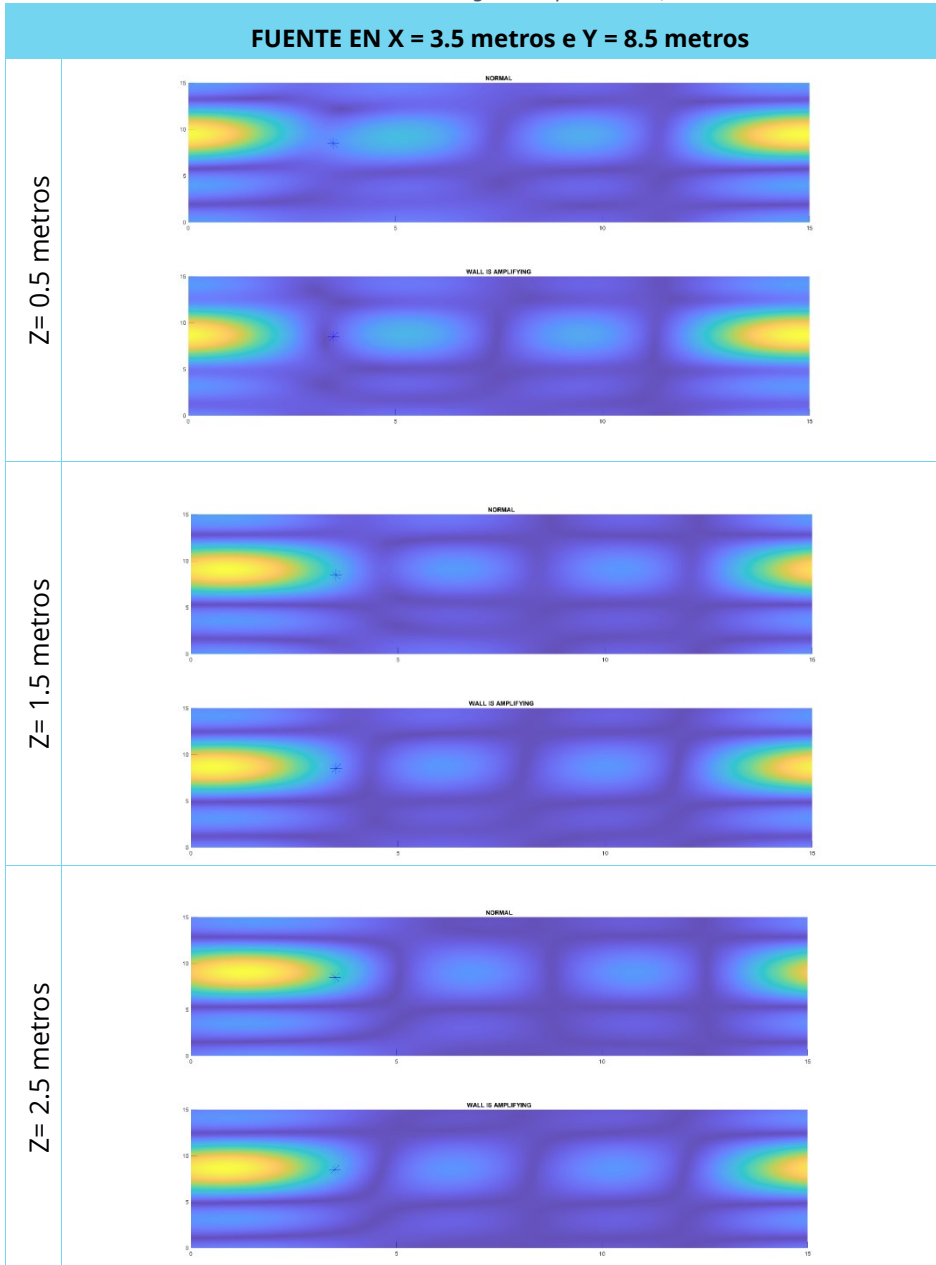


Tabla 15. Resultados del algoritmo para $X=3.5$, $Y=11$

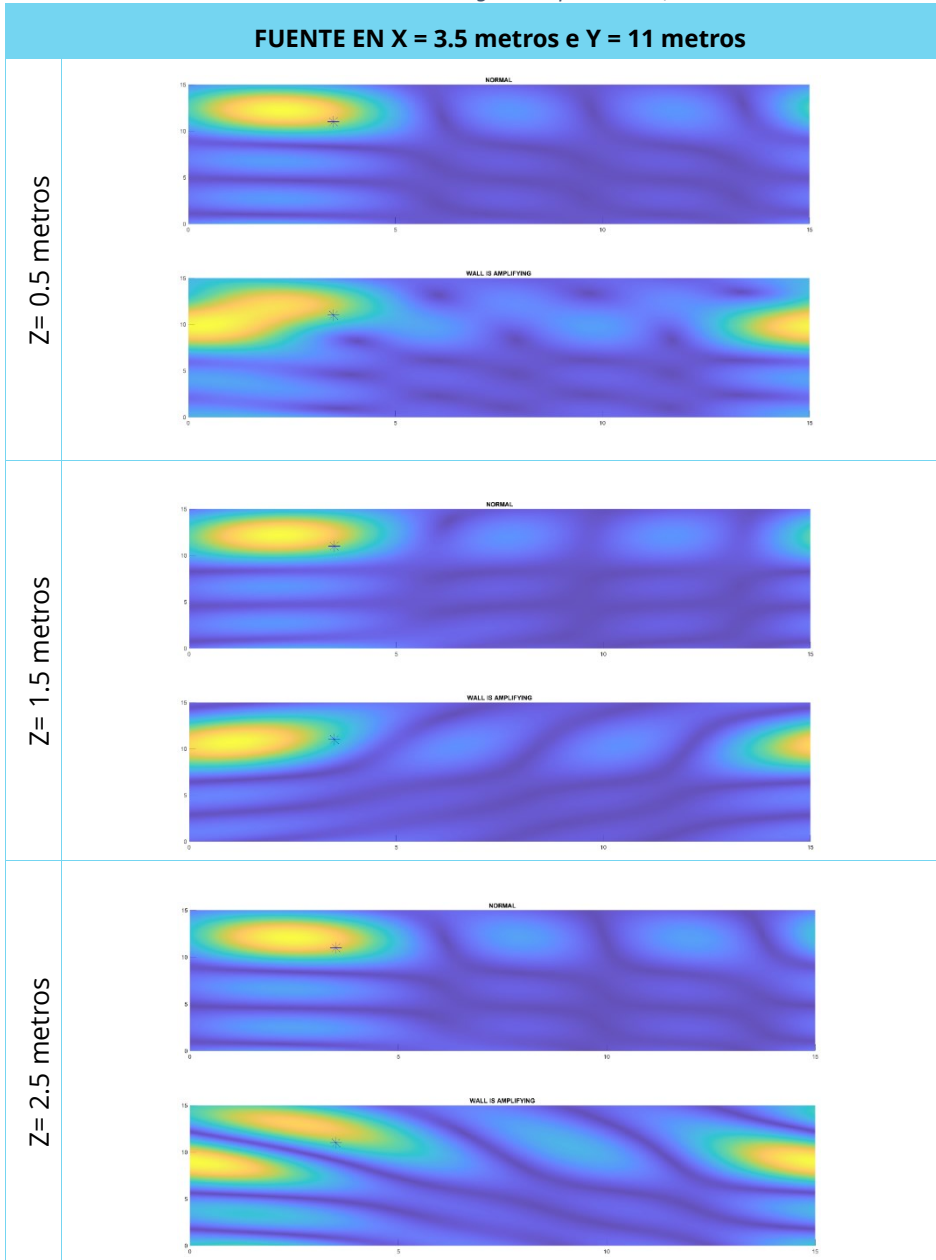


Tabla 16. Resultados del algoritmo para $X=3.5, Y=13$

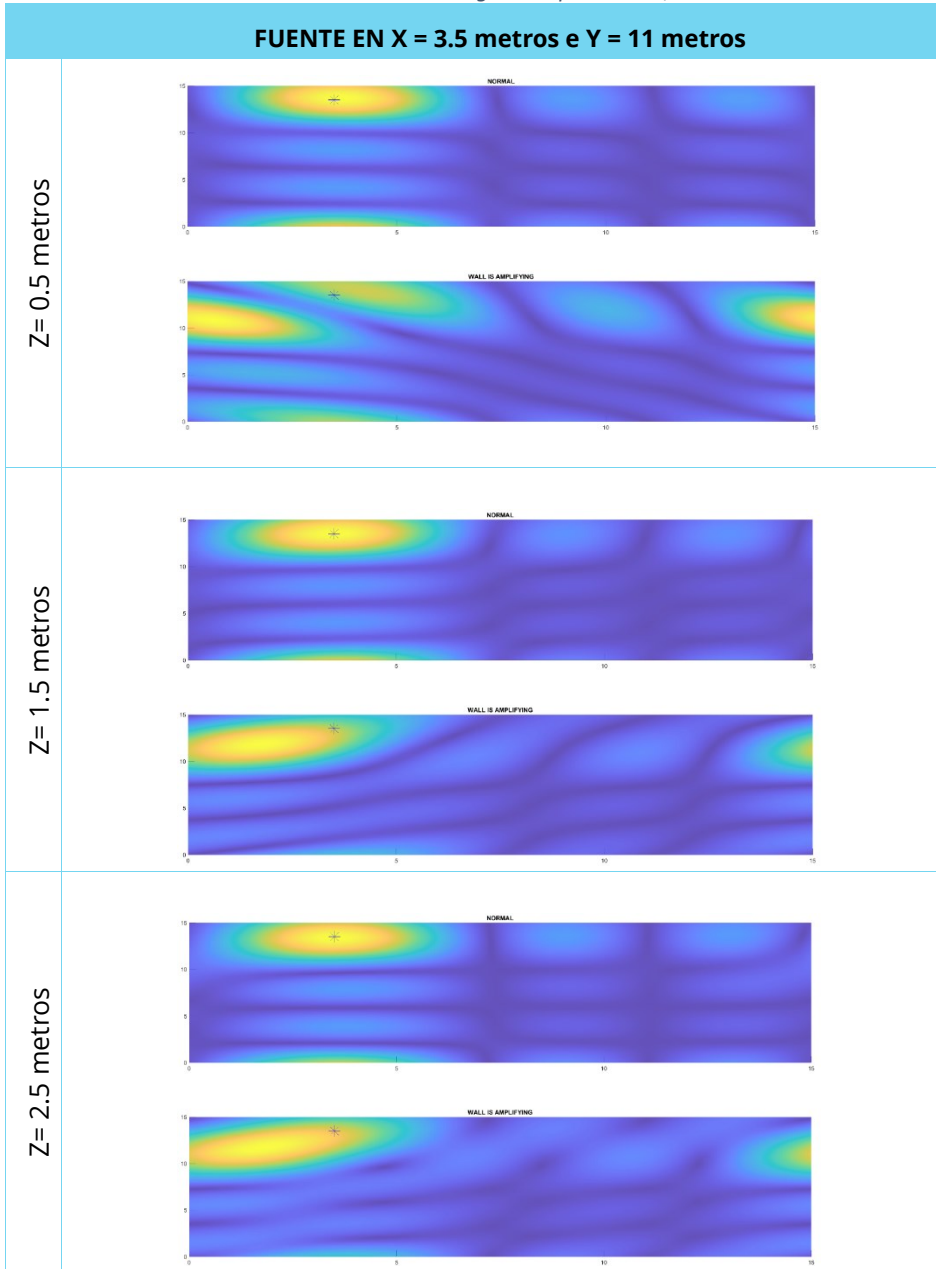


Tabla 17. Resultados del algoritmo para X=6, Y=1

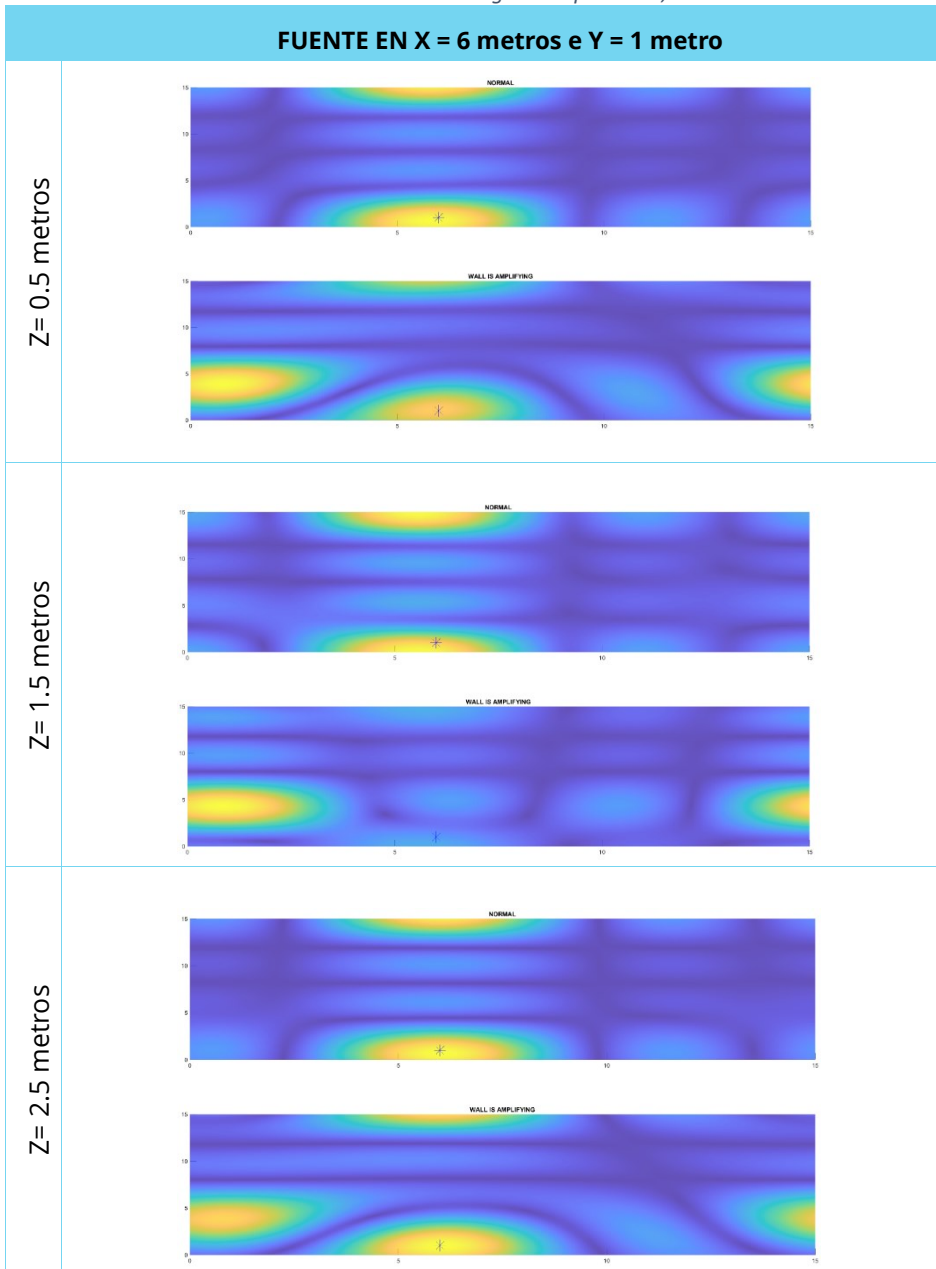


Tabla 18. Resultados del algoritmo para X=6, Y=3.5

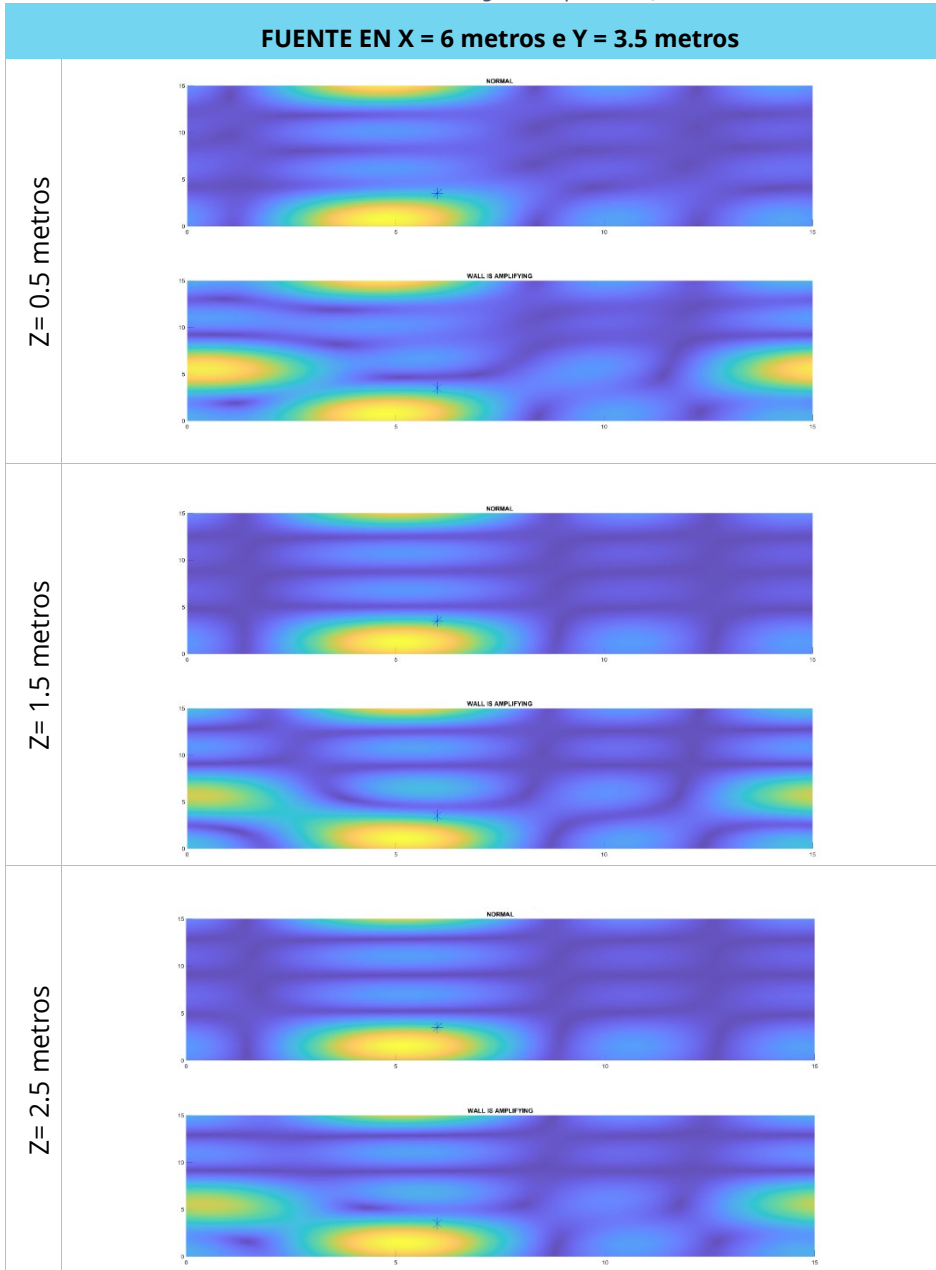


Tabla 19. Resultados del algoritmo para X=6, Y=6

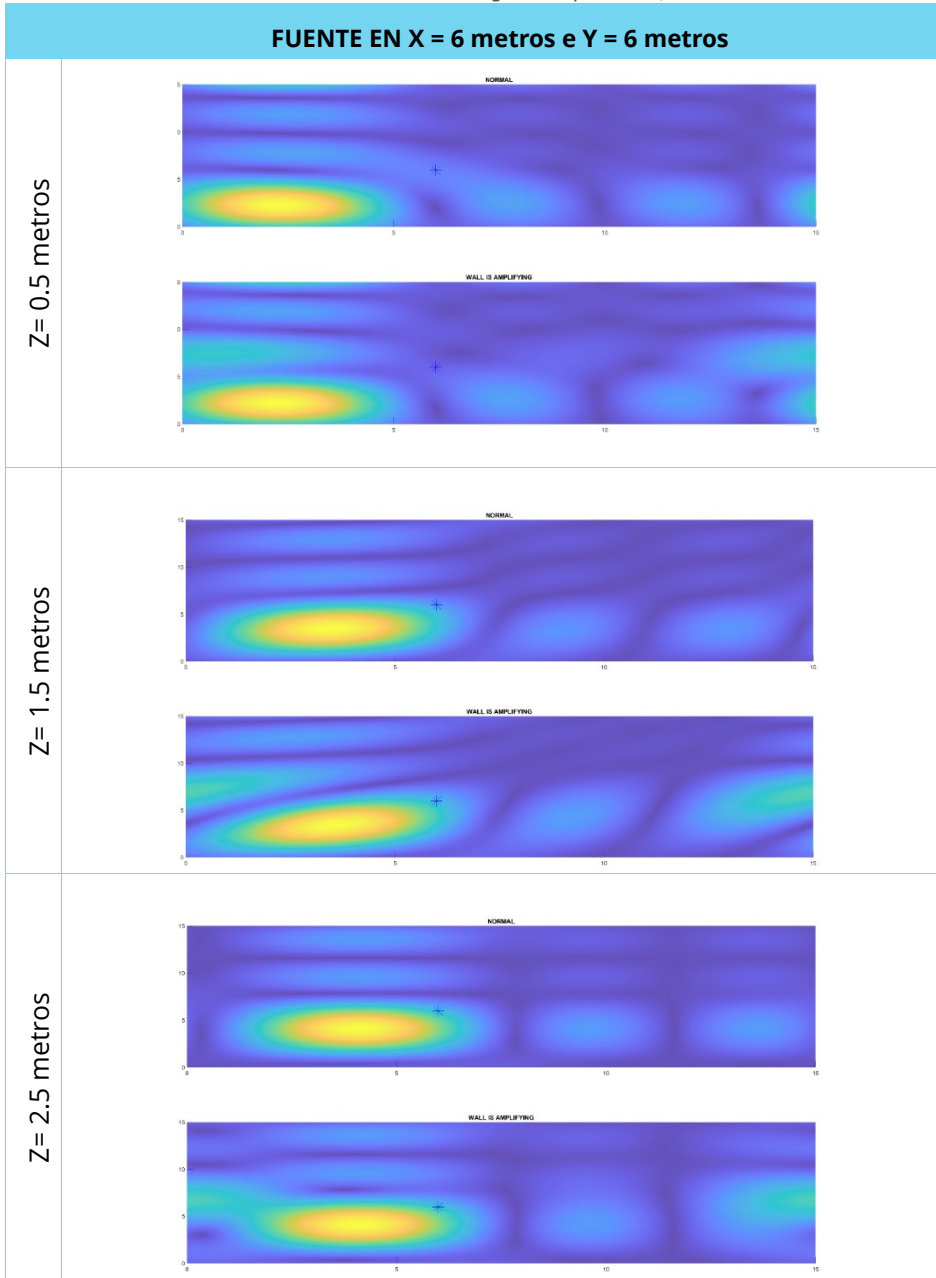


Tabla 20. Resultados del algoritmo para X=6, Y=8.5

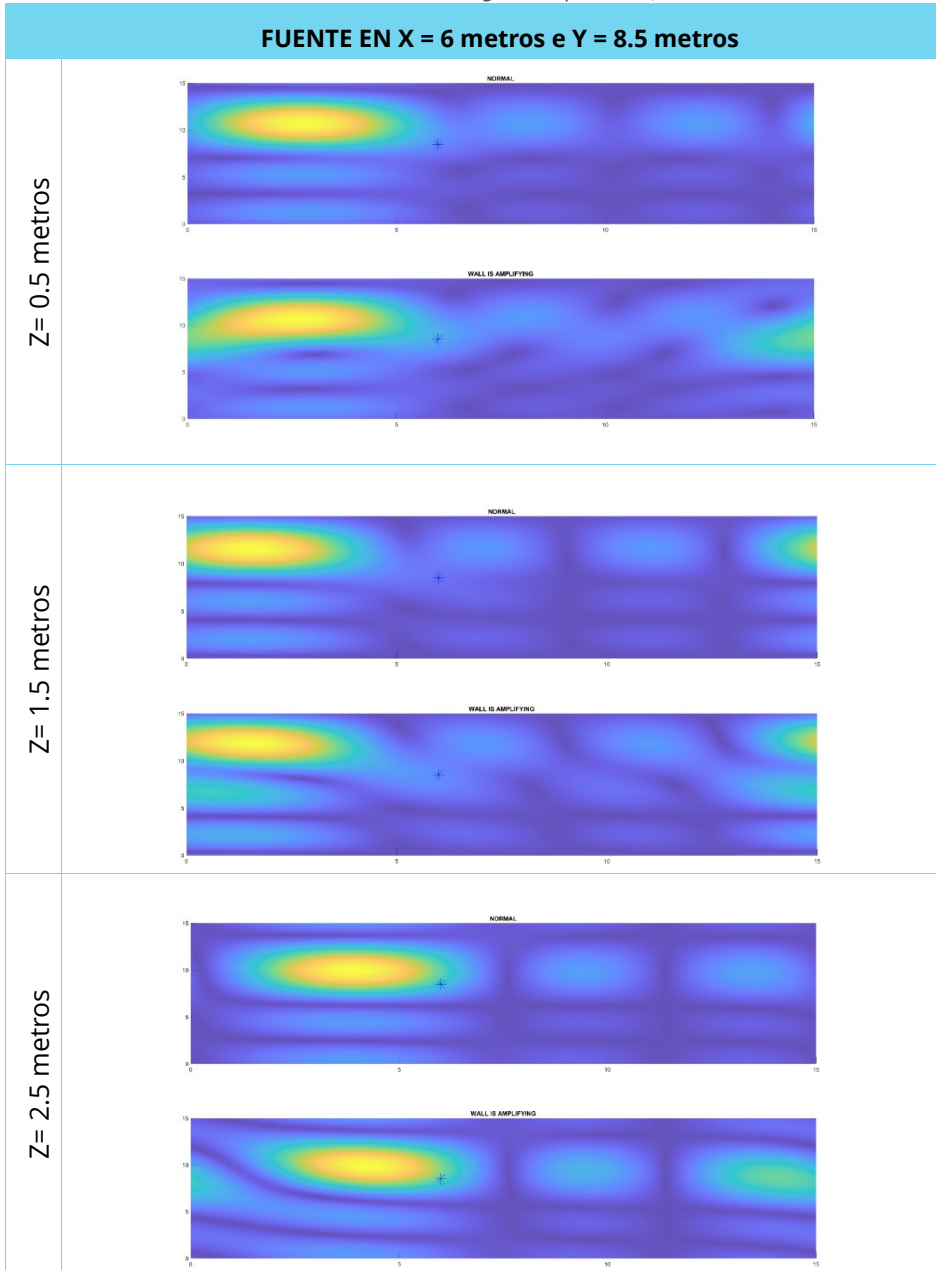


Tabla 21. Resultados del algoritmo para X=6, Y=11

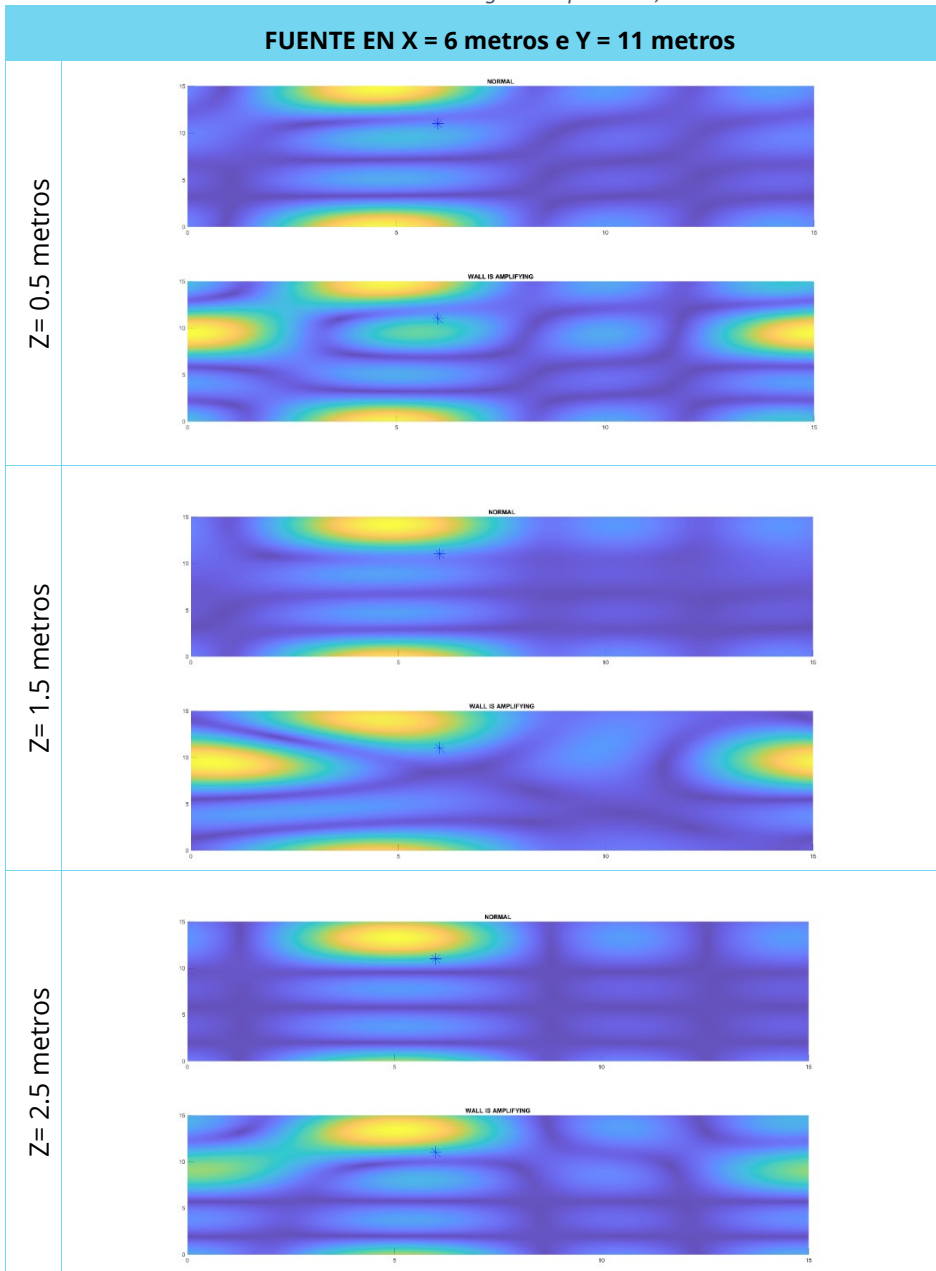


Tabla 22. Resultados del algoritmo para X=6, Y=13.5

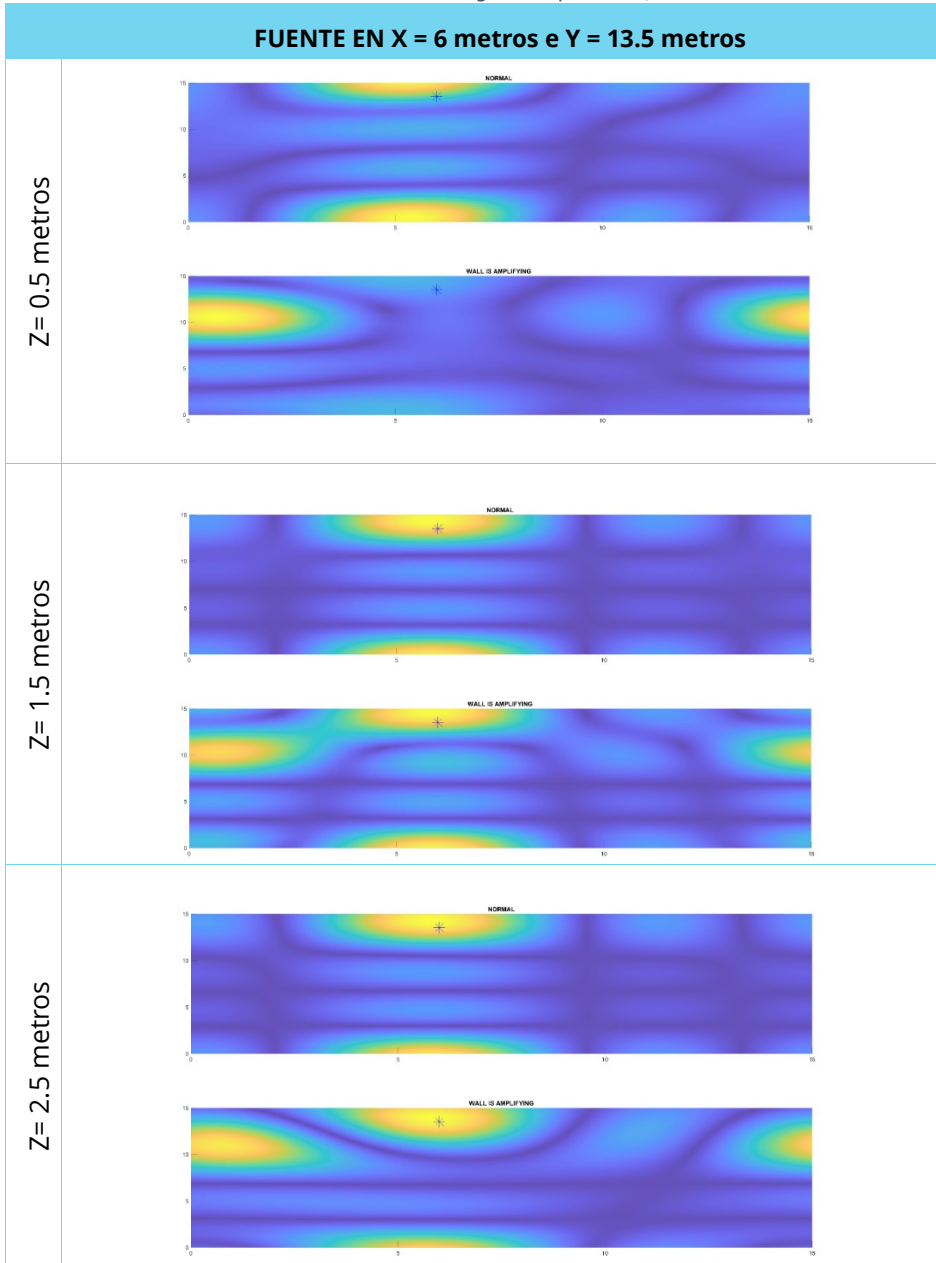


Tabla 23. Resultados del algoritmo para $X=8.5$, $Y=1$

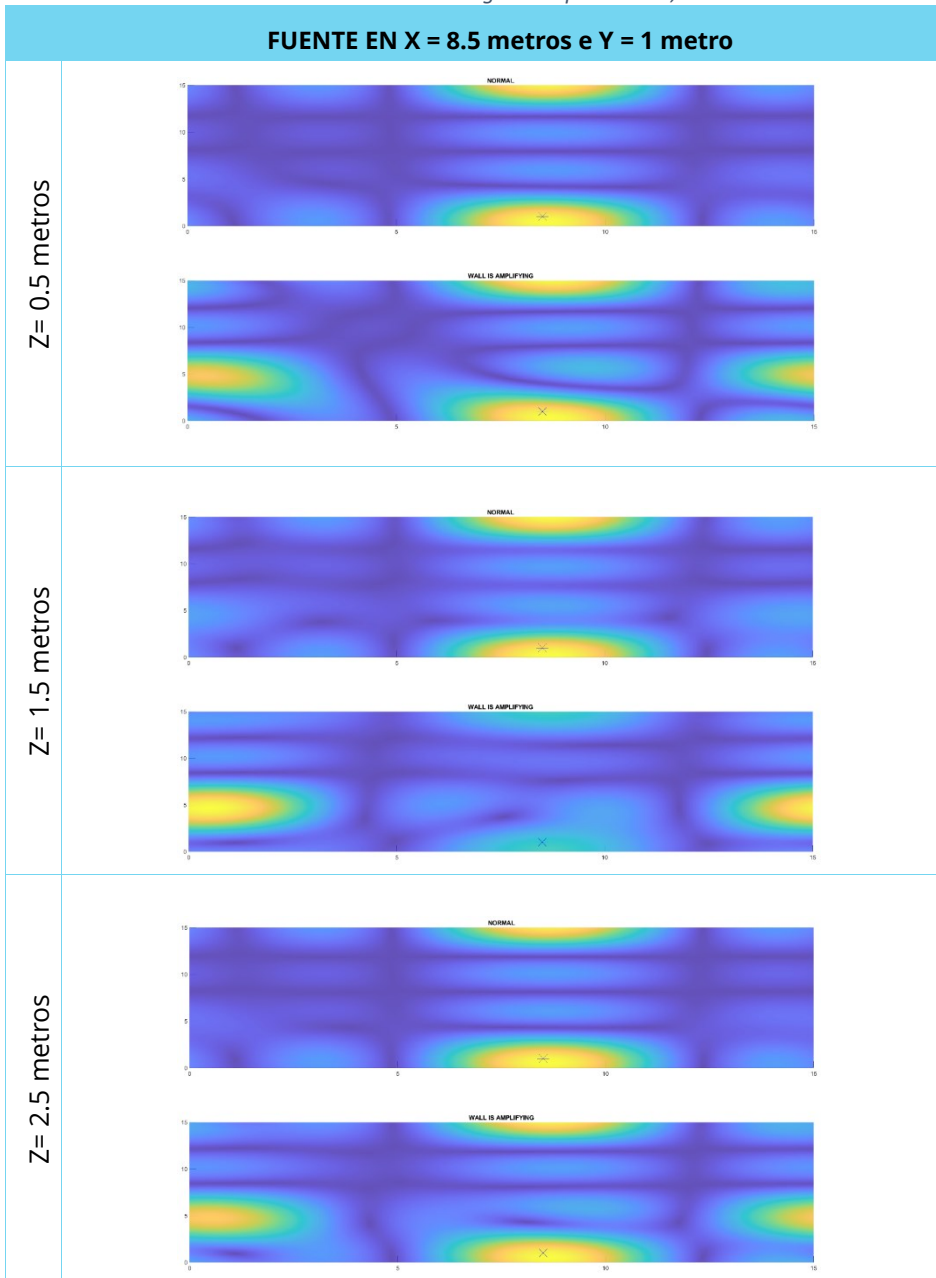


Tabla 24. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=3.5$

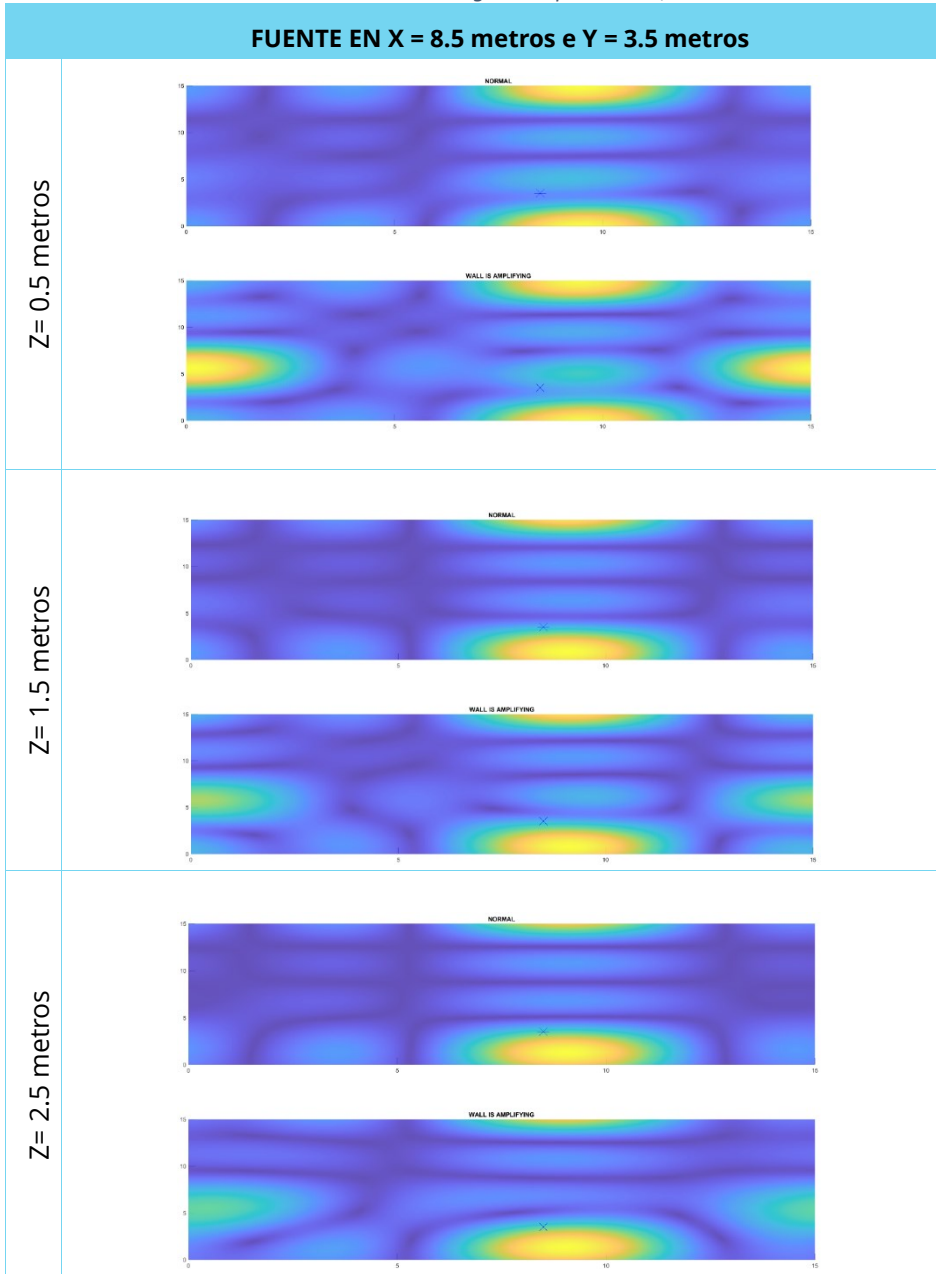


Tabla 25. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=6$

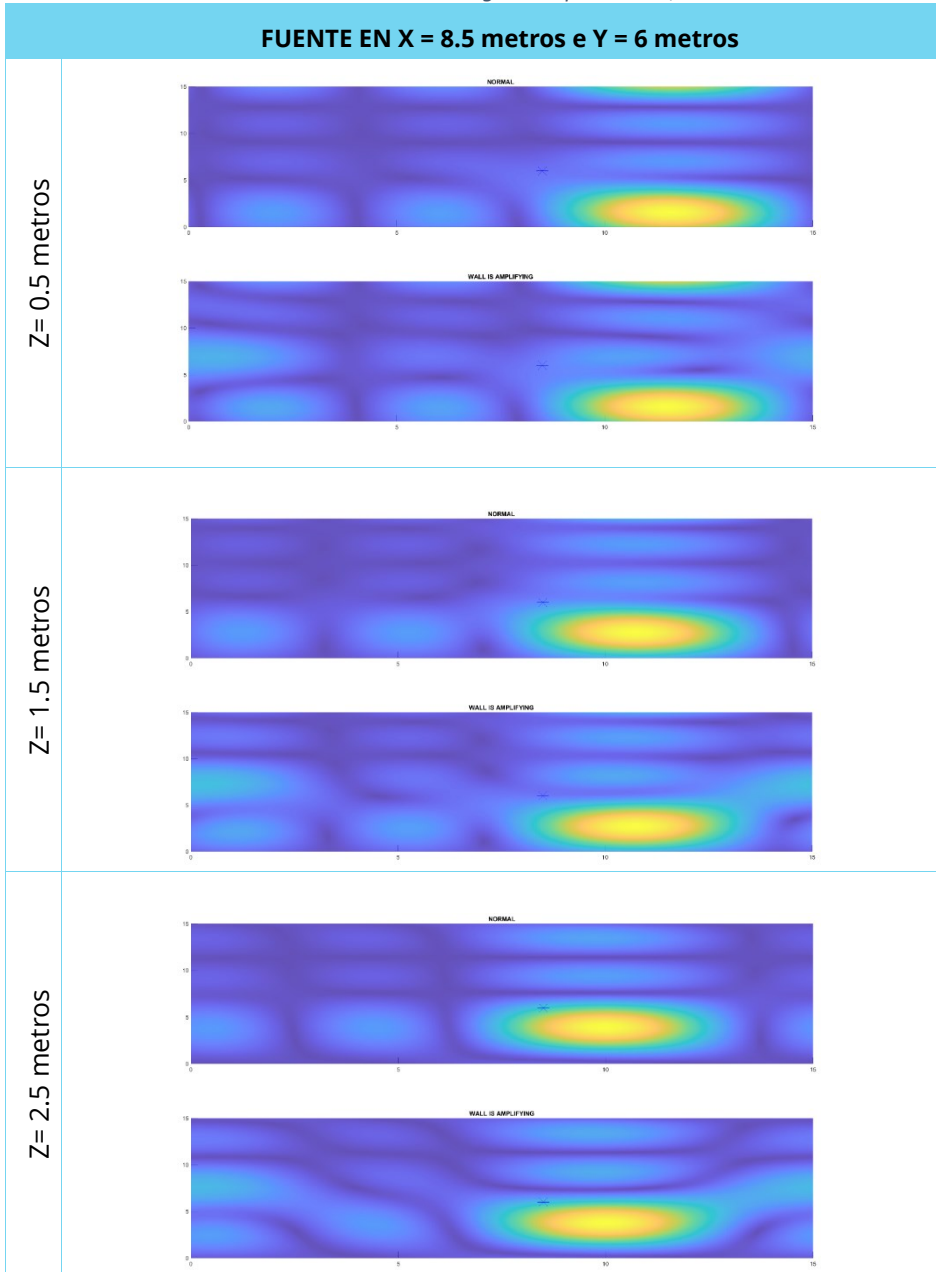


Tabla 26. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=8.5$

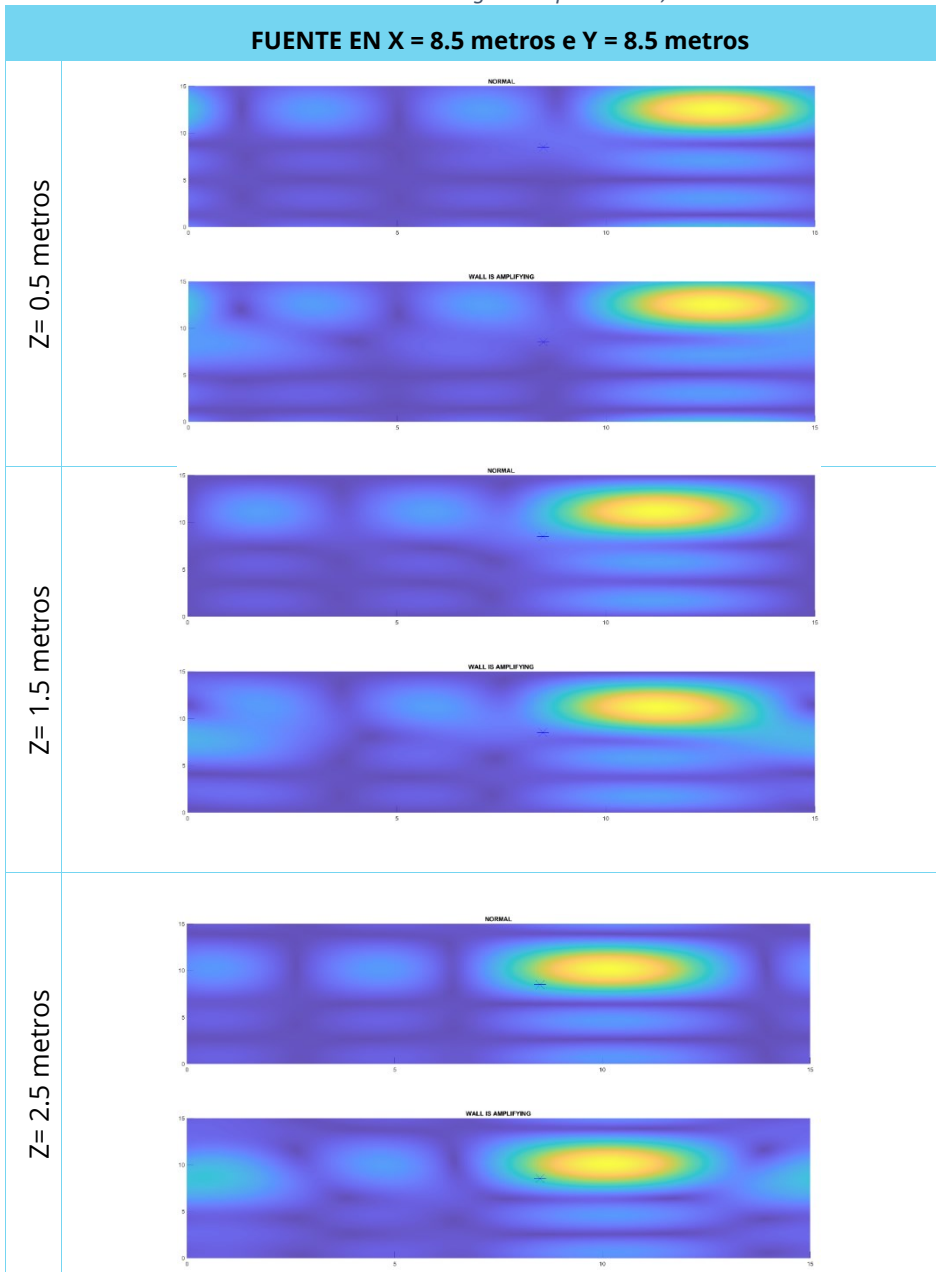


Tabla 27. Resultados del algoritmo para $X=8.5$, $Y=11$

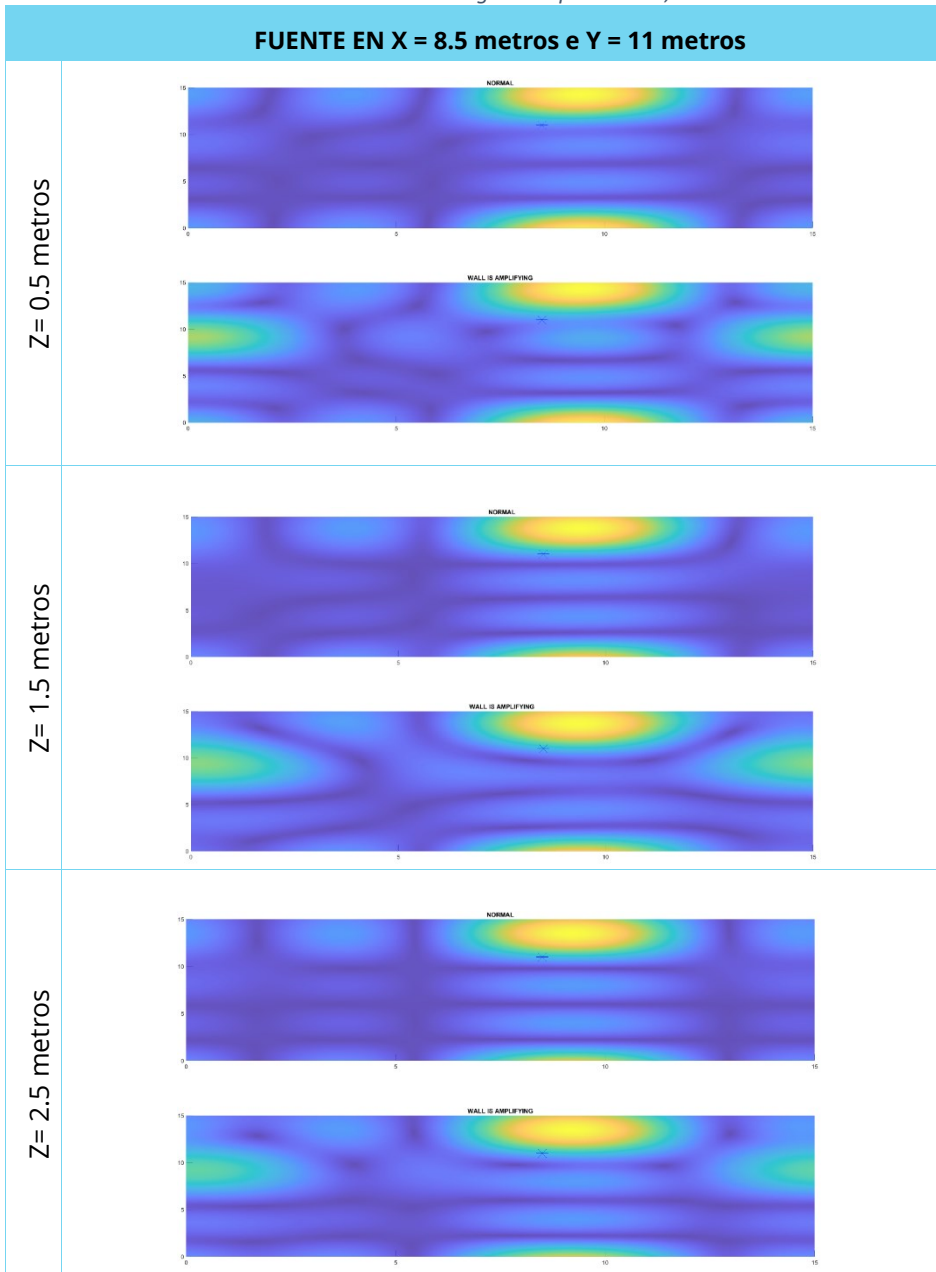


Tabla 28. Resultados del algoritmo para $X=8.5, Y=13.5$

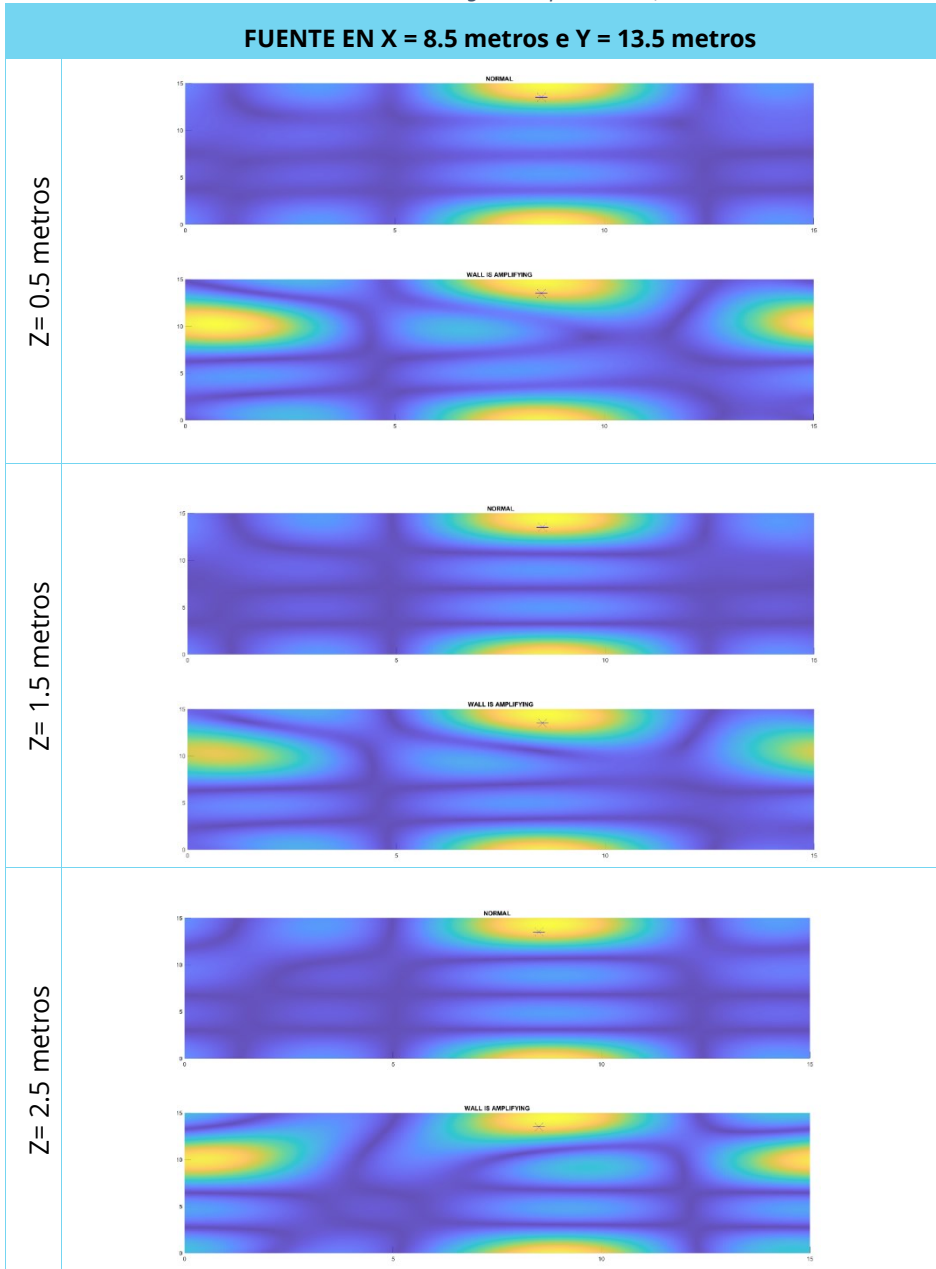


Tabla 29. Resultados del algoritmo para $X=11$, $Y=1$

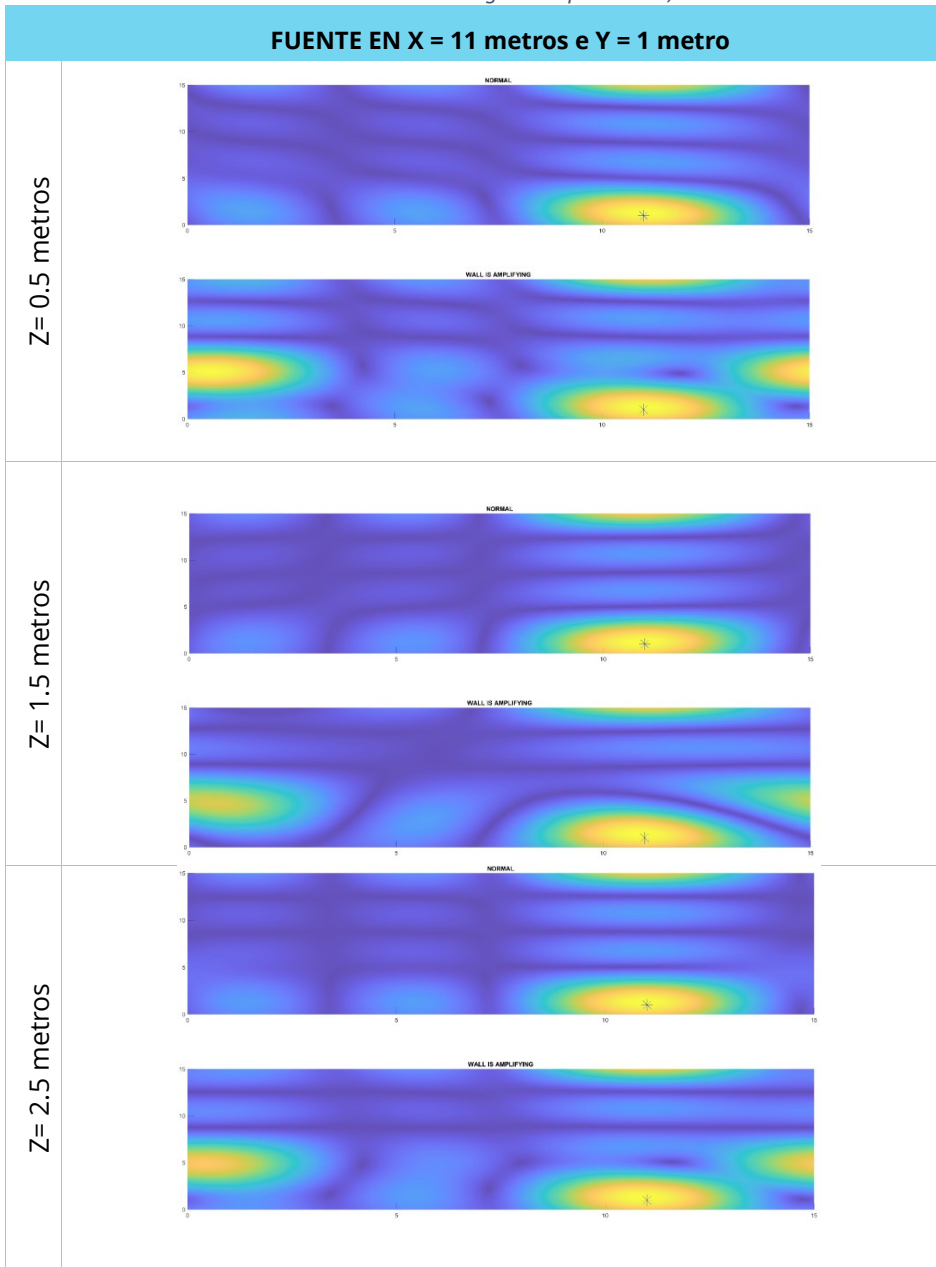


Tabla 30. Resultados del algoritmo para X=11, Y=3.5

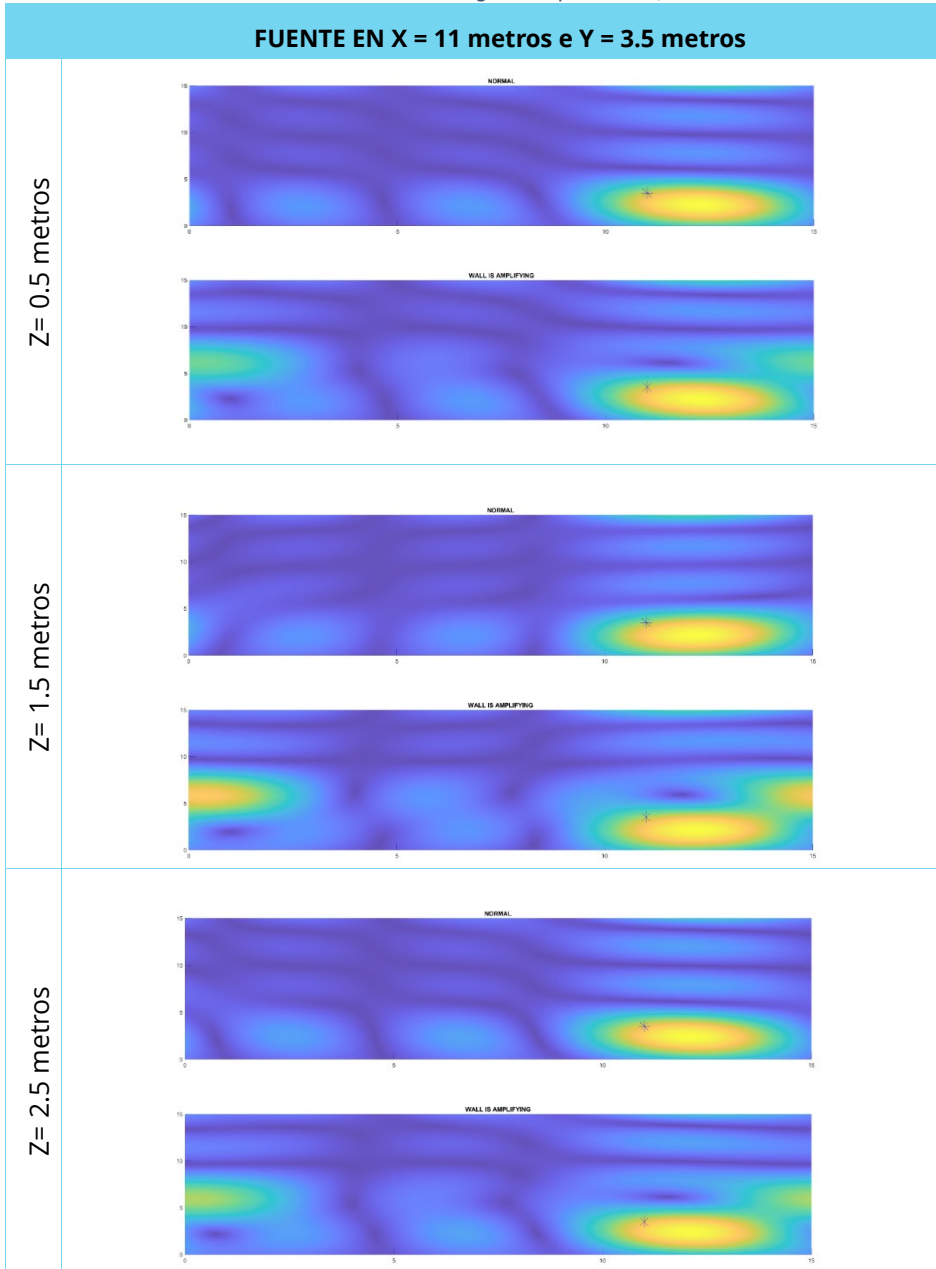


Tabla 31. Resultados del algoritmo para X=11, Y=6

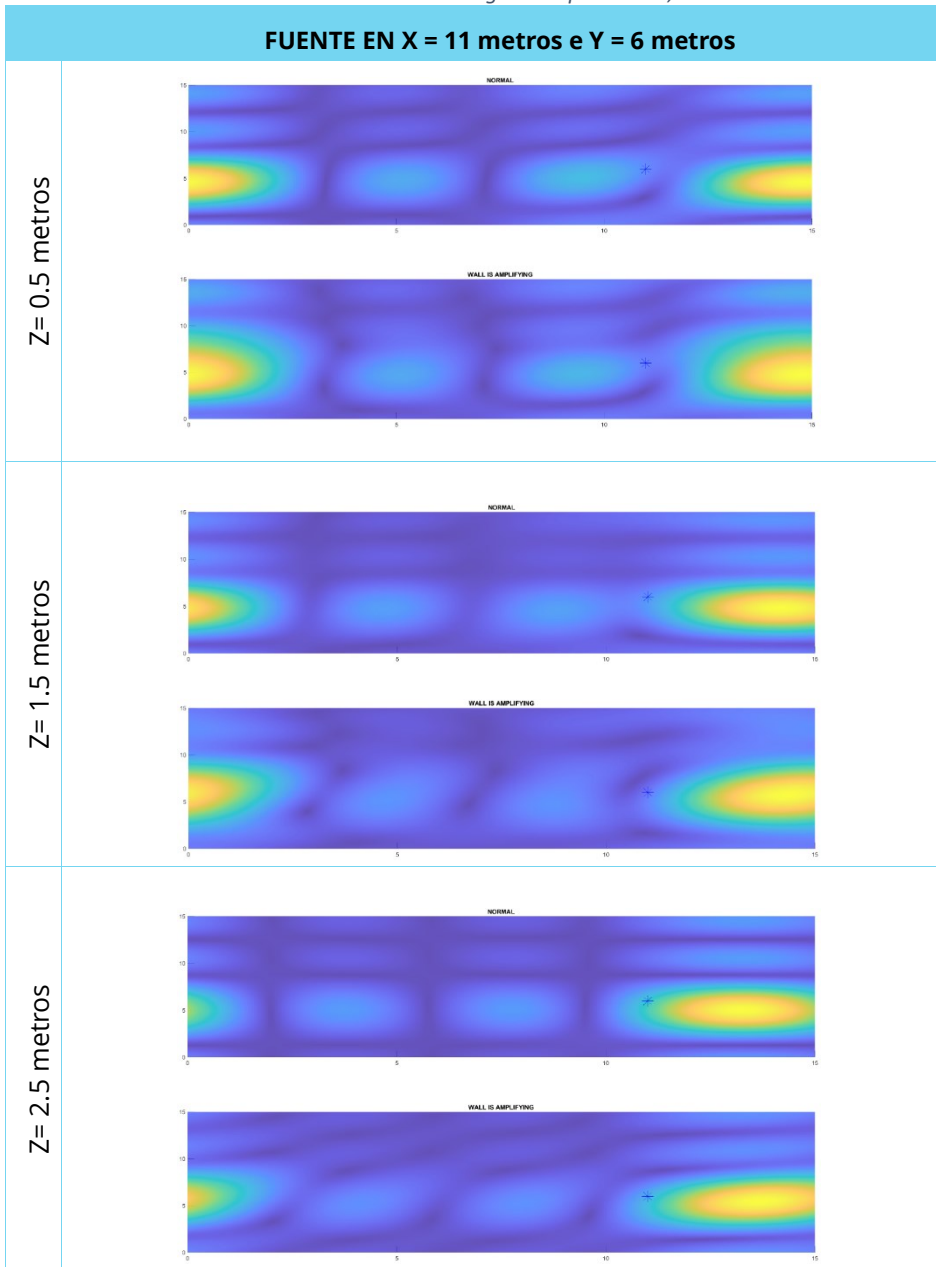


Tabla 32. Resultados del algoritmo para $X=11, Y=8.5$

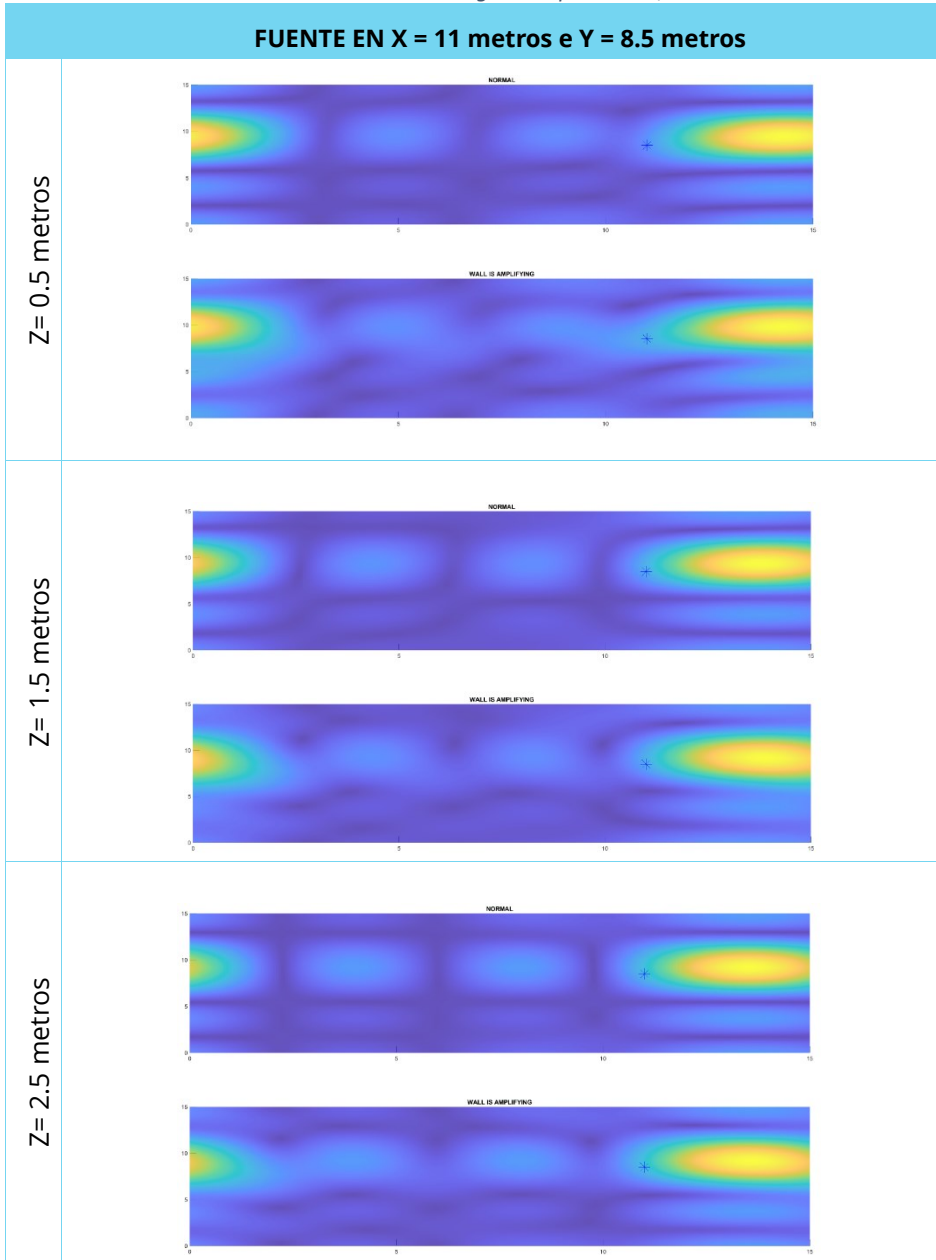


Tabla 33. Resultados del algoritmo para X=11, Y=11

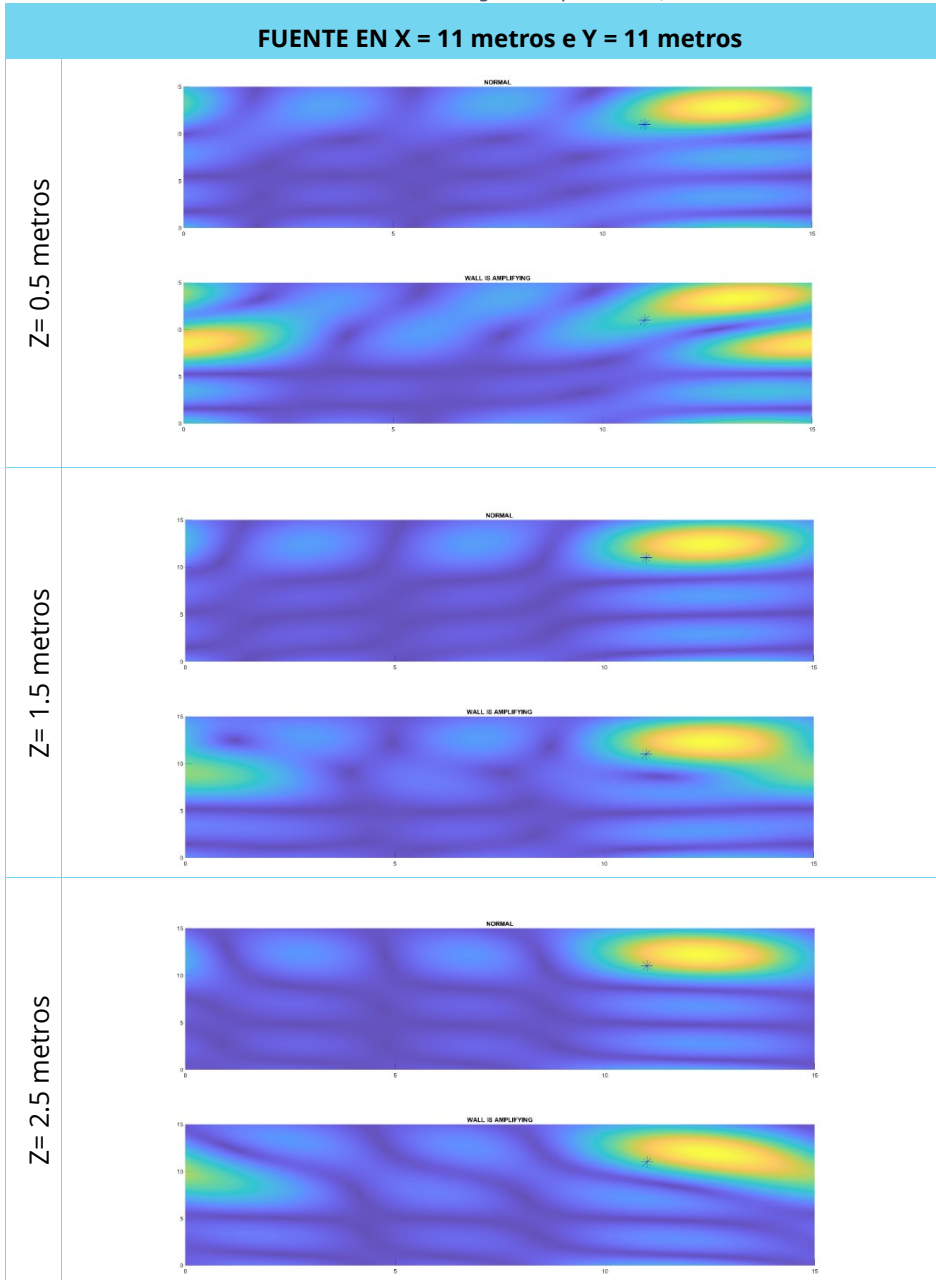


Tabla 34. Resultados del algoritmo para X=11, Y=13.5

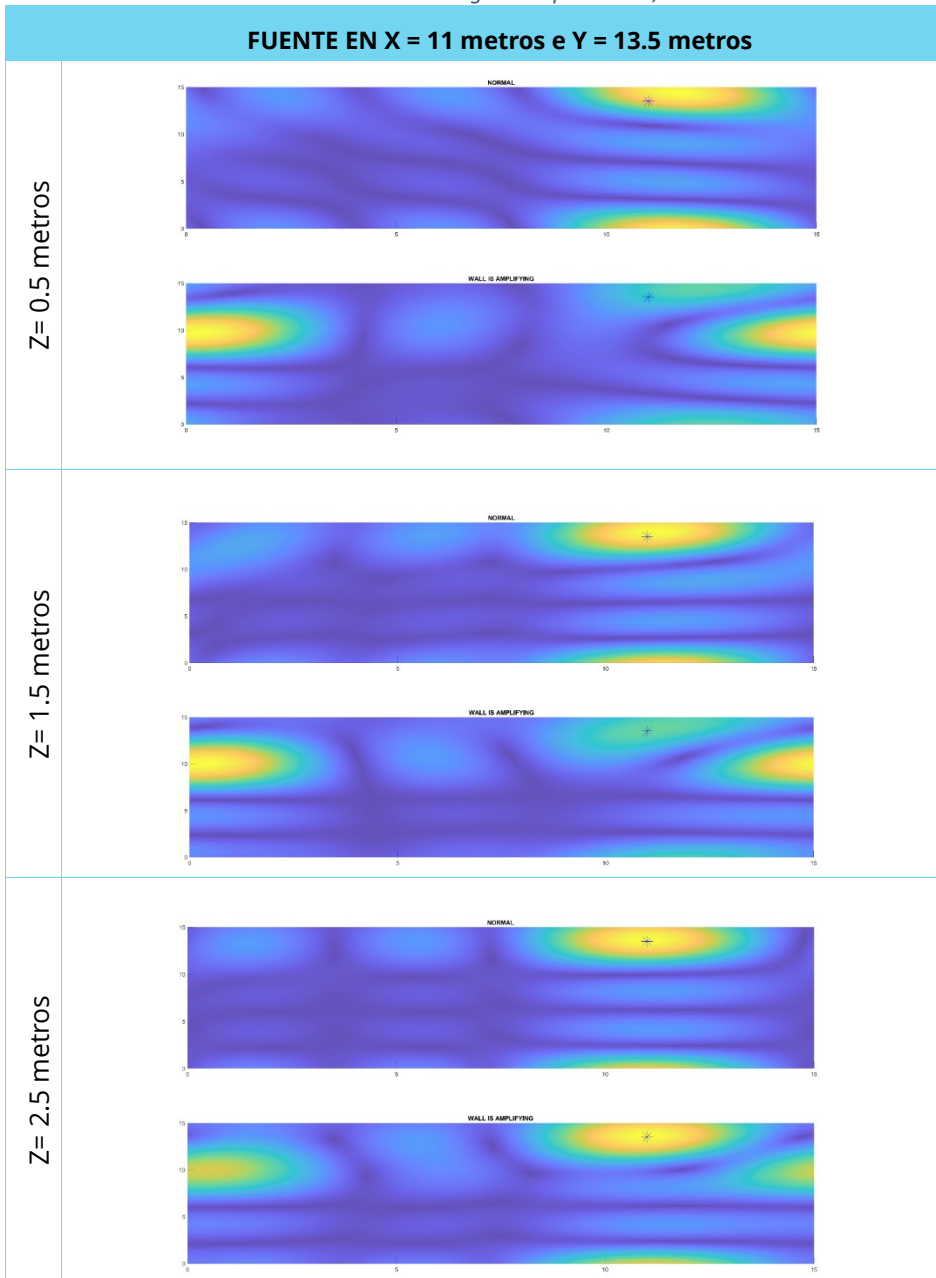


Tabla 35. Resultados del algoritmo para $X=13.5$, $Y=1$

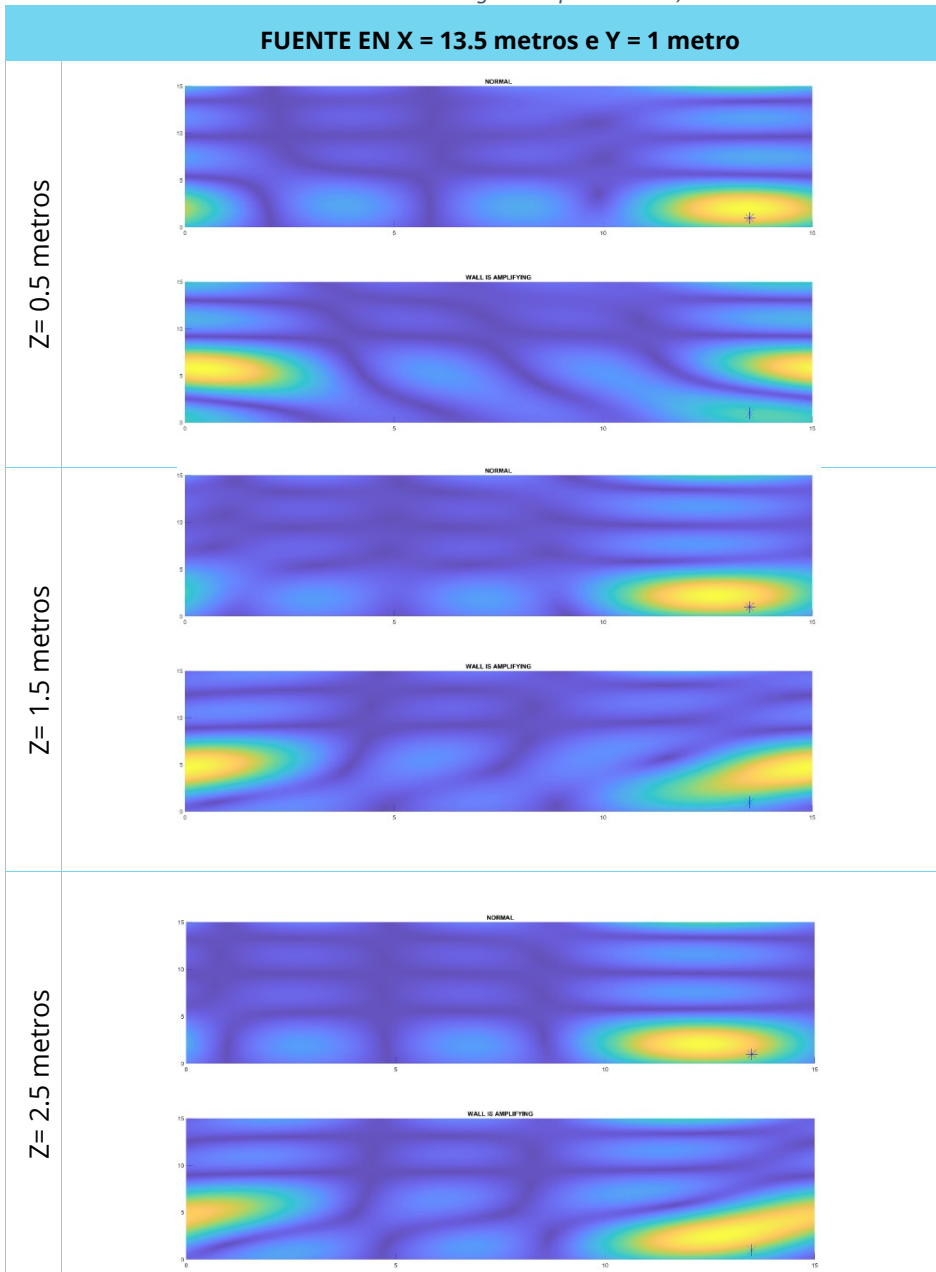


Tabla 36. Resultados del algoritmo para $X=13.5$, $Y=3.5$

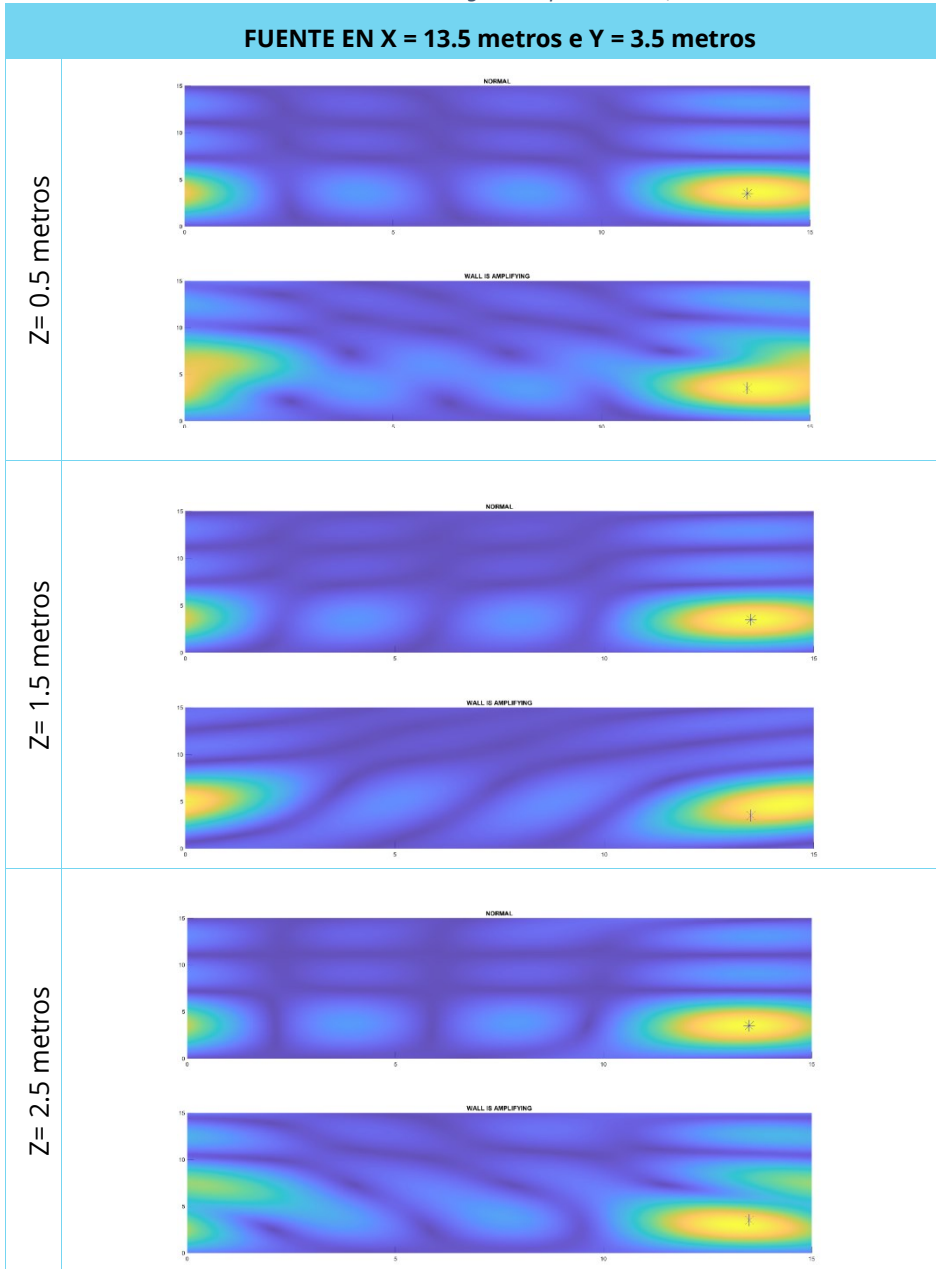


Tabla 37. Resultados del algoritmo para X=13.5, Y=6

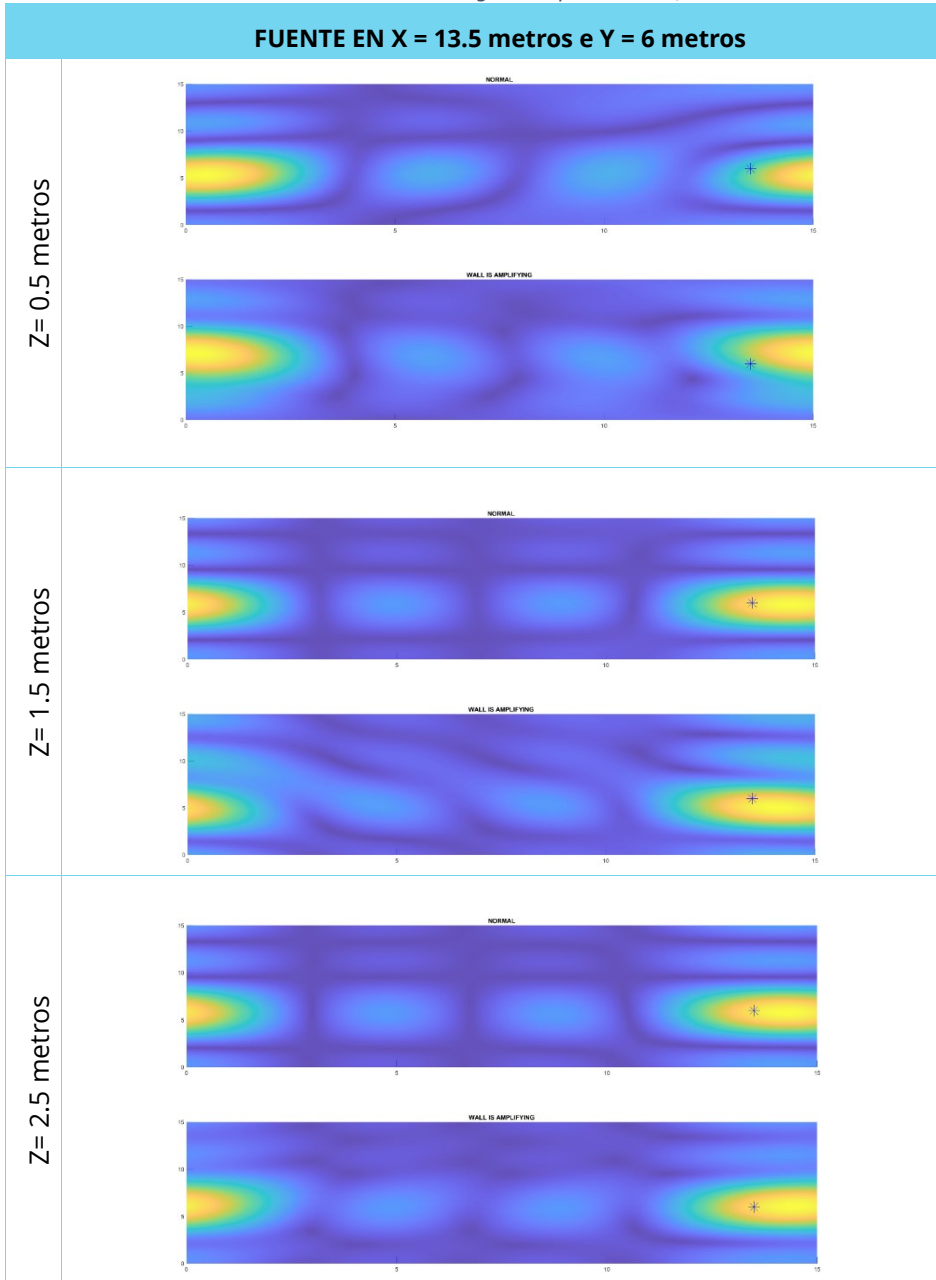


Tabla 38. Resultados del algoritmo para $X=13.5$, $Y=8.5$

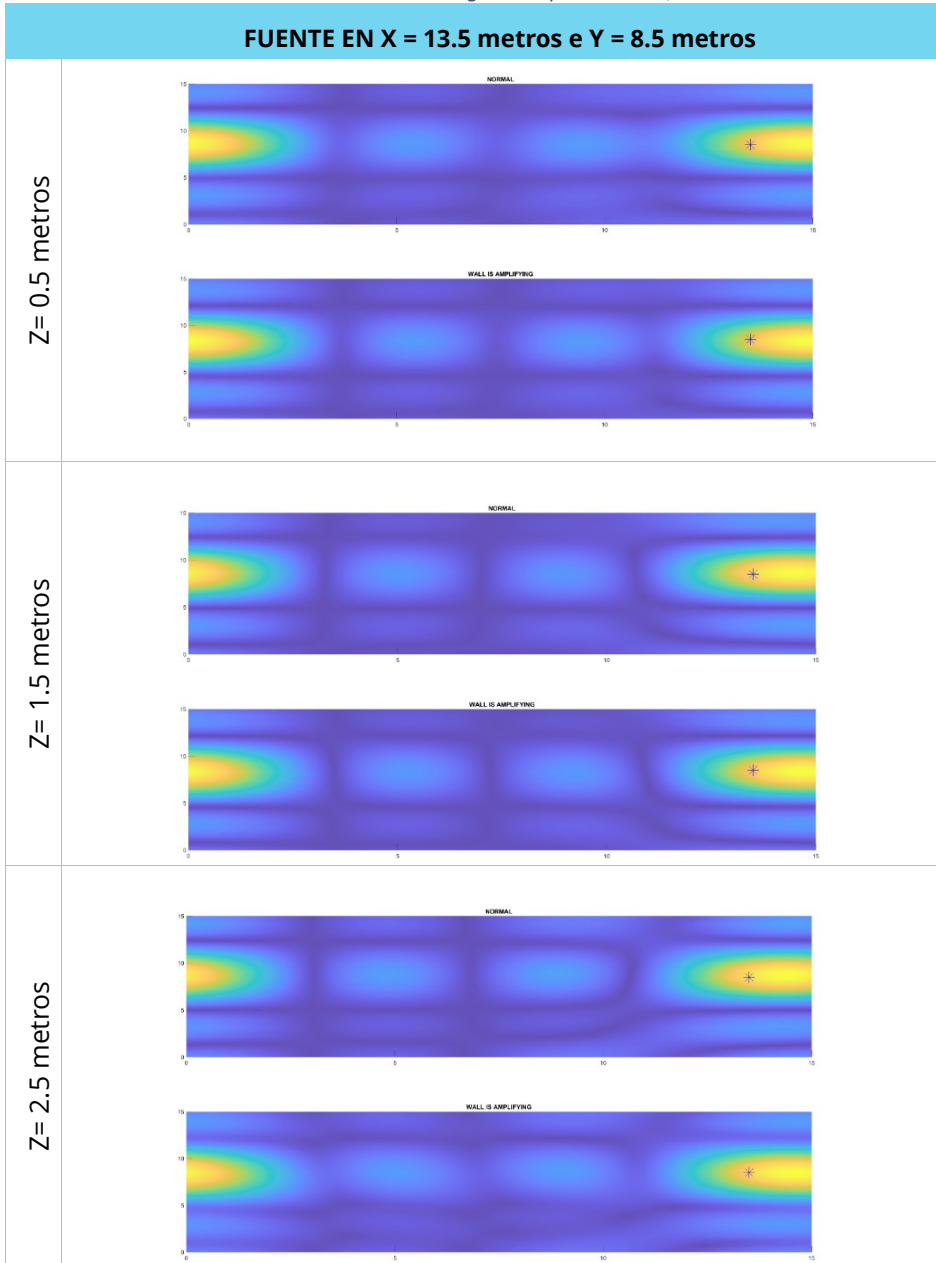


Tabla 39. Resultados del algoritmo para X=13.5, Y=11

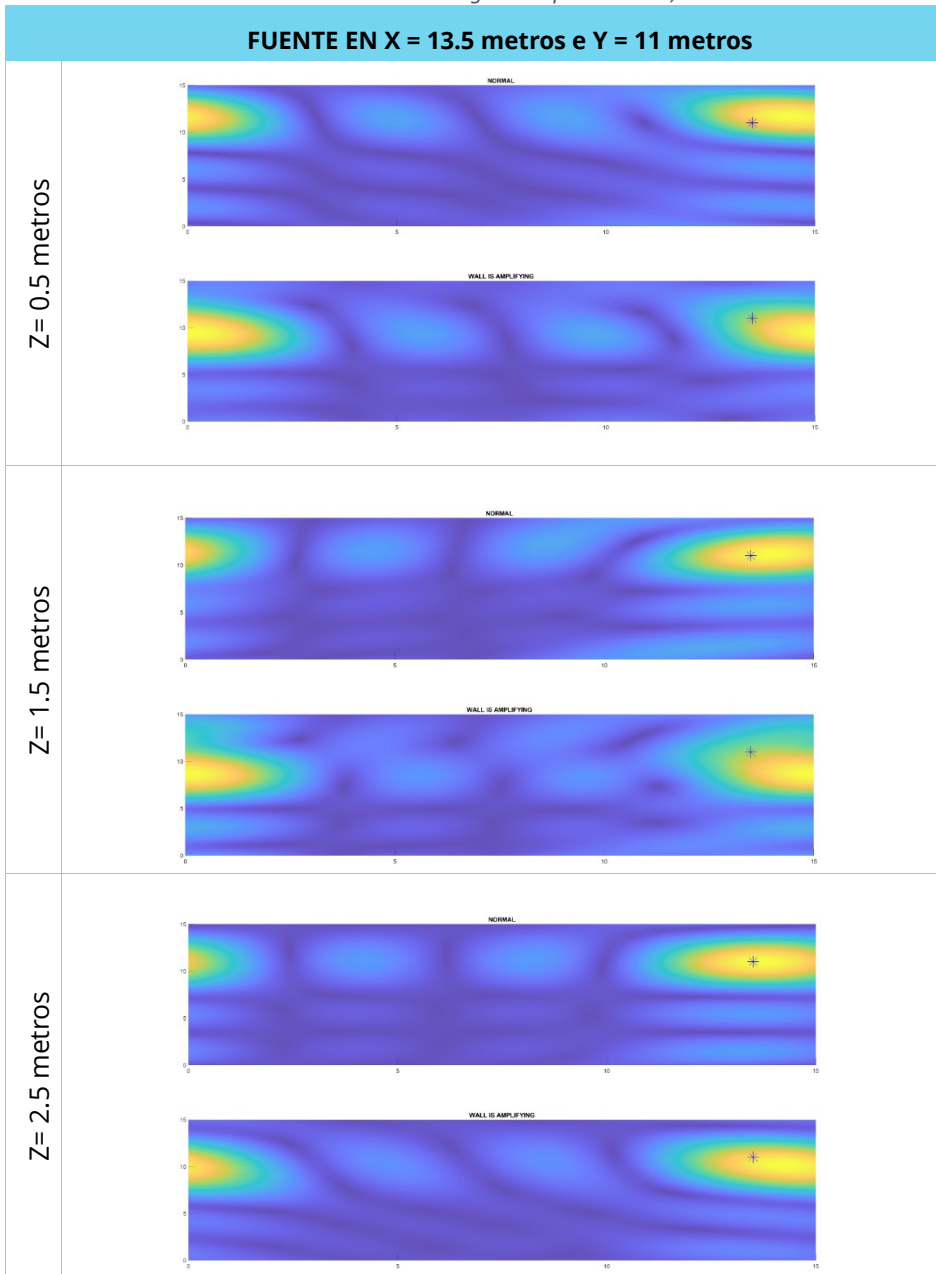
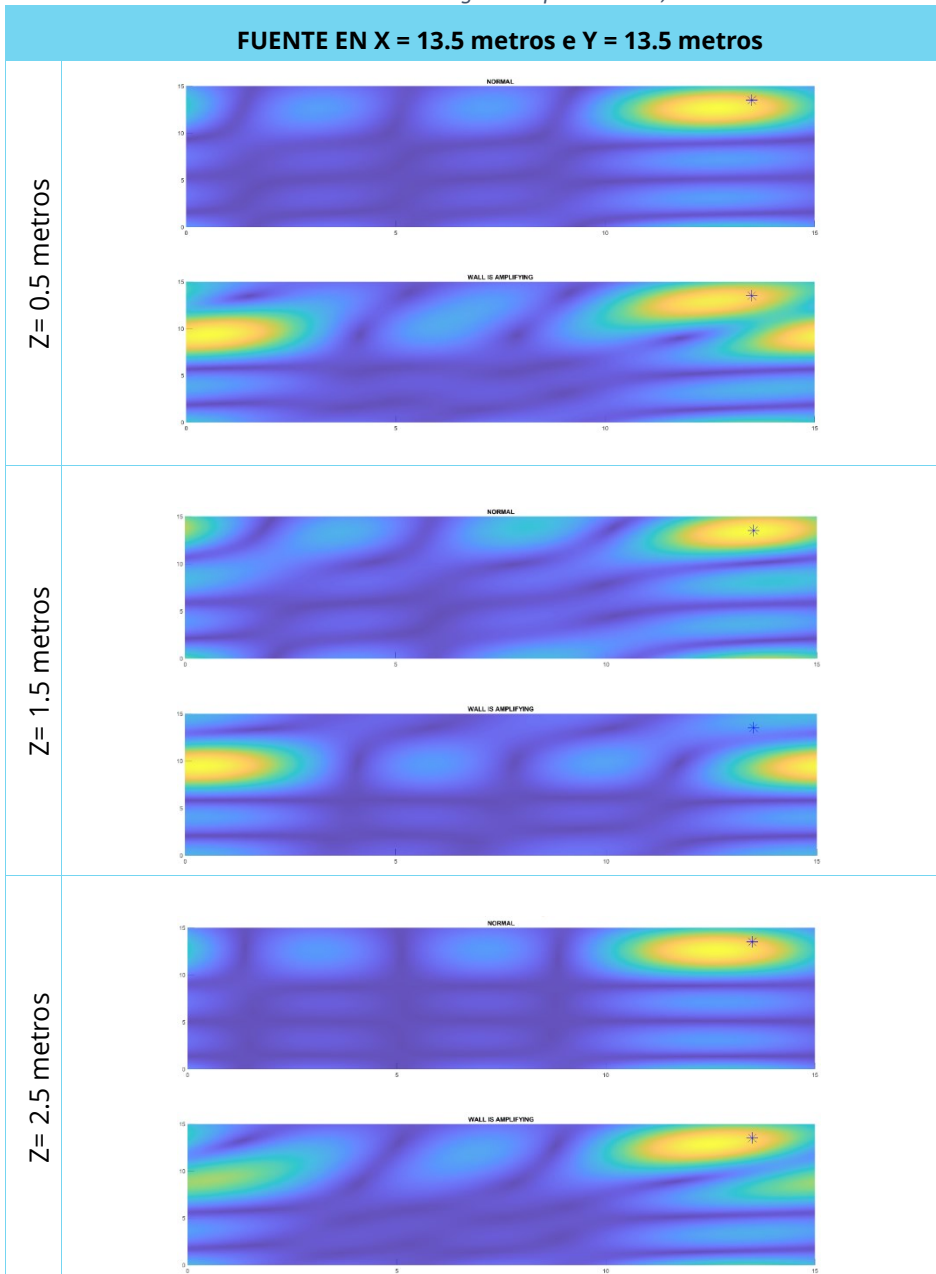


Tabla 40. Resultados del algoritmo para $X=13.5, Y=13.5$



En la siguiente tabla se puede observar un resumen de los datos presentados anteriormente:

Tabla 41. Resumen de resultados del algoritmo para distintas posiciones

Tipo de resultado	N.º de casos	
El algoritmo funciona correctamente (error < 1 metro)	66	63%
El algoritmo presenta fallos menores (error entre 1 y 2 metros)	12	11%
El algoritmo presenta fallos mayores (error mayor a 2 metros)	27	26%

A modo resumen, cabe destacar que no hay una zona concreta ni patrón de posición en el que se detecten la mayoría de los resultados fallidos, si bien es cierto que tienen algunas similitudes que se detallan en el siguiente apartado de conclusiones. Los resultados que cumplen con el comportamiento esperado del algoritmo a nivel teórico (a nivel práctico se puede observar en el capítulo 7) son el 63%, mientras que los fallos menos relevantes son el 11% de las pruebas y los más críticos el 26%.

No resultan alarmantes estos datos porque se considera que hay margen de mejora. Se está analizando el funcionamiento base del algoritmo y cabe recordar que hay etapas anteriores y posteriores de filtrado y procesado de datos que mejorarán estos porcentajes con total seguridad.

5.5. Conclusiones

En los primeros resultados se observa como el rayo reflejado (en la pared izquierda; $X = 1$) no afecta prácticamente al resultado, ya que la FFT presenta una distribución similar. Esto es debido a que la fuente se encuentra muy cerca de donde se produce la reflexión no atenuada, por lo que el ángulo de procedencia del rayo directo y el reflejado es similar.

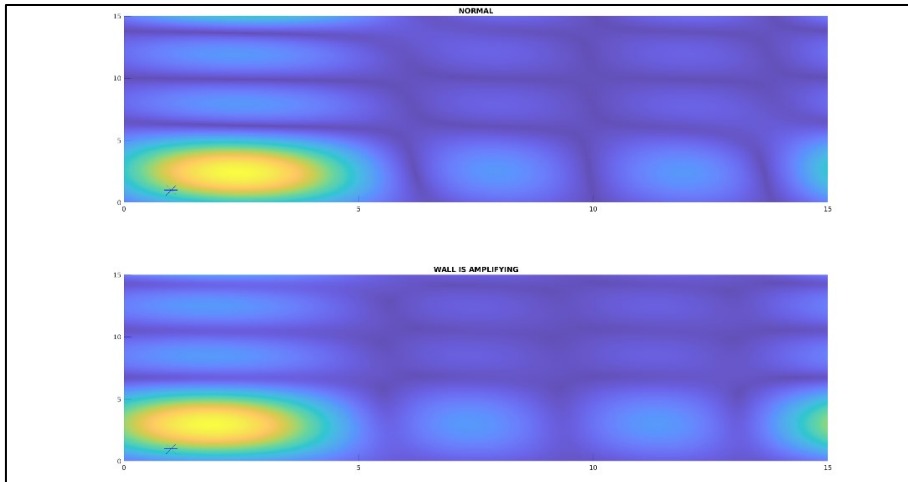


Fig. 122. Ejemplo de no afectación por rayo reflejado

Por otra parte, se observa que en los casos en los que la desviación entre resultados es mínima, el máximo de la FFT no se desplaza, por lo que se puede enunciar que, cuando los rayos reflejados distorsionan el resultado lo hacen de forma notoria. Son una minoría (12 casos), dentro de los resultados obtenidos, los casos en los que el máximo se ve desviado ligeramente: $[3.5, 13.5, *]$, $[3.5, 11, *]$, $[3.5, 1, *]$ y $[3.5, 3.5, *]$. Estos resultados coinciden todos en el eje X (misma distancia a la pared que no atenúa el rayo reflejado), presentan una simetría en Y respecto al centro (posiciones más alejadas del eje del receptor) y suelen comportarse de forma similar para todas las alturas en el eje Z:

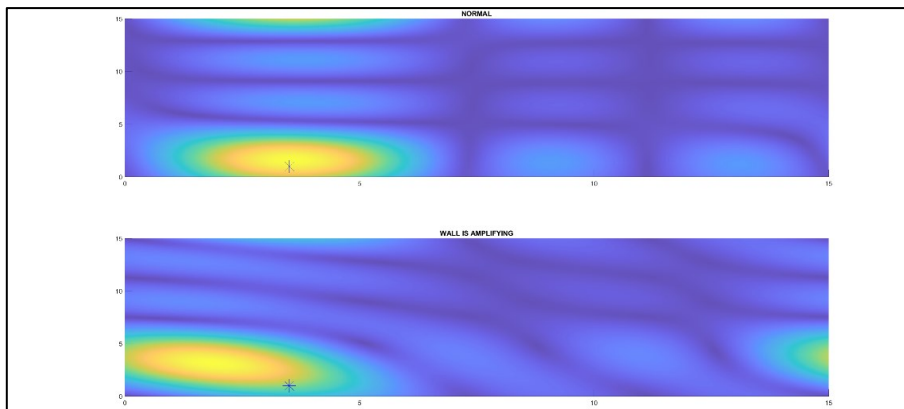


Fig. 123. Ejemplo de ligera afectación por rayo reflejado

Por otra parte, hay un número relevante de casos en los que el rayo reflejado distorsiona notablemente el resultado (27 casos): [13.5,13.5,0.5-1.5], [13.5,1,0.5-1.5], [11,13.5,0.5-1.5], [11,11,0.5], [11,1,0.5], [8.5,13.5,0.5-2.5], [8.5,3.5,0.5], [8.5,1,1.5], [6,13.5,*], [6,11,0.5-1.5], [6,3.5,0.5], [6,1,*], [3.5,13.5,0.5], [3.5,11,2.5], [3.5,6, 0.5-1.5].

Hay distintos patrones que se observan en los siguientes resultados:

- A excepción de $X=1$ cercana a la pared que no atenúa el rayo reflejado, todas las demás posiciones de X causan errores a diferencia que en Y . Esto es debido a que la pared con propiedades distintas se encuentra en una posición concreta de X y es ortogonal a dicho eje por lo que el rayo reflejado es más relevante que desde un barrido en Y , en donde la pared se encuentra distribuida de manera uniforme a lo largo del mismo.
- En la mayoría de los casos, las alturas superiores (eje Z) dan mejor resultado. Esto coincide con que el ángulo de visión es mejor y la elevación no se acerca a 0° (plano de referencia del receptor), ya que en ese ángulo las prestaciones de esta técnica se reducen considerablemente. De $z=0.5$ a $z=2.5$ se pueden desviar alrededor de 10° respecto al plano de referencia del receptor, siendo 2° aproximadamente el ángulo asociado a $z=0.5$.

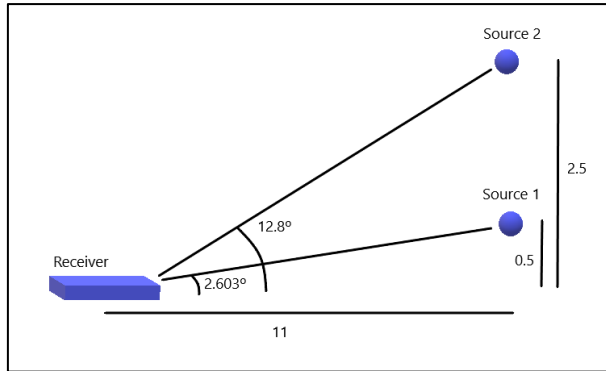


Fig. 124. Ejemplo de cálculo de ángulos en elevación respecto a plano de referencia

- En lo relativo al eje Y, los resultados erróneos van asociados a Y lejanas al centro o posición del receptor; esto también sigue el mismo razonamiento de ángulos que el apartado anterior, ya que para Y lejanas al receptor, el ángulo se hace más agudo. En estos casos en concreto, las Y dan problemas a partir de los 4 metros respecto al receptor (en el muestreo realizado):

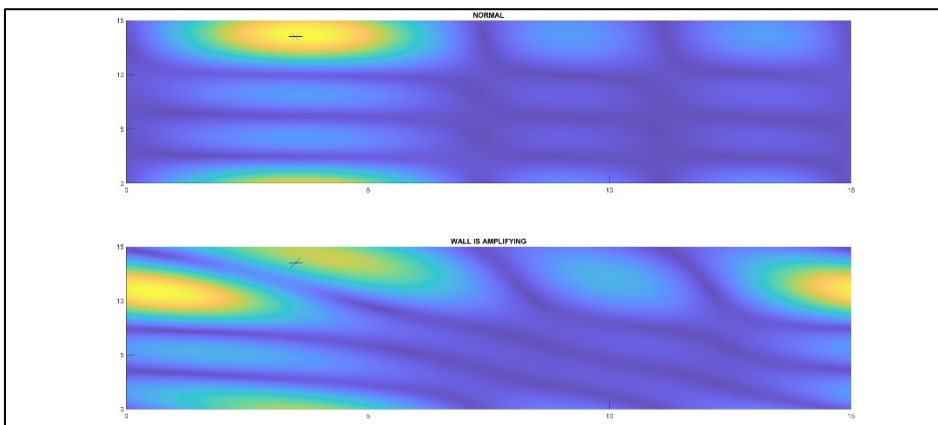
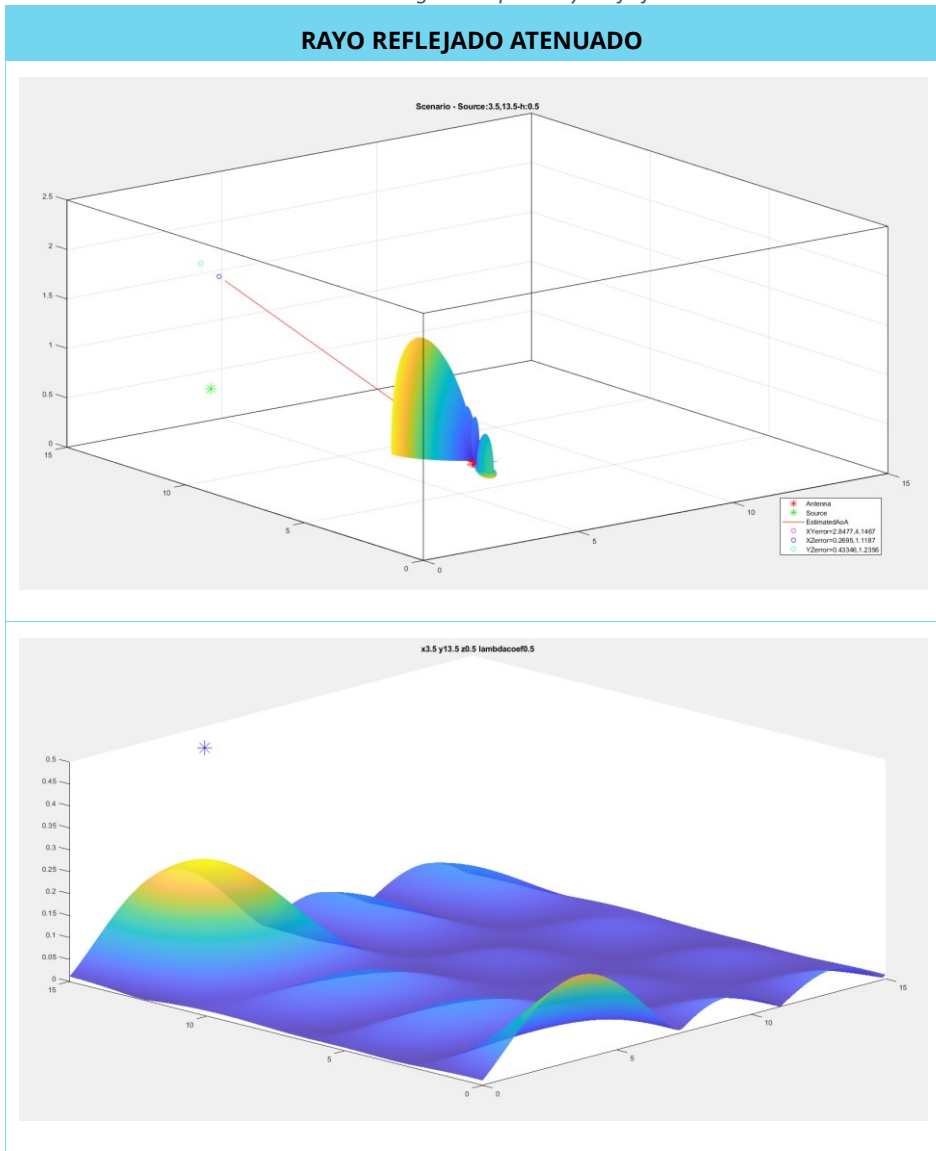
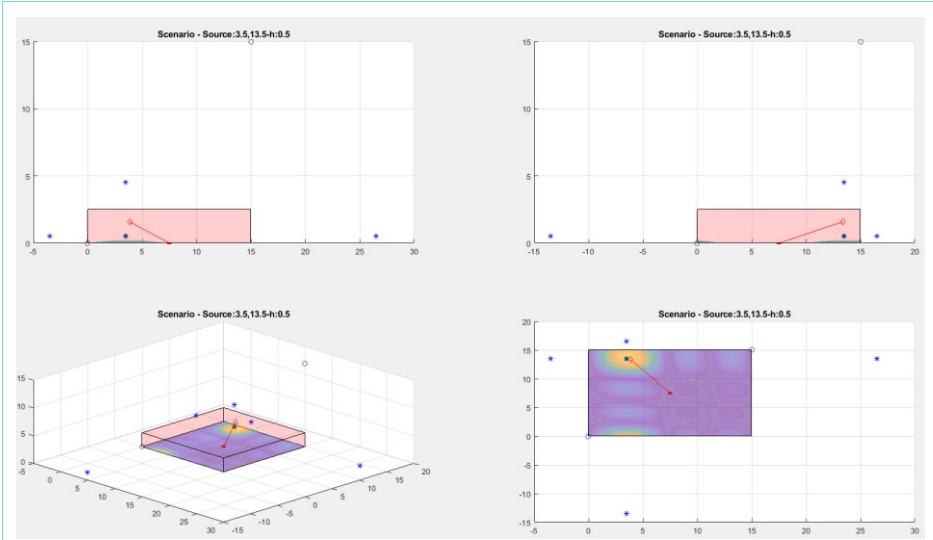


Fig. 125. Ejemplo de afectación grave por rayo reflejado

Para este último caso donde el error es grave, se va a analizar en profundidad el resultado obtenido, tanto en 3D como en las distintas vistas representadas:

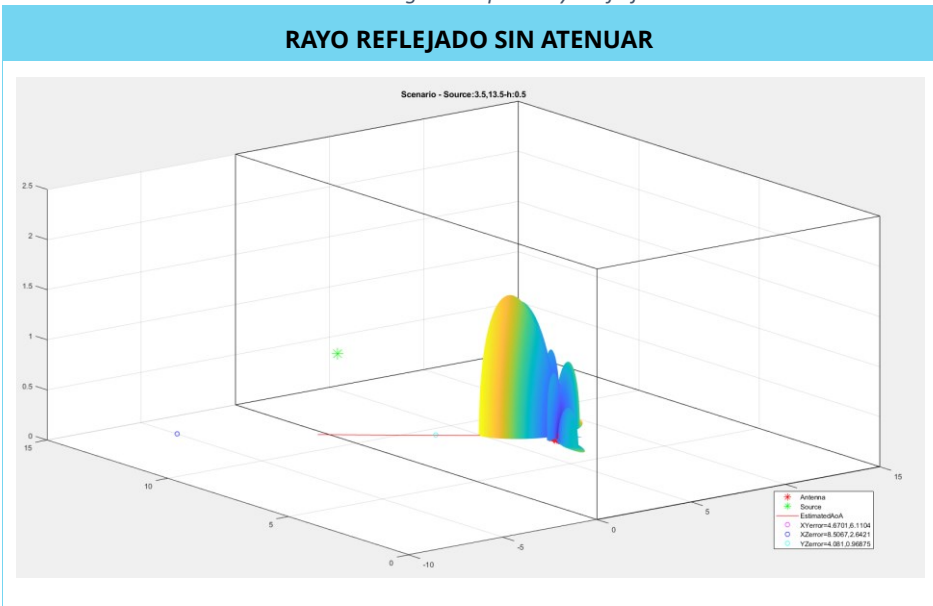
Tabla 42. Resultados del algoritmo para rayo reflejado atenuado

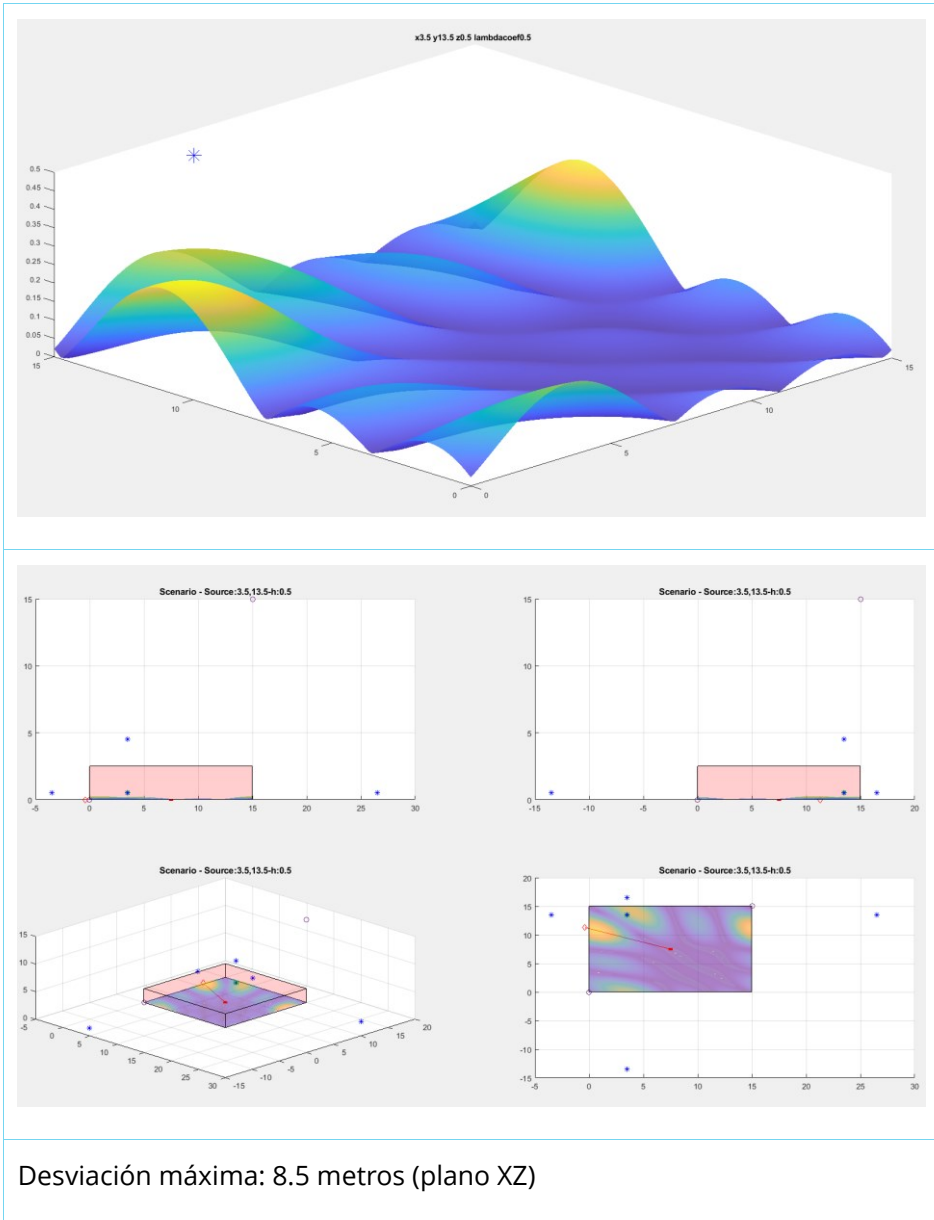




Desviación máxima: 4.14 metros (plano XY)

Tabla 43. Resultados del algoritmo para rayo reflejado sin atenuar





Visto el análisis anterior y el resumen de los resultados obtenidos, se puede afirmar que en el estudio realizado se tienen 12 de 105 casos en los que el resultado se ve afectado mínimamente y 27 de 105 casos en los que se ve

afectado gravemente. Esto representa una afectación en el 37% de los casos debido a un rayo reflejado o rebote de la señal no atenuado.

Como se ha mencionado anteriormente, el modelo de algoritmo diseñado se ha simulado para aproximar el caso en el que una antena, debido a sus prestaciones en polarización o diagrama de radiación, entre otras, sea sensible al rayo reflejado y al directo, y, por tanto, afecten en la precisión del resultado de la técnica de Angle of Arrival. Este modelo se considera el más relevante porque las pruebas en campo y las notas de aplicación de los distintos fabricantes de este tipo de soluciones coinciden en que el efecto del multi-camino en «entornos cerrados» es la principal fuente de error para AoA y el mayor reto a la hora de mejorar la precisión de estos sistemas.

Por lo tanto, se puede afirmar, obviando las limitaciones de la tecnología y las fuentes de ruido descritas en el estado del arte de este capítulo que ya añaden una distorsión en el resultado de la localización, que las antenas del receptor no cumplan con las especificaciones óptimas para tratar el rayo directo de igual o mejor forma que el resto de las señales reflejadas recibidas se traduce en la aparición de un porcentaje relevante de errores críticos cercano al 40% de los casos. En otras palabras, el diagrama de radiación de los distintos elementos de la agrupación de antenas del receptor debe de ser idéntico y lo más uniforme posibles respecto a todas las direcciones del espacio donde se quiera localizar a un Tag emisor.

Al margen de las conclusiones extraídas durante el diseño y puesta en marcha del algoritmo en condiciones extremas, que han servido como requisitos de diseño del Gateway receptor del capítulo 5, se ha comprobado que en el otro 63% de los casos en los que el resultado no se ve afectado, la desviación respecto a la posición real de la fuente emisora es de centímetros, por lo que cumple con el objetivo propuesto, ya que esta nueva implementación permitiría localizar a un Tag emisor con mayor precisión y en nuevos casos de uso.

Aun así, existe margen de mejora en los casos en los que las fuentes de ruido y los efectos del entorno afectan a la precisión de la localización, haciendo no cumplir con el objetivo. Este margen de mejora queda fuera del marco

de trabajo de esta tesis doctoral y se plantea como línea futura de trabajo. En concreto, la estrategia se centra en aplicar algoritmos y filtros conocidos como MUSIC, PSO-ML y/o suavizado espacial, entre otros, para evitar parte de la afectación y distorsión en el resultado.

En resumen, un buen diseño de la agrupación de antenas y del algoritmo de localización es el factor determinante para que un sistema RTLS funcione correctamente y ofrezca información precisa y fiable.

6. Arquitectura del sistema

6.1. Introducción

En los sistemas de localización en tiempo real la infraestructura es variopinta y se compone principalmente de dos partes: la parte hardware (dispositivos electrónicos e infraestructura de red) y la parte software (servidores de aplicación, algoritmos, aplicaciones, etcétera).

En ambas partes es importante contar con un buen diseño que asegure la correcta propagación de la información (en tiempo, orden y forma) y que sea capaz de dimensionar y escalar atendiendo a las necesidades de los escenarios de aplicación. Además, una implementación óptima puede causar una reducción de costes considerable y agilizar la escalabilidad.

Así pues, en este capítulo se analiza el diseño de arquitectura del sistema propuesto y se detallan los artefactos más relevantes que permiten conectar los elementos descritos en capítulos anteriores para obtener el resultado de la localización deseada: Tag emisor, Gateway receptor y algoritmo.

6.2. Estado del arte

En el diseño de los componentes hardware de radiofrecuencia de esta tesis reside la responsabilidad del cambio de precisión de la localización, y, por lo tanto, del cumplimiento del objetivo final, pero, la implementación de la componente software del sistema de localización debe tener la capacidad para llevarlo a cabo y ser capaz de adaptarse a los requisitos del mercado.

Un sistema de localización en tiempo real se compone, concretamente, de tres piezas lógicas: hardware, *middleware* y software:

- Hardware: Dispositivos de radiofrecuencia (comunicación inalámbrica) basados en una tecnología que permita, mediante técnicas y algoritmos,

localizar a los dispositivos emisores mediante los receptores. Este componente está instalado físicamente en el lugar de utilización.

- *Middleware*: Parte software intermedia encargada de conectar los dispositivos con las aplicaciones finales que consume el usuario. Recibe los datos de los receptores, aplica algoritmos y técnicas de localización necesarias y provee a las aplicaciones de una o varias posiciones asociadas a cada emisor. Suele contener mecanismos de configuración, corrección y ajuste para la correcta calibración del sistema. Este componente puede estar instalado físicamente en el lugar de instalación del hardware donde la información se trata de forma local (*on-premise*) o puede ubicarse en la nube (*cloud*) si los dispositivos de radiofrecuencia receptores o un elemento intermedio es capaz de enviar los datos en remoto.
- *Software*: Aplicaciones externas o propias que permiten consumir la información del sistema de localización de varias formas. En el ámbito de aplicación que se tiene como objetivo, existen aplicaciones finales que reciben la localización para proveer: datos para la gestión, información para los familiares, control domótico de salas, automatización de tareas, seguridad del paciente, trazabilidad, etcétera. Este componente también puede estar instalado localmente (PC, móvil, TV, etc.) o puede ubicarse en la nube (web).



Fig. 126. Distintas partes generales de un RTLS

En este capítulo, el principal elemento a tratar la parte telemática y artefactos software ya que la parte hardware del sistema ha sido tratada en profundidad en los capítulos anteriores a través del desarrollo y caracterización de nuevos dispositivos de radiofrecuencia, y únicamente, se describirá el formato de conmutación y secuencialidad para enviar y recibir la señal Bluetooth en el apartado siguiente.

Así pues, se analiza el estado del arte de las tecnologías utilizadas para el envío y propagación de los datos que aparecen en la Fig. 126 anterior, así como de los contenedores y gestores de escalabilidad de la parte *middleware* y software.

Primeramente, para propagar los datos de una parte a otra del sistema RTLS se debe de usar un intermediario capaz de soportar tal cantidad de mensajes (varios cientos de emisores siendo recibidos por una decena de receptores) y ser capaz de escalar y redimensionarse dinámicamente a medida que crecen las exigencias del caso de uso. Además, también debe de ser capaz de entregar los mensajes en orden y tiempo e implementar mecanismos de seguridad.

El intermediario elegido para llevar la información del hardware al *middleware*, y del *middleware* al software es Apache Kafka. Apache Kafka es un proyecto de código abierto diseñado para el alto rendimiento y la baja latencia (clave para sistemas en tiempo real) que busca universalizar las comunicaciones de este tipo y que las distintas piezas de numerosas empresas sean integrables y capaz de comunicarse entre ellas sin asumir un desarrollo extra.

El modelo de datos de Kafka se basa en unas colas de información en donde hay productores y suscriptores, esto quiere decir que se publican mensajes en una cola y se suscriben uno o varios consumidores para recibir esa información (con mecanismos de seguridad para limitar los accesos). Además, tiene la capacidad de escalar masivamente atendiendo al tráfico de mensajes de cada aplicación [58]. También es configurable el tiempo de retención de los datos y el límite de espacio ocupado.

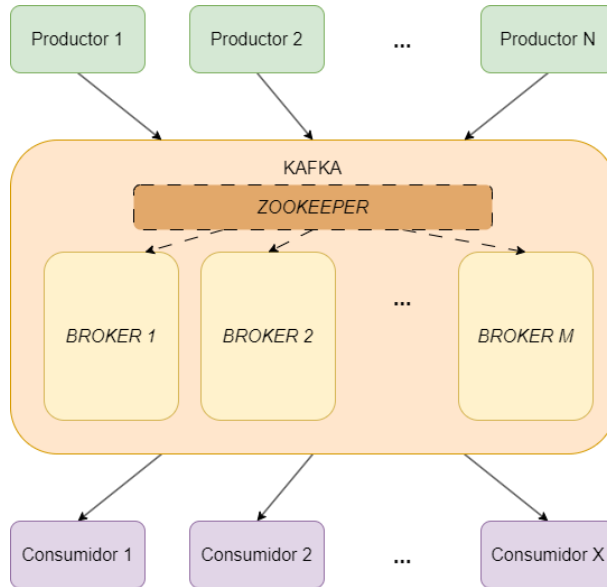


Fig. 127. Esquema de arquitectura de Kafka

Por otro lado, Kafka se puede ejecutar en una instancia o en varias (llamadas bróker de mensajería) y los bloques de datos se distribuyen y replican entre los nodos disponibles. Esto le permite ser tolerante a fallos y gracias a ello ha desbancado a otras tecnologías muy extendidas como JMS (*Java Message Service*) o AMQP (*Advanced Message Queuing Protocol*). Aquí, Zookeeper juega un papel importante, ya que es un complemento importante de Kafka, cuya incorporación es opcional, pero que realiza las tareas de monitorización, mantenimiento, gestor del tráfico y generación de particiones y *brokers* nuevos según las necesidades; en este caso es una pieza fundamental para la escalabilidad del sistema.

Existen otros intermediarios de mensajes cuyas características son similares como MQTT (no es tan robusto), RabbitMQ (escalabilidad y rendimiento menores) y Celery (no está pensado para el tiempo real y los mensajes no persisten), pero en la elección de Apache Kafka para este desarrollo han sido clave las siguientes características:

- Código abierto
- Tecnología extendida

- Diseñado para tiempo real (rapidez)
- Escalabilidad (Coordinador Zookeeper)

En segundo lugar, una vez descrito el sistema intermediario encargado de transportar los datos entre las distintas partes funcionales del sistema, se detalla el formato de los datos.

El formato de datos elegido para la información transportada desde el hardware al *middleware*, y del *middleware* al software es JSON (JavaScript Object Notation) [59]. Este formato es independiente del lenguaje JavaScript (aunque tiene relación histórica), muestra de ello es que hay numerosas API para distintos lenguajes, y se utiliza frecuentemente en aplicaciones web por su facilidad de interpretación y análisis [60].

El modelo del objeto es de tipo árbol y los datos son leídos o escritos en bloques. Esto se consigue gracias a la apertura y cierre de llaves y corchetes:

```
"parameters_rtl": {  
    "ESTIMATION_MODE": {  
  
        "value": 3,  
        "description": "Location estimation mode.",  
        "enum": [  
            0,  
            "SL_RTL_LOC_ESTIMATION_MODE_TWO",  
            1,  
            "SL_RTL_LOC_ESTIMATION_MODE_THREE ",  
            2,  
            "SL_RTL_LOC_ESTIMATION_HIGH_ACCURACY "  
        ]  
    }  
}
```

Fig. 128. Ejemplo de formato de dato JSON

Existen otros tipos de datos que son reconocidos por varios lenguajes y frecuentemente utilizados en aplicaciones de todo tipo como XML y YAML. En concreto, JSON puede ser más eficiente y compacto que XML y está más familiarizado en el entorno del lenguaje de programación C (común en

sistemas RTLS por el firmware embebido) [61]. Respecto a YAML, es una evolución más compleja de JSON que trata de superar ciertas limitaciones que no aplican a este desarrollo y que hace más complejo el manejo del dato.

En tercer y último lugar se describe la parte *middleware* y software en lo referente al tipo de aplicaciones que se ejecutan y al entorno de ejecución de las mismas. Es importante aclarar que son varias las aplicaciones web finales en las que se consume la información de la localización del RTLS en la solución (plano, mapa, eventos, listado, datos masivos, orquestación, notificaciones, etcétera) y no es uno de los elementos donde esta tesis doctoral impacta, por lo que en esta sección se pone el foco en la parte software relativa al sistema de localización, y por lo tanto, se analiza en detalle la pieza llamada *middleware* encargada de recibir los datos JSON de los Gateway por Kafka, estimar la posición del Tag a ubicar, y enviar la localización en X, Y, Z mediante JSON y Kafka de nuevo a la aplicación web que quiera suscribirse. En el apartado siguiente de implementación se verá en detalle este flujo de la información y como se distribuye entre los diferentes elementos.

Así pues, la pieza lógica *middleware* alberga otro de los componentes de la solución de localización en tiempo real que se ha desarrollado en este marco de trabajo y a la que le pertenece uno de los capítulos anteriores: el algoritmo de localización.

El algoritmo, también llamado comúnmente *engine* de localización o librería RTLS, se ha desarrollado en lenguaje de programación C. La principal razón por la que se ha elegido este lenguaje es por la modularidad, la reutilización y la compatibilidad con el código del *firmware* embebido en los dispositivos de radiofrecuencia del sistema. Además, el lenguaje C destaca por ser un lenguaje eficiente, multiplataforma y simple; también cuenta con numerosos estándares que recogen recomendaciones o directrices para un desarrollo seguro y fiable (frecuente en el ámbito de la automoción).

Este algoritmo puede correr en varias plataformas como Windows o Linux, lo que posibilita la ejecución en los entornos escalables y óptimos de cada caso de uso y cliente final. En este punto, el hecho de haber usado Kafka

(visto anteriormente) para el transporte de los datos de una pieza a otra, hace posible ser multiplataforma y no tener que realizar una configuración compleja en la instalación, por ejemplo: El algoritmo no necesita saber las direcciones específicas de los Gateway sino suscribirse a un productor o cola cuyo nombre será idéntico en todas las plataformas o máquinas donde esté desplegado el sistema.

Por último, y manteniendo el foco en la escalabilidad, las pruebas y primeras instalaciones del producto resultante de este trabajo se han desplegado en Linux utilizando tecnología Docker[62].

Docker se basa en el *kernel* de Linux para dividir los procesos y ejecutarlos de manera independiente en artefactos llamados contenedores que ejecutan una o varias aplicaciones por separado para optimizar la infraestructura. Estos contenedores docker no son máquinas independientes o máquinas virtuales, sino contenedores de aplicaciones o procesos ejecutándose de manera separada en un mismo *host* [63].

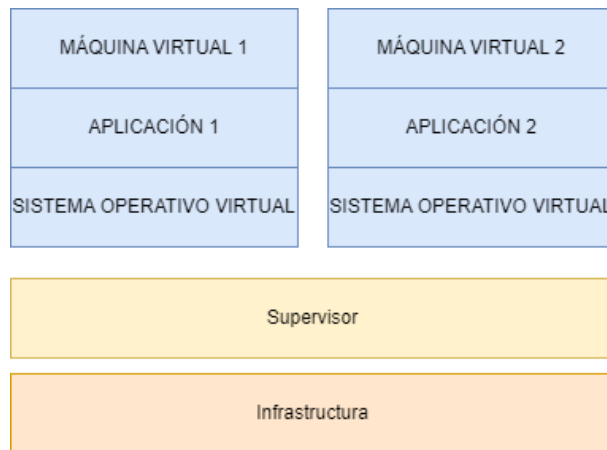


Fig. 129. Diagrama de aplicaciones en máquinas virtuales

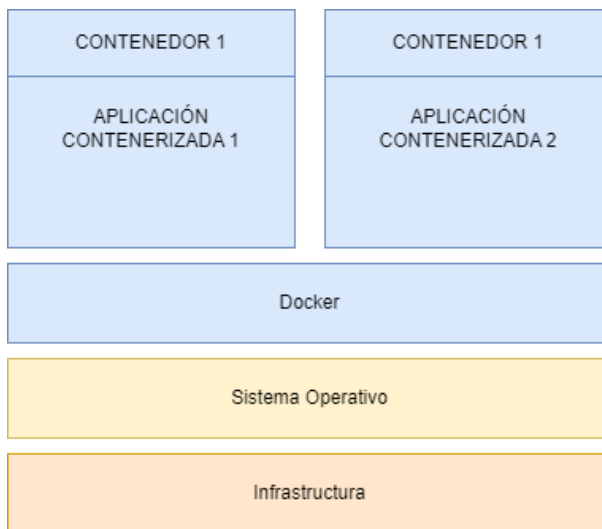


Fig. 130. Diagrama de aplicaciones en contenedores Docker

Existen numerosas ventajas asociadas al uso de estos contenedores [64]:

- Implementación rápida: Se despliegan en cuestión de segundos a partir de una imagen. Además, se pueden replicar varios contenedores idénticos. Cabe destacar que se comparte el mismo sistema operativo entre contenedores Docker, por lo que no hay que levantar uno cada vez.
- Robustez: Tiene la capacidad de aislar una parte de la aplicación para pararla, eliminarla o actualizarla sin que se vean afectadas las demás partes. Además, permite limitar los recursos de la máquina a cada Docker individual.
- Modularidad y escalabilidad: Se puede crear tantos contenedores como los recursos permitan para las distintas partes del sistema, así como duplicar contenedores como mecanismo de redundancia o de reparto de tareas.
- Portabilidad y automatización: Permite hacer la instalación idéntica de una máquina previa en otra más compleja con la seguridad de que funcionará. Los contenedores son capaces de desplegarse automáticamente en un orden controlado gracias a unas instrucciones Docker que se comportan de igual manera en cualquier máquina donde se desplieguen.

Por lo tanto, los contenedores Docker permiten desplegar con éxito en distintos tipos de máquinas el algoritmo, o los algoritmos, y que funcionen

de manera correcta. Además, permiten la escalabilidad del sistema clonando procesos o aplicaciones y delegando en cada contenedor una parte de las tareas de manera controlada y limitada.

6.3. Implementación

La arquitectura del sistema principal de localización en tiempo real se compone de los dispositivos electrónicos de radiofrecuencia capaces de emitir y recibir señales Bluetooth para posicionarse entre sí, y del algoritmo o algoritmos capaces de procesar la información proveniente de los Gateway receptores y calcular la posición de los Tag emisores. Parte de la arquitectura son los sistemas de transporte de la información, el formato de los mismos y la infraestructura necesaria para la implementación de las distintas partes. Más allá de lo anterior, están las aplicaciones finales de cliente que consumen la posición de cada Tag y la procesan para la utilidad final en cada caso. A continuación, se puede observar un diagrama general de las piezas clave del sistema y la propagación de la información:



Fig. 131. Partes principales de la arquitectura del sistema RTLS

Cabe destacar que los distintos elementos del sistema diseñados que se han visto en los capítulos anteriores del documento están recogidos en el diagrama anterior:

- Infraestructura (hardware): Tag emisor y Gateway receptor
- Software intermedio (*middleware*): Algoritmo de localización

En esta descripción de la implementación de la arquitectura del sistema se van detallando los distintos elementos mencionados en orden y se entra en el detalle de cada información o dato propagado en cada etapa para una mejor comprensión de la persona lectora.

Tal y como se ha visto en el capítulo 3, el Tag cuenta con dos antenas que funcionan de manera secuencial, y que, gracias a un conmutador, la señal Bluetooth se envía por una o la otra dependiendo del instante temporal. Estas antenas posibilitan la emisión de las tramas Bluetooth de forma inalámbrica para que los distintos Gateway cercanos instalados en el entorno interior las reciban.



Fig. 132. Arquitectura secuencial del sistema del Tag emisor

Los Gateway se encuentran instalados y fijados en las paredes o techos del edificio en cuestión, mientras que los Tag son elementos móviles que portan las personas u objetos a localizar.

A la hora de recibir la señal que proviene de uno o varios Tag, los receptores cuentan con una agrupación de antenas descrita en el capítulo 5 en donde cada uno de los elementos de antena recibe parte de la señal de manera secuencial para poder discernir la dirección de llegada del frente de ondas. Para ello se utilizan conmutadores que llevan la señal al transceptor y a los elementos de radiofrecuencia necesarios para transformar cada muestra tomada por cada antena en una muestra IQ. Las muestras IQ (señal en fase y cuadratura) también han sido descritas a lo largo del documento y no es más que una representación matemática tipo fasor de una amplitud y fase de la señal en cada antena. La combinación de varias muestras IQ de un mismo Gateway, bien sea en el propio receptor o en un algoritmo remoto,

dará como resultante el ángulo o los ángulos de llegada de la señal del Tag al receptor (elevación y azimut).



Fig. 133. Arquitectura secuencial del sistema del Gateway receptor

La conversión de IQ a ángulo de llegada pasa por varias etapas que se definen en la siguiente lista, donde hay varios elementos de ajuste y procesado del dato para ofrecer una información fiable y entregar como resultado dos ángulos, azimut y elevación, que posicionan al emisor:

- -
- -
- -

El resultado anterior se generará para cada Tag tantas veces como Gateway reciban la señal de ese Tag, siempre y cuando estén en el área de cobertura o de alcance de la tecnología Bluetooth. Estos resultados se reciben por el algoritmo principal de localización que es capaz de procesarlos, poner en contexto la ubicación física de cada receptor, y ofrecer una posición concreta de un Tag a localizar en coordenadas X, Y, Z del plano o cartografía en cuestión.

Respecto al envío de la información o del dato en cada etapa, cabe destacar que en una primera fase se produce una señal física (inalámbrica) en el Tag que es convertida en varias muestras IQ y posteriormente en un ángulo de llegada por el Gateway. En una segunda fase, el Gateway envía por Kafka en formato JSON su información relativa del ángulo con el que le ha llegado el frente de ondas de la señal inalámbrica del Tag a un servidor donde se encuentra el algoritmo (RTLS AoA *engine*) en un contenedor Docker.



Fig. 134. Propagación de la señal y la información en la infraestructura física

La ilustración siguiente muestra un resumen completo de las distintas partes tratadas hasta este punto haciendo énfasis en la relación de generadores de la señal (Tag), traductores (Gateway) y resultados generados:

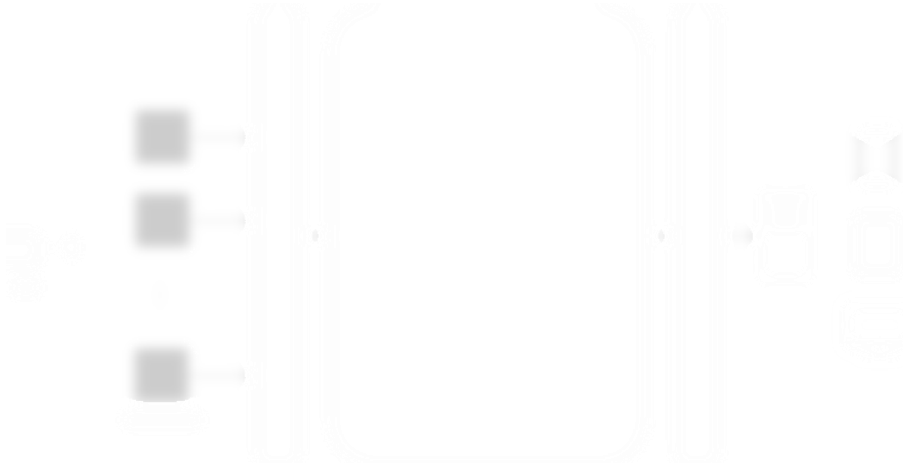


Fig. 135. Arquitectura general del sistema

Para cada emisor inalámbrico, son varios receptores los que analizan su señal (relación 1 a N), por Kafka se propagan N ángulos o M muestras IQ, y desde la infraestructura que alberga el algoritmo sale un único resultado que se entrega por Kafka a las distintas aplicaciones finales. Habrá tantas muestras IQ como antenas existan en la agrupación. Ver siguiente ilustración a modo de resumen más detallado:



Fig. 136. Comunicación entre elementos y viaje del dato

Por último, en este capítulo se ha mencionado la importancia de la escalabilidad del sistema de localización en tiempo real y de la solución donde la principal motivación es que no hay dos entornos iguales y que este tipo de sistemas son útiles tanto en una instalación reducida, como por ejemplo una zona de rayos y radiodiagnóstico, o en un edificio completo, por ejemplo, un hospital en su totalidad. También hay soluciones donde se

quiere localizar muy pocos objetos o personas, y en otros en donde el volumen de gente u objetos pertenece a otro orden de magnitud.



Fig. 137. Arquitectura del sistema con detalle de escalabilidad

Así pues, para que el sistema presentado sea escalable en sus distintas partes, se requiere de las siguientes actuaciones o necesidades:

- Elementos Tag y Gateway: Es la parte más escalable, ya que únicamente se necesita instalar o poner en circulación más dispositivos. La única limitación es la saturación de los canales de emisión o de la banda frecuencial de Bluetooth y la capacidad de recepción del dispositivo Gateway. En este aspecto es importante que cada Gateway envíe los datos de ángulo y no muestras IQ para no saturar en envío de información hacia el servidor donde se alberga el algoritmo ni sobrecargar de cómputo a este.
- Mensajería: Necesita crecer proporcionalmente al volumen de datos o dispositivos de la instalación. Existe un gestor de *brokers* o intermediarios de mensajería Kafka llamado Zookeeper que se encarga de coordinar el envío de la información, distribuirla, dar prioridad y redundancia a dicha información. Zookeeper es esencial para controlar Kafka y dimensionar sus instancias.
- Algoritmos: Puede haber uno o varios edificios o zonas donde poner en funcionamiento el sistema RTLS; también puede haber pocos o muchos Tag a localizar. En los casos más extremos, los algoritmos pueden llegar a su límite de computación y ser un cuello de botella en donde la información puede dejar de ser precisa y el tiempo real puede comprometerse. La paralelización o gestión eficiente de los distintos algoritmos es primordial para una buena

escalabilidad y estabilidad. Docker, a través de sus contenedores, detallados en el apartado anterior, son los encargados de hacer el sistema modular y robusto.



Fig. 138. Sistema escalable en brokers de mensajes y contenedores

6.4. Conclusiones

La arquitectura del sistema elegida se centra principalmente en la escalabilidad y flexibilidad de la instalación en cualquier entorno de los posibles.

En este planteamiento no se ha dejado de lado la relación coste-efectivo. Se tiene en cuenta que los Gateway irán cableados y tendrán conexión directa con el contenedor del algoritmo de localización (sea local o en la nube), por lo que también es importante optimizar el número de receptores necesarios para una buena localización, ya que el exceso de estos impacta directamente en el coste de la infraestructura. En este aspecto se considerarán también los posibles cuellos de botella: máximo número de Tag que puede recibir un Gateway y capacidades técnicas de la infraestructura de red y cómputo.

La escalabilidad y flexibilidad en un sistema de localización en tiempo real de este tipo se traduce en la posibilidad de funcionar en múltiples escenarios y tipologías de edificios garantizando un buen resultado de la solución. Para ello, el sistema debe de tener la posibilidad de crecer en número de dispositivos emisores y receptores, así como en aplicaciones finales, sin mermar la calidad de su resultado. Por ello, la organización y el transporte de los datos mediante Kafka, el formato JSON y la planificación y gestión de Zookeeper juegan un papel fundamental. Además, el hecho de que el algoritmo de localización se pueda paralelizar, seccionar por zonas de localización y ser redundante es otro de los aspectos principales para dicha escalabilidad; esto se consigue gracias a los contenedores Docker.

Al margen de los aspectos considerados anteriormente, la modularidad de la solución va implícita en las tecnologías y arquitectura elegidas. Este aspecto es relevante para la presencia en los distintos escenarios y clientes, pero, además, facilita considerablemente el testeo y las pruebas de carga de la solución integral, así como de las distintas partes que componen el sistema. De esta manera se caracteriza el consumo de recursos de cada pieza y se dimensiona la infraestructura para ello; también se tiene una información más exacta y acotada de los recursos que necesita el producto para ser instalado en un cliente. Además, en el caso de que los recursos sean limitados o la solución se pretenda ampliar a otras zonas del edificio, escalar modularmente es un punto a favor.

Por último, y no menos importante, cabe destacar que la conmutación elegida en los dispositivos de radiofrecuencia detallada en Fig. 132 y Fig. 133 reduce significativamente el coste del hardware debido a que toda recepción por parte de las antenas se plantea de manera secuencial y aglutina la información a lo largo del tiempo, mientras que si hubiera sido un procesado en paralelo, pese a ser más óptimo en tiempo, hubiera encarecido la electrónica embebida en los productos.

7. Resultados

7.1. Introducción

Los resultados siguientes muestran una comparativa entre una de las técnicas predecesoras al AoA más comunes, que es RSSI, y el propio AoA cuyo resultado parte de la combinación de la nueva técnica y la contribución en menor medida del propio RSSI.

Para ello, se emplean los dispositivos y artefactos desarrollados bajo el marco de esta tesis: emisores (Tag) compatibles con ambas técnicas, distintos receptores (Gateway) y algoritmos RSSI y AoA. Tanto los Gateway como los algoritmos se ejecutan en paralelo para realizar la prueba en el mismo instante temporal y evitar cualquier condicionante que pudiera variar entre una prueba y otra afectando a los resultados de las mismas (condiciones atmosféricas, ruido electromagnético, presencia de personas en el edificio, etcétera).

En sí, como se verá a continuación, es una prueba sistemática pero no repetible al 100%, debido a que el factor humano condiciona la prueba en la medida en la que decide el camino exacto a trazar; las condiciones atmosféricas también afectan. Es por ello que se ponen en marcha los dos sistemas en paralelo y así poder hacer una prueba normalizada y una comparativa real y simultánea.

El objetivo de estos resultados es poder observar, tal y como se menciona en el resumen y motivación de esta tesis, el aumento de precisión en el resultado del sistema de localización debido al cambio de técnica en el algoritmo y en los dispositivos de radiofrecuencia diseñados.

Para cumplir con el objetivo anterior y atendiendo al resultado esperado y consumido en este tipo de sistemas, se analizan parámetros como la latencia y la fiabilidad (a nivel de área, estancia o cama) de la localización mediante el promedio y demás elementos estadísticos de todas las iteraciones realizadas para todos los dispositivos de cada caso de prueba.

En el caso en el que algún dispositivo concreto, prueba o iteración de la prueba destaque respecto a la media, merecerá un comentario específico.

Finalmente, para completar el análisis de los resultados y puesto que esta tesis tiene como reto la mejora de la precisión en la localización, se presentan resultados aplicados a los niveles de precisión requeridos en un sistema de localización en interiores como también los obtenidos en un entorno real.

7.2. Método de medida

CONFIDENCIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

7.3. Resultados

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENCIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

8. Conclusiones

8.1. Conclusión general

Los entornos hospitalarios, a menudo caracterizados como espacios de actividad constante y crítica, donde cada segundo cuenta y la precisión en la localización desempeña un papel vital en la eficiencia operativa y la calidad de la atención médica. La complejidad de la gestión hospitalaria moderna se ve acentuada por la necesidad imperativa de rastrear con exactitud no solo activos y equipos médicos, sino también la ubicación precisa de pacientes y el personal médico en tiempo real. Este desafío ha llevado a una búsqueda continua de soluciones innovadoras que no solo aborden las limitaciones de las técnicas convencionales de localización en entornos hospitalarios, sino que también impulsen la eficacia operativa y mejoren la experiencia global del paciente.

En el contexto hospitalario, la localización precisa es un componente esencial para la gestión efectiva de recursos y la mejora de los procesos operativos. Desde la asignación eficiente de recursos médicos hasta la respuesta rápida en situaciones de emergencia, la capacidad de conocer la ubicación exacta de activos y personas se traduce directamente en una atención médica más eficaz y en la optimización de los flujos de trabajo.

Los hospitales se enfrentan a desafíos únicos, como la necesidad de localizar equipos médicos críticos, el seguimiento de pacientes en tiempo real para garantizar su seguridad y la coordinación eficiente del personal médico en entornos a menudo laberínticos. La precisión en la localización no solo agiliza las operaciones diarias, sino que también puede ser clave en situaciones críticas.

En este contexto, el Angle of Arrival (AoA) emerge como una tecnología disruptiva que promete superar las limitaciones de los enfoques de localización tradicionales. AoA se presenta como un paradigma innovador

capaz de proporcionar una precisión sin precedentes en la determinación de la ubicación de dispositivos y personas en entornos hospitalarios.

AoA se basa en la medición del ángulo de llegada de una señal, lo que lo convierte en una herramienta excepcionalmente precisa para la localización en interiores. Esta tecnología no solo permite una mayor precisión espacial, sino que también aborda los desafíos específicos asociados con la propagación de señales en entornos complejos y cambiantes, como los hospitales.

La utilización histórica de la Potencia de Señal Recibida (RSSI) como el fundamento de las técnicas tradicionales de localización en interiores ha sido, sin duda, un hito en la evolución de los sistemas de posicionamiento. No obstante, la RSSI, al depender exclusivamente de la fuerza de la señal sin considerar la complejidad del entorno, presenta desafíos tecnológicos cruciales. La incapacidad para abordar las fluctuaciones inherentes en la intensidad de la señal, las interferencias frecuentes de otros dispositivos inalámbricos y la vulnerabilidad a las variaciones ambientales, como la absorción y reflexión de las ondas electromagnéticas, se traducen en estimaciones de posición imprecisas y, en ocasiones, totalmente erráticas.

En entornos hospitalarios, donde la movilidad constante del personal médico, la presencia de numerosos obstáculos físicos y la diversidad de equipos electrónicos interfieren con la transmisión de señales, las limitaciones de la RSSI se vuelven aún más evidentes. La falta de visibilidad directa entre los dispositivos y la imposibilidad de superar las barreras estructurales resultan en estimaciones de ubicación que, en el mejor de los casos, son aproximadas.

Esta tesis doctoral ofrece un paso estratégico al adoptar un enfoque híbrido que combina técnicas convencionales, como RSSI, con la innovadora AoA. Este enfoque único capitaliza las fortalezas de ambas técnicas para optimizar la precisión y la estabilidad del sistema de localización en los entornos objetivo y permite seguir manteniendo el foco en la relación coste-efectivo:

- Precisión a nivel de cama: AoA destaca por su capacidad para ofrecer resultados excepcionalmente precisos a nivel de cama. Este atributo esencial responde directamente a la necesidad crítica en entornos hospitalarios, donde la ubicación exacta de activos, personal médico y pacientes es esencial para la asignación efectiva de recursos y la gestión eficiente de activos hospitalarios.
- Optimización de procesos hospitalarios: AoA permite una asignación más eficiente de recursos, reduciendo los tiempos de respuesta y mejorando la coordinación del personal médico. Desde la logística de activos hasta la gestión de flujo de pacientes, AoA redefine cómo se ejecutan y coordinan las operaciones hospitalarias, mejorando significativamente la eficiencia operativa y la calidad de la atención médica.
- Mitigación de interferencias y obstáculos: RSSI, que mide la potencia de la señal, puede ser susceptible a interferencias. Sin embargo, AoA, que mide el ángulo de llegada, ofrece una mayor resistencia a estas interferencias.
- Mejora de la fiabilidad: La combinación de RSSI y AoA no solo aborda la precisión, sino que también mejora la fiabilidad del sistema. AoA, al proporcionar información detallada sobre el ángulo de llegada de la señal, complementa la información de distancia proporcionada por RSSI. Esto se traduce en una mayor confiabilidad en la identificación de ubicaciones, reduciendo los posibles errores y optimizando la eficacia operativa.
- Adaptabilidad dinámica: El enfoque híbrido permite una adaptabilidad dinámica a diferentes escenarios. En entornos menos complejos, donde RSSI podría ser suficiente, el sistema puede ajustarse para optimizar la eficiencia. En situaciones que requieran una precisión excepcional, especialmente a nivel de cama, AoA entra en juego para proporcionar detalles precisos. Esta capacidad de adaptabilidad dinámica garantiza un rendimiento óptimo en diversas condiciones hospitalarias.

La adopción de soluciones avanzadas de localización, particularmente aquellas que integran AoA, se presenta como una oportunidad para mejorar significativamente la atención médica, impulsar la eficiencia operativa y mejorar la experiencia general del personal médico y los pacientes.

En conclusión, en el marco de esta tesis doctoral se ha desarrollado un sistema innovador, alineado con el mercado (puesto que es una tecnología emergente que ha ido madurando en paralelo a la realización de este

trabajo) y de bajo coste, que, mediante un análisis y diseño de los dispositivos de radiación, modelos de propagación, algoritmos y desarrollos telemáticos, se ha conseguido plantear una solución fiable que combinada con sus predecesoras cumplen el objetivo marcado de mejorar la precisión de los sistemas de localización en tiempo real.

8.2. Líneas de trabajo futuras

Durante la realización de esta tesis doctoral se han ido identificando puntos de mejora, que, por no perder el foco y cumplir con los objetivos marcados en tiempo y forma, no se han abordado, pero quedan como asignatura pendiente para futuros rediseños y trabajos. Se presentan tres líneas a seguir para seguir aumentando la precisión del sistema:

- Tag emisor con antena en correa: Una de las limitaciones inherentes al uso hospitalario del Tag es la atenuación de la señal por el contacto con el cuerpo humano. Investigar e implementar antenas en la correa de sujeción del dispositivo resulta un reto interesante.
- Gateway receptor: Reducir las dimensiones, así como diseñar una agrupación de antenas más robusta al efecto multi-camino que algún que otro resultado ha mermado puede ser uno de los puntos clave en la línea de mejora de este dispositivo. Las antenas planas tipo parche que son capaces de recibir con polarización dual, junto con un algoritmo asociado, serían capaces de discernir entre señal directa y rebotes. También se ha pensado en una solución volumétrica, en la que las antenas no estén solo en un plano de placa de circuito impreso sino dispuestas en un volumen para poder instalarse en varios planos y abordar las tres dimensiones; esto podría mejorar las deficiencias en ciertos ángulos de la elevación.
- Algoritmo: La incorporación de la inteligencia artificial a este tipo de artefactos permitiría identificar ciertos patrones de fallo y adelantarse a los mismos. También aprendería de los casos correctos y podría auto calibrar al sistema de forma dinámica para que sea inmune a las condiciones meteorológicas, afluencia de gente en el hospital o variación de materiales de construcción.

Referencias

- [1] A. Zignani y M. Saadi, «5G POSITIONING: ENTERPRISE PROBLEM SOLVER OR JUST ANOTHER RTLS TECHNOLOGY?», 2021. [En línea]. Disponible en: www.abiresearch.com
- [2] R. Bazo *et al.*, «A Survey About Real-Time Location Systems in Healthcare Environments», *J Med Syst*, vol. 45, n.º 3, mar. 2021, doi: 10.1007/S10916-021-01710-1.
- [3] Mark Powell y ABI Research, «2024 Market Update | Bluetooth® Technology Website». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.bluetooth.com/2024-market-update/?utm_term=email&utm_campaign=bmu&utm_medium=email&_hsmi=299751329&_hsenc=p2ANqtz-9FPRJHuR7Ij3iPi4HxSYy7nK17IKodMw6wypS08ev5uFv5P0sQaNDX-GpF6YJdBt0Trq-v98SemAZFpJ3Ghnpk-aMvYQ&utm_content=2024-bmu-hyb&utm_source=hubspot
- [4] «Core Specification | Bluetooth® Technology Website». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-1/>
- [5] M. Woolley, «Bluetooth Direction Finding A Technical Overview», 2019.
- [6] I. Álvarez Olmos, «Implementación de la técnica monopulso para un sistema de array digital en recepción de ocho canales en banda X», Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
- [7] Á. Blanco Rubio *et al.*, «Experiences and Metrics for Calculating Return on Investment», 2013.

- [8] Texas Instruments, «Bluetooth Antenna Design», 2008, Accedido: 7 de agosto de 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/an/snoa519b/snoa519b.pdf>
- [9] Antenova Company, «Wireless Antenna Integration eBook».
- [10] L. Lizzi, «Antenna Miniaturization for IoT», 2019.
- [11] R. Wallace y TEXAS INSTRUMENTS, «Antenna Selection Guide». [En línea]. Disponible en: www.ti.com/lpw
- [12] L. Lizzi, «From passive to active miniature antennas: The challenges of integrating reconfigurable components», 2019.
- [13] AIMPLAS y Víctor Ramírez, «¿Conoces la Plastrónica? Descubre sus infinitas posibilidades». Accedido: 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.aimplas.es/blog/conoces-la-plastronica-descubre-sus-infinitas-posibilidades/>
- [14] S. Labs, «AN1088: Designing with an Inverted-F 2.4 GHz PCB Antenna». Accedido: 26 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an1088-designing-with-pcb-antenna.pdf>
- [15] M. Gallo, O. Losito, V. Dimiccoli, D. Barletta, y M. Bozzetti, «Design of an Inverted F Antenna by Using a Transmission Line Model».
- [16] TEXAS INSTRUMENTS, «Application Report 2.4-GHz Inverted F Antenna», 2021. [En línea]. Disponible en: www.ti.com
- [17] A. Mallik y S. Kundu, «Design of a Novel Dual-Band Microstrip Patch Antenna Operating at 2.45 GHz and 2.84 GHz with Practical Implementation».

- [18] Antenova Company, «Antennas for Wireless M2M Applications Weii 2.4 GHz Ceramic Antenna 2. Description».
- [19] A. Zhao, J. Xue, C. Jing, y A. Salo, «The use of Murata ceramic Bluetooth antenna for wrist device based on flexible printed circuit boards», en *Proceedings of the 38th European Microwave Conference, EuMC 2008*, 2008. doi: 10.1109/EUMC.2008.4751816.
- [20] F. Kervel y TEXAS INSTRUMENTS, «Design Note DN023 868 MHz, 915 MHz and 955 MHz Inverted F Antenna».
- [21] A. Andersen y TEXAS INSTRUMENTS, «Application Note AN043 Small Size 2.4 GHz PCB antenna».
- [22] M. Cabedo-Fabrés, «Diapositivas Sistemas radiantes y canal móvil MUCOM», en *Univesitat Politècnica de València*, 2014.
- [23] N. H. M. Rais, P. J. Soh, F. Malek, S. Ahmad, N. B. M. Hashim, y P. S. Hall, «A Review of Wearable Antenna», Accedido: 2 de agosto de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1d1b/c104a6be17f3326d0c5578287c22164ce03e.pdf>
- [24] M. R. K. Bader Saadi Fadhel, «EM Wave Effects Upon de Human Body Using UWB Antennas», doi: 10.7763/IJIEE.2014.V4.426.
- [25] Networks, «Body Area Networks -Antennas», vol. 16, n.º 2, pp. 171-193, 2010, Accedido: 2 de agosto de 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.cst.com/Content/Events/downloads/euc2013/3-1-4_CST_EUC.pdf
- [26] J. Roças, N. Pires, y A. Moreira, «Human Body Effects on the Matching of a 2.45 GHz Coplanar-fed Antenna».

- [27] M. Monirujjaman Khan, M. Azizur Rahman, M. Abu Talha, y T. Mithila, «Wearable Antenna for Power Efficient On-Body and Off-Body Communications», *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 6, n.º 6, pp. 238-243, 2014, doi: 10.4236/jemaa.2014.69024.
- [28] CST Computer Simulation Technology AG., «Bio-Medical RF Simulations with CST Microwave Studio®».
- [29] K. Furset y P. Hoffman, «High pulse drain impact on CR2032 coin cell battery capacity», Accedido: 26 de enero de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.dmcinfo.com/Portals/0/Blog%20Files/High%20pulse%20drain%20impact%20on%20CR2032%20coin%20cell%20battery%20capacity.pdf>
- [30] A. Chletsou, J. F. Locke, y J. Papapolymerou, «Effects of plastic vehicular covers on radiation characteristics of lightweight, dual-band antenna for vehicular communications», *The Journal of Engineering*, vol. 2022, n.º 10, pp. 1017-1031, oct. 2022, doi: 10.1049/TJE2.12192.
- [31] CST Computer Simulation Technology AG., «HUGO Human Body Model», [En línea]. Disponible en: <http://www.cst.com>
- [32] M.-A. Chung y C.-F. Yang, «Built-in antenna design for 2.4 GHz ISM band and GPS operations in a wrist-worn wireless communication device», doi: 10.1049/iet-map.2015.0785.
- [33] J. Guterman, A. A. Moreira, C. Peixeiro, y Y. Rahmat-Samii, «COMPARISON STUDY OF ELECTROMAGNETIC HUMAN INTERACTION WITH VARIOUS 2.4 GHz LAPTOP INTEGRATED ANTENNAS».
- [34] X. H. S. K. H. Zhu, P. Li, G. H. Chai, «Effects of stratum corneum and conductive gel properties on sensory afferents recruitment by 3D TENS computational».

- [35] A. M. A. Waddah, N. R. Khairun, y M. S. Abdirahman, «Performance of ultra-wideband wearable antenna under severe environmental conditions and specific absorption rate (SAR) study at near distances», *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015.
- [36] Z. Psenakova, M. Smondrk, J. Barabas, G. Lo Sciuto, y M. Benova, «Simulation and assessment of pacemaker RF exposure (2.4 GHz) by PIFA antenna», en *ELEKTRO 2016 - 11th International Conference, Proceedings*, 2016. doi: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512141.
- [37] A. Bobby Chhabra y Aaron M. Freilich, «Wrist and Hand | Clinical Gate». Accedido: 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://clinicalgate.com/wrist-and-hand/>
- [38] R. M. Rius, G. Talavera, y J. Carrabina, «Developing and study of wearable and flexible antennas for Body Area Networks working under extreme conditions», en *2012 15th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, ANTEM 2012*, 2012. doi: 10.1109/ANTEM.2012.6262415.
- [39] M. Ur Rehman *et al.*, «Investigation of on-body Bluetooth transmission», doi: 10.1049/iet-map.2008.0339.
- [40] F. Ferrero, «Miniature Antenna Measurement», 2019.
- [41] Z. Li, G. Shaker, M. R. Nezhad-Ahmadi, y S. Safavi-Naeini, «Design of a miniaturized antenna for Bluetooth-enabled hearing aid devices», en *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 2015. doi: 10.1109/APS.2015.7304773.
- [42] Kirt Blattenberger, «Dielectric Constant, Strength, & Loss Tangent - RF Cafe». Accedido: 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rfcafe.com/references/electrical/dielectric-constants-strengths.htm>

- [43] F. Ferrero, «Antenna fabrication», 2019.
- [44] S. Castello-Palacios, A. Valles-Lluch, C. Garcia-Pardo, A. Fornes-Leal, y N. Cardona, «Formulas for easy-to-prepare tailored phantoms at 2.4 GHz ISM band», *International Symposium on Medical Information and Communication Technology, ISMICT*, pp. 27-31, abr. 2017, doi: 10.1109/ISMICT.2017.7891760.
- [45] S. Castello-Palacios, C. Garcia-Pardo, A. Fornes-Leal, N. Cardona, y A. Valles-Lluch, «Wideband phantoms of different body tissues for heterogeneous models in body area networks», *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, pp. 3032-3035, sep. 2017, doi: 10.1109/EMBC.2017.8037496.
- [46] W. Cao, B. Zhang, A. Liu, T. Yu, D. Guo, y K. Pan, «A reconfigurable microstrip antenna with radiation pattern selectivity and polarization diversity», *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 11, pp. 453-456, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2193549.
- [47] K. Wei, Z. Zhang, W. Chen, y Z. Feng, «A novel hybrid-fed patch antenna with pattern diversity», *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 9, pp. 562-565, 2010, doi: 10.1109/LAWP.2010.2051402.
- [48] I. Dove, M. S. Thesis, I. Dove, y B. Eng, «Analysis of Radio Propagation Inside the Human Body for in-Body Localization Purposes», 2014. Accedido: 28 de junio de 2019. [En línea]. Disponible en: https://essay.utwente.nl/66071/1/Dove_MA_TE.pdf
- [49] H. Snellman, M. Savolainen, J. Knaappila, y P. Rahikkala, «Bluetooth[®] 5, Refined for the IoT», Accedido: 20 de marzo de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.silabs.com/documents/referenced/white-papers/bluetooth-5-refined-for-the-IoT.pdf>
- [50] «CC2640R2F SimpleLink™ Bluetooth[®] 5.1 Low Energy Wireless MCU Silicon Revisions F, G Silicon Errata CC2640R2F SimpleLink™ Bluetooth[®] 5.1 Low Energy Wireless MCU

- Silicon Revisions F, G», 2018, Accedido: 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: www.ti.com
- [51] Texas Instruments, «Bluetooth Low Energy Angle of Arrival». Accedido: 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=A__ALGvahQMHBUTBo.5ej73xQ__com.ti.SIMPLELINK_ACADEMY_CC2640R2SDK__7unKOT8__3.40.00.00
- [52] Nordic Semiconductor, «nRF52833 Product». Accedido: 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nordicsemi.com/Products/nRF52833>
- [53] K.-Lu. Wong, «Planar antennas for wireless communications», p. 301, 2003, Accedido: 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-us/Planar+Antennas+for+Wireless+Communications-p-9780471266112>
- [54] «• SKY13575-639LF: Dual-Band Matched SP4T Wi-Fi Switch Applications», 2018, Accedido: 14 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: www.skyworksinc.com
- [55] S. Labs, «QSG175: Silicon Labs Direction Finding Solution Quick-Start Guide», 2022, Accedido: 9 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://docs.silabs.com/>.
- [56] R. Wilson y J. A. Crawford, «Propagation Losses Through Common Building Materials 2.4 GHz vs 5 GHz Reflection and Transmission Losses Through Common Building Materials», 2002. Accedido: 28 de junio de 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.am1.us/wp-content/uploads/Documents/E10589_Propagation_Losses_2_and_5GHz.pdf
- [57] Ángel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca, Jordi Romeu Robert, Sebastián Blanch Boris, y Miguel Ferrando Bataller, *Antenas*, 2ª. Edicions UPC, 2002.

- [58] «Monitoring Kafka Performance Metrics | Datadog». Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.datadoghq.com/blog/monitoring-kafka-performance-metrics/>
- [59] P. Bourhis, J. L. Reutter, y D. Vrgoč, «JSON: Data model and query languages», *Inf Syst*, vol. 89, p. 101478, mar. 2020, doi: 10.1016/J.IS.2019.101478.
- [60] D. Peng, L. Cao, y W. Xu, «Using JSON for Data Exchanging in Web Service Applications», *Journal of Computational Information Systems*, vol. 7, pp. 5883-5890, 2011, Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.Jofcis.com1553-9105/>
- [61] A.-R. Breje, R. Győrödi, C. Győrödi, D. Zmaranda, y G. Pecherle, «Comparative Study of Data Sending Methods for XML and JSON Models», *IJACSA International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, n.º 12, 2018, Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: www.ijacsa.thesai.org
- [62] J. Cito, G. Schermann, J. E. Wittern, P. Leitner, S. Zumberi, y H. C. Gall, «An Empirical Analysis of the Docker Container Ecosystem on GitHub», *IEEE International Working Conference on Mining Software Repositories*, pp. 323-333, jun. 2017, doi: 10.1109/MSR.2017.67.
- [63] E. N. Preeth, J. P. Mulerickal, B. Paul, y Y. Sastri, «Evaluation of Docker containers based on hardware utilization», *2015 International Conference on Control, Communication and Computing India, ICCCI 2015*, pp. 697-700, mar. 2016, doi: 10.1109/ICCC.2015.7432984.
- [64] B. B. Rad, H. J. Bhatti, y M. Ahmadi, «An Introduction to Docker and Analysis of its Performance», *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 17, n.º 3, 2017, Accedido: 7 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/318816158>

- [65] McGraw Hill, «La unidad del paciente. Cama hospitalaria», 2011. Accedido: 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en:
<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448177002.pdf>

Actividades relacionadas

Patentes

- M. Casanova-Murillo, J.F. Hernández-Cuartero, E. Montón-Sánchez and S.E. Vera Manero, "*PCT-877 Dispositivo de localización*" *Patent Cooperation Treaty*, todos los estados designados, Oficina Española de Patentes y Marcas (RO/ES), PCT/ES2017/070796, Dic. 1, 2017.
- M. Casanova-Murillo, J.F. Hernández-Cuartero, E. Montón-Sánchez. S.E. Vera Manero, M. Ferrando Bataller, M. Cabedo Fabrés and E. Antonino Daviu, "*PCT-909 Disposición de antena*" *Patent Cooperation Treaty*, todos los estados designados, Oficina Española de Patentes y Marcas (RO/ES), PCT/ES2018/070622, Sep. 26, 2018.

Publicaciones en congresos

- M. Casanova-Murillo, M. Cabedo-Fabrés, J.F. Hernández-Cuartero and E. Montón-Sánchez, "Antena de alta eficiencia para localización en entornos hospitalarios" en Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), 2021.
- M. Casanova-Murillo, M. Cabedo-Fabrés, M. Ferrando-Bataller and E. Montón-Sánchez, "Comparativa entre técnicas de localización em interiores basadas en RSSI y AoA con tecnología Bluetooth" en Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), 2022.
- M. Casanova-Murillo, M. Cabedo-Fabrés, M. Ferrando-Bataller and J.F. Hernández-Cuartero, "Comparison between Bluetooth indoor location techniques based on RSSI and AoA" en European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2023.

Participación en proyectos de investigación

- Activage Project (Activating innovative IoT smart living environments for ageing well), *Horizon 2020 – Call “Information Communication Technologies”, Topic: IoT-01-2016 Large Scale, GA. 732679. Pilots-Innovation Action, 2017-2019.* <http://www.activageproject.eu/>
- vCare (Virtual coaching activities for rehabilitation in elderly) *Horizon 2020 – Call “Health, demographic change and well-being”, Topic: SC1-2016-2017, GA. 769807, 2018.* <https://vcare-project.eu/>
- Plan4act (Predictive Neural Information for Proactive Actions: From Monkey Brain to Smart House Control), *Horizon 2020 – Call H2020-FETPROACT-2016-2017, Topic: emerging themes and communities, GA. 732266, 2019.* <https://plan4act-project.eu/>
- Sintec (Soft intelligence epidermal communication platform), *Horizon 2020 – Call H2020-ICT-2018-2, Topic: Flexible and wearable technologies, GA. 824984, 2019.* <https://www.sintec-project.eu/>
- OR4.0 (Development of an intelligent and multi-hospital end-to-end surgical process management system), *Horizon 2020 – Call H2020-SMEInst-2018-2020-2, Topic: SME instrument, GA. 812386, 2019.* <https://cordis.europa.eu/project/id/812386/results>

Anexo 1: Código Matlab algoritmo de localización

CONFIDENCIAL

CONFIDENCIAL

Anexo 2: Utilidades matemáticas para los resultados

En este anexo se detallan las herramientas matemáticas empleadas para la evaluación y el análisis de los datos de las pruebas de localización.

En primer lugar, se presentan las distribuciones estadísticas empleadas, que ofrecen a lo largo de este capítulo la posibilidad de describir cómo se distribuyen los valores (resultados de localización) para un campo concreto, clarificando qué valores son comunes o frecuentes. Dependiendo de la simetría de la distribución, existen diferentes tipos o morfologías:

- Distribución simétrica: la curva presenta su máximo en el centro y las colas son simétricas debido a que el valor más frecuente se encuentra en el 50% y el resto de los datos se distribuyen de manera idéntica en ambos lados.
- Sesgo negativo: la cola izquierda es más larga por lo que la masa de la distribución se concentra a la derecha de la figura.
- Sesgo positivo: la cola derecha es más larga de modo que la masa de la distribución se concentra a la izquierda de la figura.

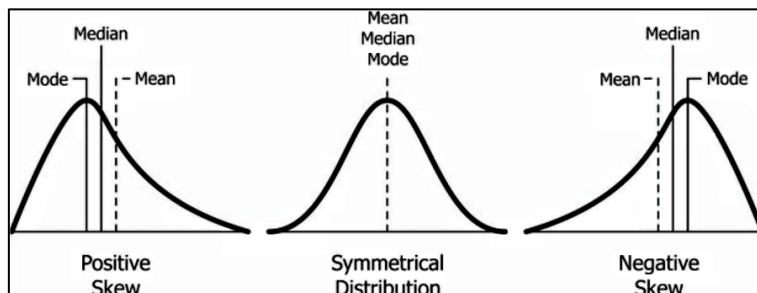


Fig. 140. Tipos de distribuciones estadísticas

En segundo lugar, cabe destacar que las distribuciones anteriores son necesarias para interpretar los resultados del diagrama de caja y bigotes. En este tipo de gráficos se puede observar la variabilidad de uno o varios conjuntos de datos. Dentro de la caja se encuentra el conjunto de datos que están entre el primer cuartil Q1 (25%) y el tercero Q3 (75%), es decir, el rango

intercuartílico. La línea media que cruza la caja indica el valor de la mediana que corresponde con el segundo cuartil.

Los bigotes representan el número mínimo y el máximo que se corresponden con $Q1 - 1.5 * \text{Rango intercuartílico}$ para el mínimo y $Q3 + 1.5 * \text{Rango intercuartílico}$ para el máximo; todo lo que se salga de esos valores se consideran valores atípicos o *outliers*. Por otra parte, la X representa la media aritmética. Además, cabe destacar que si la mediana y la media coinciden entonces la distribución es centrada. Véase la figura siguiente para interpretar lo descrito anteriormente:

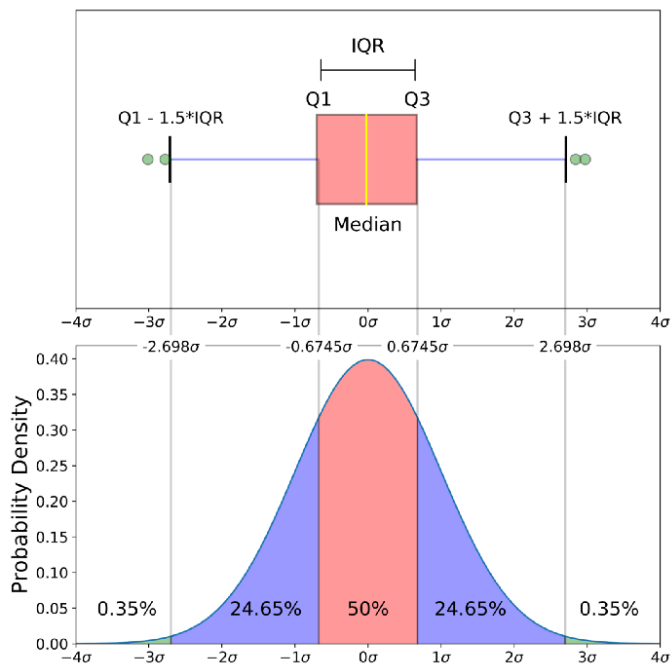


Fig. 141. Diagrama de caja y bigotes

Además de las distribuciones estadísticas empleadas y las expresiones geométricas, la descripción de los resultados también se apoya en parámetros estadísticos comunes como la media, varianza, mediana, desviación estándar e histograma.

Anexo 3: Medidas del diagrama de radiación en antenas

Este anexo ofrece un análisis del método de medida utilizado y modos de representación para la obtención de los diagramas de radiación de los elementos Tag y Gateway de esta tesis.

El sistema de coordenadas esféricas es el utilizado para este tipo de aplicaciones, donde se referencian todas las posiciones respecto de los ángulos φ y θ .

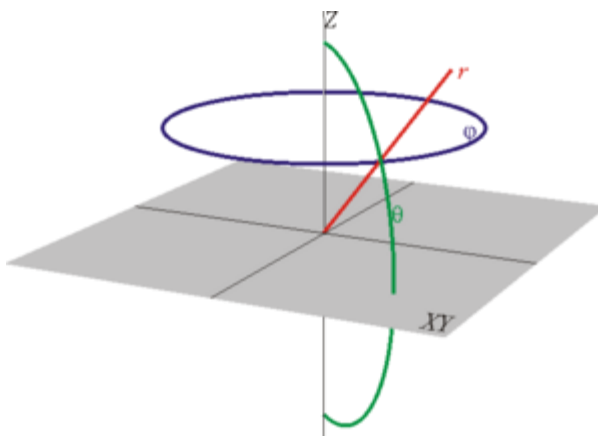


Fig. 142. Coordenadas esféricas

Individuamente, el AUT (*Antenna Under Test*) está anclado a un posicionador que gestiona sus giros en coordenadas cartesianas x , y , z . A su vez, la sonda, que en este caso es una bocina, se referencia respecto a φ (normalmente no se referencia a las coordenadas del AUT sino a las propias de la sonda, y se utiliza χ (chi) para determinar el ángulo de roll), cuyos posibles valores son 0° y -90° , que marcan la polarización que se mide; en vertical u horizontal respectivamente.

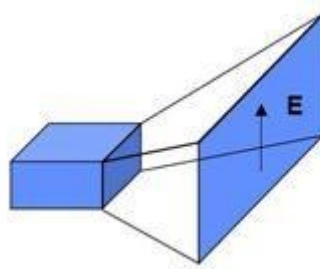


Fig. 143. Campo eléctrico en bocina con $\vartheta = 0^\circ$

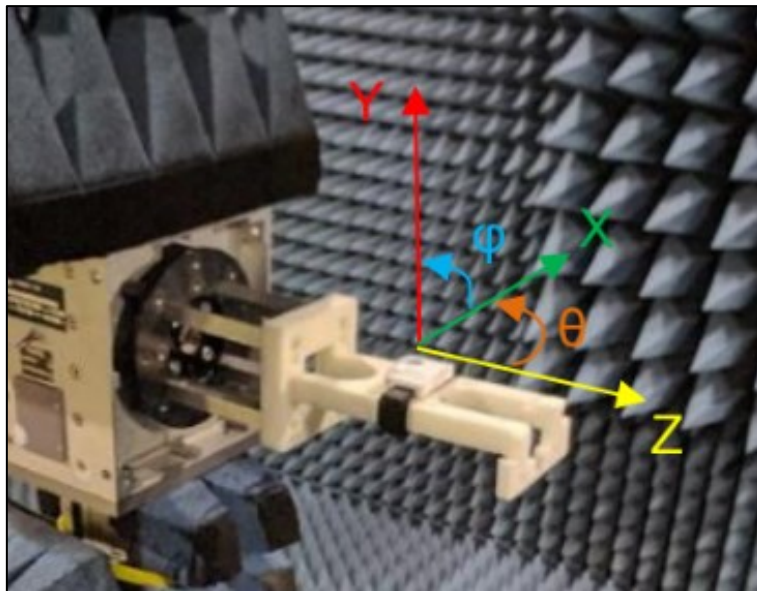


Fig. 144. Ejes cartesianos y ángulos relevantes en cámara anecoica

Por lo tanto, el diagrama de radiación 3D se calcula en función de la medida de campo eléctrico recibida en cada una de las combinaciones de ϕ y θ del AUT y para las dos posiciones posibles de ϕ de la sonda, para no discriminar polarizaciones ortogonales a la que se está midiendo en la sonda (si se midiera con una sonda de polarización circular, si el AUT es polarización lineal, se perderían 3 dB por desacople entre polarizaciones).

Para obtener el resultado de la medida, considerando que se realiza una medida muestreada cada α grados por eje (α viene definido por un teorema

parecido al de Nyquist, $N = K \cdot R_0 + 10$ donde R_0 es el radio de la esfera mínima que envuelve la antena), se combinan las dos contribuciones de tensión (campo eléctrico \vec{E}) E_φ y E_θ provenientes de las dos posiciones posibles de φ de la sonda:

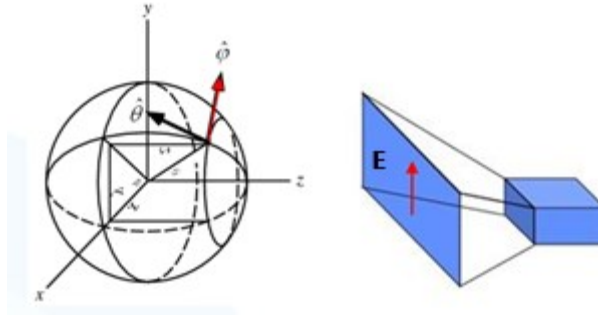


Fig. 145. Componente del campo eléctrico en φ (E_φ)

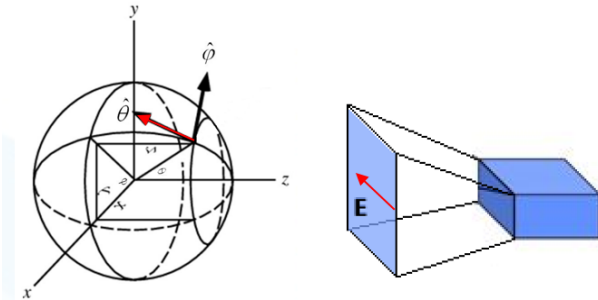


Fig. 146. Componente del campo eléctrico en ϑ (E_ϑ)

De forma que se deducen, de ambas contribuciones, unos coeficientes T de la antena, que la caracterizan en transmisión, exportados en el fichero CoefT_*.mat ; Esto es necesario para poder extrapolar las muestras y tener una función de representación de los resultados en la resolución que se quiera (lo que se busca es hacer una aproximación en todos los puntos del espacio a partir de los puntos muestreados cada α grados). Aun así, se podría tener como resultado y representar la combinación de ambas contribuciones de manera original, sin tener tanta resolución, por lo que las figuras e imágenes tendrían saltos de α en α grados.

Cabe destacar que todo lo comentado anteriormente puede no considerarse en campo lejano y trabajar directamente con las medidas del archivo de resultados *.msr, y, en campo cercano, no hay opción y siempre se tienen que realizar los cálculos mediante los coeficientes.

Como se sabe, el campo lejano es la región donde el patrón de radiación no cambia de forma con la distancia. Así pues, la zona de campo lejano comenzaría a partir de R, siendo R:

$$R \geq \frac{2 D^2}{\lambda}$$

Donde D es la mayor dimensión lineal de la antena, que para este caso concreto es de aproximadamente 1,5 cm, y $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,4 \cdot 10^9} = 12,5 \text{ cm}$ de donde se obtendría un R = 0,36 cm.

Por lo tanto, ubicando el campo lejano a 0,36 centímetros de la antena, se puede asegurar que las medidas dentro de la cámara anecoica se han realizado en dicha zona.

Por otro lado, tras unas medidas de campo eléctrico asociadas a una antena, existen varias formas de representar la información obtenida para su correcta interpretación. A continuación, en orden de relevancia, se detallan las más extendidas; para su correcta comprensión, se proporciona una infografía del montaje en la cámara anecoica:

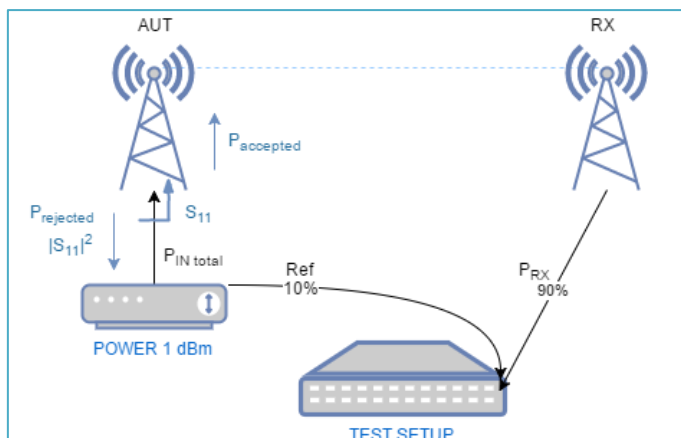


Fig. 147. Setup cámara anecoica

Directividad

La representación de la directividad a partir de la obtención del campo eléctrico se rige por la siguiente fórmula:

$$\frac{P(\varphi, \theta)}{P(\varphi, \theta)_{ISOTRÓPICA}}$$

Donde $P(\varphi, \theta)$ es la potencia radiada desde el AUT y medida desde la sonda, para cada φ y θ , y $P(\varphi, \theta)_{ISOTRÓPICA}$ es la potencia que radiaría la antena en cada punto si toda la potencia radiada por la antena se radiara de forma isotrópica.

Siendo en dB una resta y en lineal una división, lo que se obtiene es, simplemente, una representación de la redistribución de potencia respecto al diagrama isotrópico, que pasa a estar por debajo del nivel medio en algunos puntos de la esfera, y en otros por encima; es por ello que a dicha medida se le llama directividad.

Ganancia (IEEE)

El cálculo de la ganancia es el adoptado por IEEE como parámetro estándar de caracterización de una antena; se calcula a partir de lo siguiente:

$$\frac{P(\varphi, \theta)}{P_{accepted}} = \frac{P(\varphi, \theta)}{1 - |S_{11}|^2}$$

La diferencia respecto a la directividad es que no se relaciona con la potencia distribuida de forma isotrópica sino con la potencia aceptada por el sistema, ya que, al referenciar la potencia radiada con respecto a la potencia aceptada, la ganancia refleja las pérdidas introducidas por la antena (potencia disipada en los dieléctricos, pérdidas óhmicas, problemas de sellado, etc.). Por ello, la forma de la ganancia es igual que la de la directividad (se parte de una potencia media equivalente al diagrama isotrópico) pero desplazada en el eje de potencia.

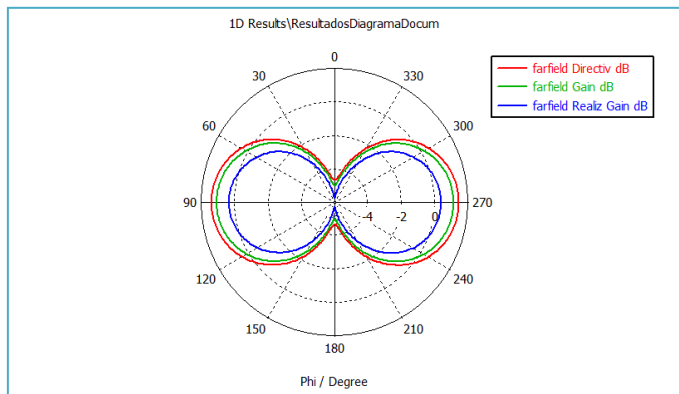


Fig. 148. Comparativa de representaciones en dB

Ganancia realizada

Esta medida es más utilizada en otros ámbitos de investigación, y deja de lado la potencia reflejada, y por consiguiente, el parámetro $|S_{11}|$ (diferenciación entre potencia total inyectada y aceptada por el sistema). Así pues, se considera la potencia total inyectada en el origen $P_{in\ TOTAL}$:

$$\frac{P(\varphi, \theta)}{P_{in\ TOTAL}}$$

Al final, se tiene una comparativa entre la potencia radiada y una referencia, pero que difiere de las anteriores en dicha referencia, por lo que se obtendrá

la misma forma del diagrama, pero desplazado en el eje de potencia de nuevo.

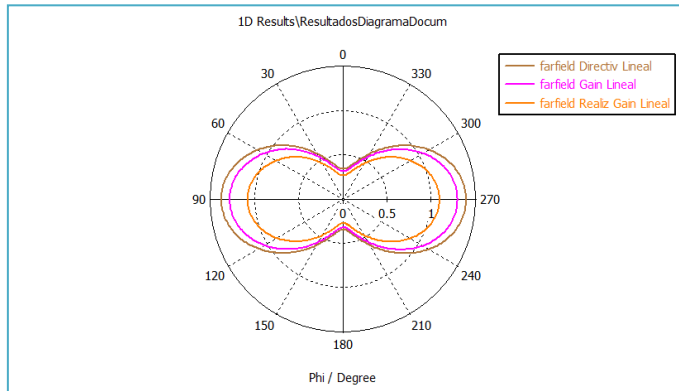


Fig. 149. Comparativa de representaciones lineales

Eficiencia de radiación

La eficiencia de radiación es un dato que relaciona dos de las medidas anteriores, e indica, como su nombre denota, cuán eficiente es la antena, o mejor dicho, cuánta potencia llega a radiar en un máximo respecto de la potencia aceptada. Es decir, se aísla el caso de la potencia reflejada a la entrada, y se obtiene únicamente la relación entre la potencia radiada y la aceptada por el sistema. La fórmula es la siguiente:

$$Eff_{rad} = \frac{Directivity}{Gain}$$