



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE  
ELECTROMAGNETISMO Y RADIACIÓN



**DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRAFICA BASADA EN LAS TECNICAS  
DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)  
ORIENTADA AL DISEÑO DE ANTENAS INTELIGENTES**

VINCENZO BARTOLONE  
RAFAEL CAMACHO

Bárbula, 30 de abril del 2016





UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE  
ELECTROMAGNETISMO Y RADIACIÓN



**DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRAFICA BASADA EN LAS TECNICAS  
DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)  
ORIENTADA AL DISEÑO DE ANTENAS INTELIGENTES**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE  
CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

VINCENZO BARTOLONE  
RAFAEL CAMACHO

Bárbula, 30 de abril del 2016







UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE  
ELECTROMAGNETISMO Y RADIACIÓN



### **CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado «DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRAFICA BASADA EN LAS TECNICAS DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO) ORIENTADA AL DISEÑO DE ANTENAS INTELIGENTES», realizado por los bachilleres VINCENZO BARTOLONE, cédula de identidad 23.409.480, RAFAEL CAMACHO, cédula de identidad 20.700.554, hemos decidido otorgar la máxima calificación y la mención honorífica al presente trabajo, con base a los siguientes motivos:

*1) Los autores han adquirido de manera autónoma conocimientos de técnicas de optimización y simulación muy novedosas y han demostrado dominio de estas en la aplicación a problemas de antenas inteligentes. 2) Por la profundidad de análisis y la impecable ejecución metodológica empleada por los autores para alcanzar todos los objetivos relacionados con el problema planteado. 3) La extraordinaria calidad que se evidencia en el producto académico resultante de este trabajo de grado.*

**Firma**

Prof. RAFAEL ALBORNOZ

TUTOR

**Firma**

Prof. PAULINO DEL PINO

JURADO

**Firma**

Prof. CESAR RUIZ

JURADO

Bárbula, 30 de abril del 2016



# Dedicatoria

*A mis Padres Agostino Bartolone y Janett Zambrano.*

*A mis Hermanas*

*A mis Amigos mas cercanos*

**VINCENZO BARTOLONE**

*A mis padres, por criarme y darme la vida*

*A mis hermanos*

*A mis amigos*

*Y a mis maestros*

**RAFAEL CAMACHO**



# Agradecimientos

Primero que todo agradecer a Dios por darnos la oportunidad de compartir este logro con nuestros seres queridos. Agradecer a nuestros padres quienes fueron el pilar fundamental en nuestro camino para lograr llegar a cumplir esta meta, y siempre estuvieron presentes en todos los momentos de nuestra carrera universitaria. A nuestros compañeros que en el camino se fueron convirtiendo en nuestros amigos y hoy en día siguen allí. Agradecer a la Universidad de Carabobo nuestra Alma Mater que nos dio la oportunidad de desarrollarnos para alcanzar este logro. A nuestros Profesores quienes pusieron su conocimiento en nuestras manos, y nos enseñaron que aunque el camino no sea fácil no podemos rendirnos nunca, porque cuando el camino se hace duro solo los duros caminan. Y por ultimo agradecer a todas esas personas que de una u otra forma, formaron parte de este logro y que sin saberlo tienen su granito de arena puesto en este trabajo de grado. A todos agradecerles en el alma.



# Índice general

<b>Índice de Figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XVII</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>XIX</b>
<b>Constantes Físicas</b>	<b>XXI</b>
<b>Símbolos</b>	<b>XXIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XXV</b>
<b>I. El Problema</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Justificación de la Investigación . . . . .	3
1.3. Ojetivos . . . . .	4
1.3.1. Objetivo General . . . . .	4
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	4
1.4. Alcances . . . . .	5
<b>II. Marco conceptual</b>	<b>7</b>
2.1. Sistemas Antenas Inteligentes . . . . .	7
2.1.1. Tipos de Antenas Inteligentes . . . . .	9
2.1.1.1. Sistema de haz conmutado . . . . .	9
2.1.1.2. Haz de seguimiento . . . . .	9
2.1.1.3. Haz adaptativo . . . . .	10
2.1.2. Beneficios de los sistemas de antenas inteligentes . . . . .	11
2.2. Consideraciones generales para el modelo de un arreglo de antenas.	14
2.2.1. Problema Físico de la Propagación de Onda . . . . .	15
2.2.2. Modelo Paramétrico de los Datos . . . . .	17
2.2.3. Arreglo de Antenas . . . . .	18
2.2.4. Matriz de Observaciones . . . . .	20
2.2.5. Matriz de Correlación . . . . .	22

2.3. Detección de dirección de arribo . . . . .	24
2.3.0.1. Algoritmo MUSIC . . . . .	26
2.4. Algoritmo PSO . . . . .	30
2.4.1. Aplicación de la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) en sistemas de Antenas Inteligentes. . . . .	35
2.5. Arquitectura de un sistema de Antenas Inteligentes de Haz Adaptativo. . . . .	36
2.6. Sectorización. . . . .	38
2.7. SDMA . . . . .	40
<b>III. Procedimientos de la investigación</b>	<b>43</b>
3.1. Diseño de los Algoritmos MUSIC y PSO para su implementación en el sistema de antenas. . . . .	44
3.1.1. Modelado de las señales . . . . .	44
3.1.2. Modelado de los Arreglos de Antenas. . . . .	45
3.1.3. Desarrollo del Algoritmo de detección de arribo MUSIC. . . . .	46
3.1.4. Diseño del Algoritmo PSO. . . . .	49
3.2. Diseño de la interfaz gráfica . . . . .	53
3.2.1. Procedimiento general . . . . .	53
3.2.2. Estado del Arte . . . . .	55
3.3. Simulaciones . . . . .	65
<b>IV. Análisis, interpretación y presentación de los resultados</b>	<b>67</b>
4.1. Simulaciones . . . . .	67
4.2. Simulaciones Etapa DoA . . . . .	67
4.2.1. Prueba 1: Comportamiento del sistema cuando la SNR varía. . . . .	68
4.2.2. Prueba 2: Comportamiento del sistema cuando la frecuencia de portadora de las señales varía. . . . .	73
4.2.3. Prueba 3: Comportamiento del sistema cuando las Señales son próximas entre sí. . . . .	77
4.3. Simulaciones Etapa PSO . . . . .	82
4.3.1. Prueba 1: Comportamiento del sistema cuando la experiencia grupal $c_2$ de las partículas es igual a 0. . . . .	86
4.3.2. Prueba 2: Comportamiento del sistema cuando la experiencia individual $c_1$ de las partículas es igual a 0. . . . .	93
4.3.3. Prueba 3: Comportamiento del sistema cuando la experiencia individual $c_1$ y la experiencia grupal $c_2$ de las partículas es igual a 1. . . . .	100
4.3.4. Prueba 4: Comportamiento del sistema cuando el costo de los lóbulos laterales tiene mayor valor en la función costo. . . . .	107
4.3.5. Prueba 5: Comportamiento del sistema cuando el costo de los nulos tiene mayor valor en la función costo. . . . .	114



---

4.3.6. Prueba 6: Comportamiento del sistema cuando el costo del haz principal, los lóbulos laterales y los nulos de radiación es el mismo. . . . .	121
4.4. Evaluación en el programa EZNEC. . . . .	128
4.4.1. Pesos del Sistema. . . . .	133
4.4.2. Diagramas de Radiación. . . . .	136
4.4.3. Comprobación de resultados obtenidos en EZNEC. . . . .	137
4.4.3.1. Diagramas de Radiación . . . . .	139
4.4.3.2. Impedancias del sistema. . . . .	144
<b>V. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>151</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	151
5.2. Recomendaciones . . . . .	155
<b>A. Comparación del Algoritmo PSO con los Algoritmos GAs</b>	<b>157</b>
<b>B. Estudio de Impedancias</b>	<b>159</b>
<b>C. Códigos .m de los Algoritmos MUSIC, PSO y Función Costo</b>	<b>163</b>
3.1. Código .m Algoritmo MUSIC . . . . .	163
3.2. Código .m Algoritmo PSO . . . . .	169
3.3. Código .m de la Función Costo . . . . .	177
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>179</b>
Anexos	
<b>A. Beam Array Optimization for Smart Antenna Systems Using Stochastic Algorithms</b>	
<b>B. Aplicación de PSO y GAs a la síntesis de agrupaciones lineales de antenas</b>	



# Índice de figuras

2.1. Sistemas de antenas inteligentes: De izquierda a derecha Sistema de Haz Conmutado, de Haz de Seguimiento, y de Haz Adaptativo. . . . .	11
2.2. Patrón de radiación para haces conmutados y adaptativos . . . . .	13
2.3. Patrón de radiación para haces conmutados y adaptativos . . . . .	14
2.4. Sistema de eje de coordenadas esféricas. . . . .	15
2.5. Geometría de un arreglo genérico . . . . .	17
2.6. Geometría de un Arreglo Lineal Uniforme ubicado en el eje X . . . . .	19
2.7. Arreglo lineal de antenas . . . . .	21
2.8. Parámetros de estimación de la DoA . . . . .	25
2.9. Representación del movimiento de una partícula. . . . .	32
2.10. Diagrama de Flujo del PSO. . . . .	35
2.11. Esquema general de un sistema de antenas inteligentes de haz adaptativo. . . . .	37
2.12. Tipos de Sectorización. . . . .	39
2.13. Diagrama del Sistema SDMA. . . . .	40
2.14. (a) Interferencia en lobulos laterales, (b) Interferencia en haz principal. . . . .	41
3.1. Etapas de la investigación. . . . .	43
3.2. Esquema del Arreglo de Antenas. . . . .	46
3.3. Diagrama de bloques del código .m del algoritmo MUSIC. . . . .	48
3.4. Diagrama de bloques del código $\beta$ . . . . .	49
3.5. Diagrama de bloques del código .m del algoritmo PSO. . . . .	52
3.6. Diagrama de bloques del código .m de la función Costo. . . . .	53
3.7. Procedimiento genérico para crear interfaces gráficas en Matlab . . . . .	53
3.8. Intefaz gráfica en blanco en Matlab . . . . .	54
3.9. Interfaz en la que se observa las características del arreglo . . . . .	57
3.10. Interfaz en la que se observa las características de la DoA . . . . .	57
3.11. Interfaz en la que se observa las características del PSO . . . . .	58
3.12. Interfaz en la que se configura el arreglo . . . . .	58
3.13. Interfaz de la DoA, cuando no están recibiendo señales que se observa el pseudoespectro MUSIC . . . . .	59
3.14. Interfaz de configuración la DoA . . . . .	60

3.15. Interfaces en la que se agregan o eliminan señales con esquemas de modulación ASK, FSK y QAM . . . . .	61
3.16. Interfaz de configuración la DoA al recibir señales . . . . .	62
3.17. Interfaz para observar las señales recibidas . . . . .	63
3.18. Interfaz del PSO . . . . .	63
3.19. Interfaz de la configuración del PSO . . . . .	64
3.20. Interfaz para observar los diagramas obtenidos . . . . .	64
3.21. Interfaz para observar los resultados obtenidos . . . . .	65
4.1. Señal 1. . . . .	68
4.2. Señal 2. . . . .	69
4.3. Señal 3. . . . .	69
4.4. Señal 4. . . . .	70
4.5. Espectro MUSIC con relación señal a ruido de 30 dB. . . . .	71
4.6. Espectro MUSIC con relación señal a ruido de 20 dB. . . . .	71
4.7. Espectro MUSIC con relación señal a ruido de 12 dB. . . . .	72
4.8. Señal 1. . . . .	73
4.9. Señal 2. . . . .	74
4.10. Señal 3. . . . .	74
4.11. Señal 4. . . . .	75
4.12. Espectro MUSIC de Señales a distinta Frecuencia de Portadora. . . . .	76
4.13. Señal 1. . . . .	77
4.14. Señal 2. . . . .	78
4.15. Señal 3. . . . .	78
4.16. Señal 4. . . . .	79
4.17. Señal 5. . . . .	79
4.18. Espectro MUSIC de Señales próximas entre sí. . . . .	80
4.19. Configuración de la Etapa DoA utilizada para las pruebas de la Etapa PSO. . . . .	82
4.20. Señal ASK (Señal 1). . . . .	83
4.21. Señal FSK (Señal 2). . . . .	84
4.22. Señal 16-QAM (Señal 3). . . . .	84
4.23. Espectro MUSIC de las señales. . . . .	85
4.24. Configuración de las variables del algoritmo PSO siendo $c_1 = 0$ . . . . .	86
4.25. Evolución del diagrama de radiación en dirección $60^\circ$ . . . . .	87
4.26. Evolución del diagrama de radiación en dirección $90^\circ$ . . . . .	87
4.27. Evolución del diagrama de radiación en dirección $135^\circ$ . . . . .	88
4.28. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	89
4.29. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	89
4.30. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	90
4.31. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	90
4.32. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	91

4.33. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	91
4.34. Configuración de las variables del algoritmo PSO siendo $c_2 = 0$ . . . . .	93
4.35. Evolución del diagrama de radiación en dirección $60^\circ$ . . . . .	94
4.36. Evolución del diagrama de radiación en dirección $90^\circ$ . . . . .	94
4.37. Evolución del diagrama de radiación en dirección $135^\circ$ . . . . .	95
4.38. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	96
4.39. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	96
4.40. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	97
4.41. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	97
4.42. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	98
4.43. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	98
4.44. Configuración de las variables del algoritmo PSO siendo $c_1$ y $c_2$ iguales a 1. . . . .	100
4.45. Evolución del diagrama de radiación en dirección $60^\circ$ . . . . .	101
4.46. Evolución del diagrama de radiación en dirección $90^\circ$ . . . . .	101
4.47. Evolución del diagrama de radiación en dirección $135^\circ$ . . . . .	102
4.48. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	103
4.49. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	103
4.50. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	104
4.51. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	104
4.52. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	105
4.53. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	105
4.54. Configuración de la función costo siendo el costo de los lóbulos laterales mayor. . . . .	107
4.55. Evolución del diagrama de radiación en dirección $60^\circ$ . . . . .	108
4.56. Evolución del diagrama de radiación en dirección $90^\circ$ . . . . .	108
4.57. Evolución del diagrama de radiación en dirección $135^\circ$ . . . . .	109
4.58. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	110
4.59. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	110
4.60. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	111
4.61. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	111
4.62. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	112
4.63. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	112
4.64. Configuración de la función costo siendo el costo de los nulos de radiación mayor. . . . .	114
4.65. Evolución del diagrama de radiación en dirección $60^\circ$ . . . . .	115
4.66. Evolución del diagrama de radiación en dirección $90^\circ$ . . . . .	115
4.67. Evolución del diagrama de radiación en dirección $135^\circ$ . . . . .	116
4.68. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	117
4.69. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	117
4.70. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	118
4.71. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	118

4.72. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	119
4.73. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	119
4.74. Configuración de la función costo siendo el costo de los nullos de radiación mayor. . . . .	121
4.75. Evolución del diagrama de radiación en dirección $60^\circ$ . . . . .	122
4.76. Evolución del diagrama de radiación en dirección $90^\circ$ . . . . .	122
4.77. Evolución del diagrama de radiación en dirección $135^\circ$ . . . . .	123
4.78. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	124
4.79. Diagrama de radiación a $60^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	124
4.80. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	125
4.81. Diagrama de radiación a $90^\circ$ con nivel de interferencia a $135^\circ$ . . . . .	125
4.82. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $60^\circ$ . . . . .	126
4.83. Diagrama de radiación a $135^\circ$ con nivel de interferencia a $90^\circ$ . . . . .	126
4.84. Configuración del arreglo de antenas. . . . .	128
4.85. Configuración de la Etapa DoA. . . . .	129
4.86. Señal 1 en el plano XY a $45^\circ$ del eje del arreglo. . . . .	129
4.87. Señal 2 en el plano XY a $120^\circ$ del eje del arreglo. . . . .	130
4.88. Señal 2 en el plano XY a $120^\circ$ del eje del arreglo. . . . .	130
4.89. Configuración del algoritmo PSO. . . . .	131
4.90. Evolución de las partículas en dirección a $45^\circ$ . . . . .	132
4.91. Evolución de las partículas en dirección a $120^\circ$ . . . . .	132
4.92. Pesos de los elementos de antena en dirección a $45^\circ$ . . . . .	133
4.93. Pesos de los elementos de antena en dirección a $45^\circ$ . . . . .	133
4.94. Pesos de los elementos de antena en dirección a $120^\circ$ . . . . .	134
4.95. Pesos de los elementos de antena en dirección a $120^\circ$ . . . . .	135
4.96. Pesos de los elementos de antena para máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	136
4.97. Pesos de los elementos de antena para máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	136
4.98. Configuración del Arreglo de Antenas. . . . .	137
4.99. Alimentación de los elementos de antenas con maxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	138
4.100 Alimentación de los elementos de antenas con maxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	138
4.101 Ganancia del Haz Principal en dirección de máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	139
4.102 Nivel de la señal interferente a $120^\circ$ , en dirección de máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	139
4.103 Nivel de la señal interferente a $120^\circ$ , en dirección de máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	140
4.104 Ganancia del Haz Principal en dirección de máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	142
4.105 Nivel de la señal interferente a $45^\circ$ , en dirección de máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	142
4.106 Nivel de la señal interferente a $45^\circ$ , en dirección de máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	143

---

4.107	Impedancia de entrada del elemento 1 en dirección de máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	145
4.108	Impedancia de entrada del elemento 1 en dirección de máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	145
4.109	Impedancias de entrada de los elementos 3,4 y 5 en dirección de máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	146
4.110	Impedancias de entrada de los elementos 6,7 y 8 en dirección de máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	147
4.111	Impedancias de entrada de los elementos 1,2 y 3 en dirección de máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	148
4.112	Impedancias de entrada de los elementos 4,5 y 6 en dirección de máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	149
4.113	Impedancia de entrada del elemento 7 en dirección de máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	150
4.114	Impedancia de entrada del elemento 8 en dirección de máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	150





# Indice de tablas

3.1. Espectro RF. . . . .	45
4.1. Configuración del Arreglo de Antenas. . . . .	68
4.2. Configuración del algoritmo MUSIC. . . . .	70
4.3. Valores de Señal a Ruido. . . . .	70
4.4. Resultados del Espectro MUSIC. . . . .	72
4.5. Configuración del Arreglo de Antenas. . . . .	73
4.6. Configuración del algoritmo MUSIC. . . . .	75
4.7. Frecuencias de Portadoras. . . . .	75
4.8. Resultados del Espectro MUSIC. . . . .	76
4.9. Configuración del Arreglo de Antenas. . . . .	77
4.10. Configuración del algoritmo MUSIC. . . . .	80
4.11. Resultados del Espectro MUSIC. . . . .	80
4.12. Parámetros DoA. . . . .	83
4.13. Nivel de las señales interferencias a la Señal 1. . . . .	90
4.14. Nivel de las señales interferencias a la Señal 2. . . . .	91
4.15. Nivel de las señales interferencias a la Señal 3. . . . .	92
4.16. Nivel de las señales interferencias a la Señal 1. . . . .	97
4.17. Nivel de las señales interferencias a la Señal 2. . . . .	98
4.18. Nivel de las señales interferencias a la Señal 3. . . . .	99
4.19. Nivel de las señales interferencias a la Señal 1. . . . .	104
4.20. Nivel de las señales interferencias a la Señal 2. . . . .	105
4.21. Nivel de las señales interferencias a la Señal 3. . . . .	106
4.22. Nivel de las señales interferencias a la Señal 1. . . . .	111
4.23. Nivel de las señales interferencias a la Señal 2. . . . .	112
4.24. Nivel de las señales interferencias a la Señal 3. . . . .	113
4.25. Nivel de las señales interferencias a la Señal 1. . . . .	118
4.26. Nivel de las señales interferencias a la Señal 2. . . . .	119
4.27. Nivel de las señales interferencias a la Señal 3. . . . .	120
4.28. Nivel de las señales interferencias a la Señal 1. . . . .	125
4.29. Nivel de las señales interferencias a la Señal 2. . . . .	126
4.30. Nivel de las señales interferencias a la Señal 3. . . . .	127

---

4.31. Modulos y Fases de los pesos de los elementos de antena en dirección a $45^\circ$ . . . . .	134
4.32. Módulos y Fases de los pesos de los elementos de antena en dirección a $120^\circ$ . . . . .	135
4.33. Nivel de las señales Interferentes. . . . .	137
4.34. Nivel de las señales Interferentes. . . . .	140
4.35. Nivel de las señales Interferentes. . . . .	143
4.36. Impedancias de los elementos cuando hay máxima radiación a $45^\circ$ . . . . .	144
4.37. Impedancias de los elementos cuando hay máxima radiación a $120^\circ$ . . . . .	144
2.1. Impedancias propias $Z_{11}$ , $Z_{33}$ y mutuas $Z_{13}$ obtenidas con $d=0.5$ y $l=0.5$	160

# Acrónimos

<b>CDMA</b>	<b>Code Division Multiple Access</b>
<b>SDMA</b>	<b>Space Division Multiple Access</b>
<b>ULA</b>	<b>Uniform Linear Array</b>
<b>DoA</b>	<b>Direction of Arrival</b>
<b>MUSIC</b>	<b>MUltiple SIgnal Classification</b>
<b>PSO</b>	<b>Particle Swarm Optimization</b>
<b>DSP</b>	<b>Digital Signal Processing</b>



# Constantes Físicas

Velocidad de la luz	$c$	$=$	$2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
Permitividad eléctrica (Vacío)	$\epsilon_0$	$=$	$8,854 \dots \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$
Permeabilidad magnética (Vacío)	$\mu_0$	$=$	$4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$



# Símbolos

B	Densidad de Campo Magnético	
$C_1$	Coefficiente de confianza individual	
$C_2$	Coefficiente de confianza colectivo	
$E(\mathbf{r}, t)$	Campo Eléctrico	V/m
G	Mejor solución encontrada por el grupo	
$P_i$	Mejor solución encontrada por la partícula i	
c	Velocidad de la luz	m/s
$S(t)$	Señal transmitida	
$N(t)$	Ruido Gaussiano	
$R_{xx}$	Matriz de Autocorrelación	
$X(i)$	Posición de la partícula i	
$V(i)$	Velocidad de la partícula i	
L	Cantidad de elementos del arreglo	
d	Distancia de separación entre los elementos del arreglo	$\lambda$
$\kappa$	Número de Onda	$m^{-1}$
$\lambda$	Longitud de Onda	m
$\omega$	Frecuencia angular	$rads^{-1}$
$\omega$	Inercia	





**DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRAFICA BASADA EN LAS TECNICAS  
DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)  
ORIENTADA AL DISEÑO DE ANTENAS INTELIGENTES**

por

VINCENZO BARTOLONE y RAFAEL CAMACHO

Presentado en el Departamento de Electromagnetismo y Radiación  
de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones  
el 30 de abril del 2016 para optar al Título de  
Ingeniero de Telecomunicaciones

**RESUMEN**

Los sistemas de antenas inteligentes detectan las señales que arriban a los arreglos de antenas por medio de los algoritmos de detección de arribo DoA y basados en la información que estos proporcionan el conformador de haz optimiza los pesos de cada elemento de antena de tal forma que el patrón de radiación es ajustado al mínimo para reducir cierta función de error o maximizado en función de cierta función determinada obtenida por el algoritmo adaptativo. En este sentido son muchos los algoritmos adaptativos existentes que se pueden utilizar para optimizar un arreglo de antenas inteligentes entre los cuales está el algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO). Basado en esto este trabajo de grado tiene como

objetivo principal diseñar una interfaz gráfica basada en las técnicas de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) orientada al diseño de antenas inteligentes. Sirviendo de base para futuros proyectos e investigaciones en el área de las antenas inteligentes, ya que hoy en día el estudio de este tipo de arreglos de antenas forma parte importante para el área de las comunicaciones logrando así desarrollar nuevas tecnologías. Este trabajo de grado estará fundamentado en tres etapas de las cuales la primera de ellas será una etapa netamente investigativa orientada al análisis y desarrollo teórico, pasando luego a una segunda etapa de diseño que estará orientada a todo lo referente con el diseño de los algoritmos y la interfaz gráfica, finalizando con una tercera etapa de prueba donde se evaluarán los resultados obtenidos.

Palabras Claves: Antenas, Inteligentes, PSO

Tutor: RAFAEL ALBORNOZ

Profesor del Departamento de Electromagnetismo y Radiación  
Escuela de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería

# Capítulo I

## El Problema

### 1.1. Motivación

En la actualidad las comunicaciones son parte fundamental en la cotidianidad del hombre, muchos son los medios utilizados para transmitir la información entre los que se pueden destacar el uso del cableado de cobre como medio de transmisión, las comunicaciones ópticas que basan su infraestructura en la fibra óptica para llevar la información de un lugar a otro, sin embargo estos medios de transmisión están orientados a comunicaciones estáticas basadas en una infraestructura de red previamente diseñada. A pesar de que medios como la fibra óptica son muy buenos ya que permiten transmisiones de grandes anchos de banda surge el inconveniente de que para que un usuario tenga acceso a la red por medio de esta infraestructura el mismo debe de estar conectado físicamente a la misma, por lo cual surge la necesidad de las comunicaciones móviles donde los usuarios no están físicamente conectados a la red ya que se conectan a la misma por medio del espacio libre utilizando ondas de radio frecuencia que le permiten contactarse a ella.

Las comunicaciones de radio frecuencia utilizan como medio de transmisión el espacio libre, es allí donde las antenas juegan un papel fundamental en las comunicaciones ya que las mismas son el instrumento que permite ir del mundo físico del cableado ya sea fibra óptica o cable coaxial, al mundo del espacio libre donde

el medio de transmisión es el aire. Las antenas son el medio de conexión entre los usuarios y la red, sin embargo las características de las mismas determinan las áreas de cobertura y la forma en que se conectan múltiples usuarios a ellas.

El excesivo incremento de usuarios en las redes de telecomunicaciones ha llevado a que la capacidad de los sistemas de antenas se vea limitada por lo cual surgen los sistemas de antenas inteligentes los cuales permiten aumentar la capacidad de la red, mejoran la calidad de la señal, ofrecen un mayor alcance y su nivel de seguridad es mayor.

Los sistemas de antenas inteligentes procesan las señales que llegan de diferentes direcciones para detectar la dirección de arribo de las señales (DoA). Basado en el DoA estimado, el conformador del haz optimiza los pesos de cada elemento de la antena de tal forma que el patrón de radiación es ajustado al mínimo para reducir cierta función de error o maximizado en función de cierta función determinada obtenida por el algoritmo adaptativo [1].

En este sentido son muchos los algoritmos adaptativos existentes que se pueden utilizar para optimizar un arreglo de antenas inteligentes y estos en base al DoA estimado determinan el comportamiento del arreglo en función de la señal de interés. Tomando en cuenta el avance de la tecnología esto ha conllevado a investigar y probar nuevos métodos que lleven a algoritmos más eficaces y eficientes, uno de estos métodos es la Optimización por Enjambre de Partículas o PSO (Particle Swarm Optimization).

La optimización por enjambre de partículas (PSO) es un algoritmo inspirado en el comportamiento social de individuos dentro de enjambres en la naturaleza. Este método emplea una búsqueda basada en poblaciones; en la cual los individuos, para desplazarse en el espacio de búsqueda, usan su propia experiencia y el conocimiento de sus vecinos con distintos grados de confianza [2]. Basado en esta definición el algoritmo se emplea dentro del sistema de antenas inteligentes para optimizar los pesos correspondientes a cada uno de los elementos del arreglo de antenas.

En 2013, Ahmed Magdy<sup>1</sup>, K. R. Mahmoud<sup>1</sup>, and S. Sayed en Estocolmo Suecia, realizaron un estudio acerca de Comunicaciones Cooperativas Basadas en Sistemas de Antenas inteligentes, donde utilizaron la optimización por enjambre de partículas (PSO) para optimizar la alimentación de cada uno de los elementos del arreglo antenas, obteniendo un lóbulo de radiación principal máximo en dirección de las señales de interés.

En 2009-2010, Chao-Hsing Hsu en el Departamento de Computación e Ingeniería de las Comunicaciones de la Universidad Tecnológica de Chienkuo Taiwan, realizó una investigación acerca de la Optimización de un Sistema MIMO-SDMA basado en la optimización por enjambre de partículas (PSO), donde a partir del desarrollo de las formulas del patrón de radiación se encontró el vector de pesos óptimo y el algoritmo PSO se aplicó para encontrar el patrón de radiación óptimo en el arreglo de antenas inteligentes, logrando establecer los nulos del patrón de radiación en dirección de las señales perturbadoras y maximizando el lóbulo principal en dirección de las señales de interés.

Este trabajo estará enfocado en el diseño de una interfaz gráfica o software que servirá para diseñar arreglos de antenas inteligente, basados en la optimización por enjambre de partículas (PSO) que encontrará la mejor solución de una cierta función costo que definirá el patrón de radiación del arreglo siendo el PSO el algoritmo adaptativo, además se utilizará el algoritmo MUSIC de detección de arribo (DoA) para proporcionar los datos de la ubicación de las señales de interés al algoritmo PSO que los utilizará para encontrar la mejor solución de la función fitness.

Para diseñar la interfaz gráfica y los algoritmos antes mencionados, este proyecto se desarrollara dentro del entorno de trabajo del software computacional MATLAB.

## **1.2. Justificación de la Investigación**

El desarrollo de la interfaz le permitirá al usuario explorar el funcionamiento de las antenas inteligentes, la evolución del patrón de radiación hasta obtener una

solución que cumpla con las direcciones de las DoAs detectadas para lograr una eficaz compresión del PSO. Por lo tanto este trabajo de grado tiene como finalidad servir como base de investigación y desarrollo para futuros proyectos enfocados en los arreglos de antenas inteligentes. Debido a que actualmente esta es un área de investigación de interés general para el desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación, este trabajo de grado servirá como apoyo y guía para futuras investigaciones.

### **1.3. Ojetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Diseñar una interfaz gráfica basada en las técnicas de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) orientada al diseño de antenas inteligentes.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Implementar el algoritmo MUSIC (Clasificación de Señal Múltiple) como algoritmo de detección de arribo (DoA) de señales para identificar la dirección de las señales de interés.
2. Desarrollar una función costo para la implementación de la misma en el algoritmo de optimización por enjambre de partículas.
3. Diseñar un algoritmo adaptativo para antenas inteligentes basado en la Optimización por Enjambre de Partículas.
4. Crear una interfaz gráfica simple orientada al diseño de arreglos de antenas inteligentes basándose en el algoritmo de detección de arribo MUSIC y en el algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) para realizar el Beamforming.

## 1.4. Alcances

La característica principal de los arreglos de antenas a utilizar para desarrollar la interfaz de usuario estará limitada a arreglos de antenas lineales conformados por dipolos, los cuales utilizaran el algoritmo MUSIC que permita determinar la dirección de las señales de interés, este algoritmo DoA suministrara la información necesaria para que el algoritmo adaptativo basado en la optimización por enjambre de partículas (PSO) pueda determinar los pesos de cada uno de los elementos del arreglo partiendo de una función de fitness que definirá y moldeara el patrón de radiación del arreglo. Todo esto se tomara en cuenta y se desarrollará dentro del código fuente que se realizara para crear la interfaz de usuario.

Para diseñar la interfaz gráfica basada en las técnicas de Optimización de Enjambre de Partículas (PSO) que se orientara al diseño de antenas inteligentes se utilizará el software MATLAB, donde se tomara como referencia los algoritmos de detección de arribo (DoA) codificados y simulados en [3] especialmente el algoritmo MUSIC para utilizar dicho algoritmo como parte fundamental del diseño de la interfaz gráfica o software, luego se desarrollara una función fitness que posteriormente será el corazón del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) que se codificará en MATLAB y posteriormente a esto desarrollará la interfaz gráfica dentro del apartado GUI de MATLAB.





## Capítulo II

# Marco conceptual

### 2.1. Sistemas Antenas Inteligentes

Es una agrupación de antenas con una unidad de Procesamiento Digital de Señales que optimiza los diagramas de transmisión y recepción dinámicamente en respuesta a una señal de interés en el entorno [4]. Se les denomina antenas inteligentes debido a que pueden modificar su patrón de radiación y recepción. Estas se clasifican en tres tipos de sistemas: el sistema de haz conmutado, de haz de seguimiento y el de haz adaptativo. Estos tres sistemas se diferencian uno de otro por su nivel de inteligencia y a su vez cada uno de ellos por medio de su propia infraestructura poseen criterios que utilizan para identificar y ubicar a los usuarios dentro de la red, generando luego diagramas muy directivos enfocados directamente hacia cada uno de los usuarios de la red.

La implementación de los sistemas de antenas inteligentes en una red de comunicaciones móviles se limita, en principio a las estaciones base (o Nodos B en UMTS), debido a que necesariamente se deben emplear sistemas radiantes de mayor tamaño (arreglos de antenas). Esto tiene la ventaja añadida de que pueden introducirse las antenas inteligentes de forma transparente para los usuarios, que no tendrán que cambiar de terminal para beneficiarse de esta tecnología [5]. Entre las principales ventajas de la antenas inteligentes según [6] se encuentran:

- **Incremento de la zona de cobertura.**

Al utilizar arreglos de antenas la ganancia es mayor que en el caso de sean omnidireccionales o sectoriales, y se logra transmitir la misma cantidad de potencia. Esto minimiza el número de estaciones bases que se requieren para cubrir determinada zona.

- **Reducción de la potencia transmitida.**

Debido al aumento de la ganancia gracias a los arreglos de antenas la sensibilidad de la estación base aumenta, generando así que la potencia que deban transmitir los equipos móviles sea menor. Por otro lado los arreglos de antenas inteligentes pueden radiar una potencia menor lo cual simplifica las etapas amplificadoras del sistema de antenas reducción así costos en los amplificadores.

- **Reducción de la propagación multitrayecto.**

Dependiendo de la configuración del arreglo de antenas inteligentes se tiene las siguientes configuraciones:

1. El arreglo de antenas capta la onda principal de la señal de interés, reduce y elimina las señales de multitrayecto propias y las interferentes de otros usuarios.
2. El arreglo de antenas se enfoca en captar la onda principal de la señal de interés y sus señales de multitrayecto propias, reforzando la señal principal, y a su vez elimina las señales interferentes de otros usuarios.

- **Reducción del nivel de interferencia.**

Una de las grandes ventajas de los arreglos de antenas inteligentes es la selectividad espacial que proporcionan estos sistemas, ya que permite discernir las señales interferentes provenientes de otros usuarios logrando con ello hacer insensible al sistema hacia estas direcciones, evitando así que esas señales sean procesadas en el sistema. También permite reducir la potencia de transmisión en la dirección de esos usuarios para evitarles interferencias.

- **Mejora de la seguridad.**

Debido a la direccionalidad de la transmisión entre la estación y el usuario móvil, es muy difícil que otro intercepte la comunicación, a menos que el mismo este ubicado en la misma dirección en que apunta el haz de la antena. También se hace fácil localizar a los usuarios que estén haciendo uso fraudulento de los servicios que ofrece la red de comunicación móvil.

- **Introducción de nuevos servicios.**

La implementación de los sistemas de antenas inteligentes ha permitido el desarrollo en otras áreas fuera de las comunicaciones móviles. Estos sistemas pueden ser aplicados como sensores en áreas tales como radares, sonares, aplicaciones térmicas, sismología, exploración petrolera, bioingeniería entre otras áreas.

### **2.1.1. Tipos de Antenas Inteligentes**

#### **2.1.1.1. Sistema de haz conmutado**

Es la configuración más simple de antenas inteligentes. El sistema genera varios haces a ángulos prefijados que se van conmutando mediante un barrido angular, obteniendo múltiples zonas de cobertura en posiciones angulares fijas. En cada posición discreta del haz se verifica con un sistema detector la posible existencia de señales. En caso de recibir señal, el sistema guarda información correspondiente a la posición del haz y se establece la comunicación con el usuario durante un intervalo de tiempo. Después del cual se conmuta al siguiente haz para detectar otros usuarios hasta llegar al límite angular de la zona de cobertura. Este proceso de repite permanentemente en el tiempo [7].

#### **2.1.1.2. Haz de seguimiento**

Se utiliza un arreglo de antenas con una red de excitación, que permite controlar electrónicamente las fases de las corrientes de excitación que llegan a los elemen-

tos del arreglo, de manera que puede modificarse a voluntad la dirección en la que apunta el haz y, de este modo, establecer comunicación con el usuario deseado. A su vez, es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la Dirección de Arribo (DoA), de modo que pueda reorientarse dinámicamente el haz para apuntar al usuario deseado. Con esta técnica sí se garantiza que el usuario esté en el lóbulo principal en todo momento y con máxima ganancia (teniendo en cuenta las limitaciones de los algoritmos empleados). Sin embargo, tampoco se puede evitar que las interferencias entren por algún lóbulo secundario del diagrama de radiación [7].

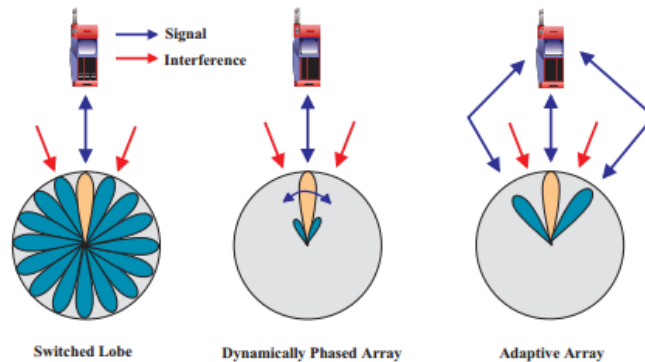
### 2.1.1.3. Haz adaptativo

Los arreglos de antenas inteligentes de haz adaptativo son considerados como los sistemas con el mayor grado de inteligencia. Un arreglo de antenas de haz adaptativo es un conjunto de elementos que pueden adaptar su patrón de radiación a los cambios de su entorno. Cada uno de los elementos del arreglo está asociado con un peso que se adapta para maximizar la ganancia del arreglo hacia la dirección de interés, mientras que la minimiza hacia las direcciones interferentes. En otras palabras estos sistemas cambian su patrón de radiación dinámicamente ajustándose a los canales de ruido y a las señales interferentes para mejorar la relación señal a ruido de la señal de interés [8].

Se puede decir que los arreglos adaptativos están subdivididos en dos clases: la primera son los arreglos de antenas de haz de seguimiento donde solo la fase de las corrientes es cambiada en los pesos de los elementos del arreglo, y la segunda clase son los arreglos de haz adaptativo donde ambos tanto la amplitud como la fase de las corrientes son cambiadas creando así el haz deseado. Ambos sistemas intentan aumentar la ganancia en dirección de la señal de interés sin embargo el sistema de haz adaptativo es el único capaz de proveer máxima ganancia hacia la señal de interés y al mismo tiempo es capaz de identificar, seguir y minimizar otras señales interferentes [8].

### 2.1.2. Beneficios de los sistemas de antenas inteligentes

En términos del diagrama de radiación, los sistemas de haz conmutado son una extensión del sistema de sectorización de celdas donde una celda es sectorizada en 3 sectores de  $120^\circ$  de cobertura o 4 sectores de  $90^\circ$  cada uno. La conmutación de haz subdivide estos sectores en varios más pequeños llamados micro-sectores mejorando así el rango y la capacidad del sistema. Cada uno de estos pequeños sectores contiene un patrón de haz fijo predeterminado que tiene mayor sensibilidad en el centro del patrón y menor en sus adyacencias, en la figura 2.1 podemos observar la subdivisión de estos sectores [8].



**Figura 2.1:** Sistemas de antenas inteligentes: De izquierda a derecha Sistema de Haz Conmutado, de Haz de Seguimiento, y de Haz Adaptativo.

El sistema de haz conmutado selecciona uno de varios patrones de haz fijos predeterminados con la mayor salida de potencia en el canal del usuario, esto lo hace por medio de software y equipos de RF de banda base o DSP. En base a esto conmuta su haz en diferentes direcciones a través del espacio cambiando las diferencias de fases de las señales que alimentan los elementos de antenas o que recibe de estos. Cuando el usuario móvil entra en uno de los sectores de la celda, el sistema selecciona el haz conmutado que contenga la mayor potencia dentro del micro-sector donde se encuentre el usuario. A través de la transmisión, el sistema monitorea la fuerza de la señal y conmuta la transmisión a otro micro-sector según sea necesario [8].

Todos los sistemas de conmutación de haz proveen beneficios similares incluso aunque varios de estos sistemas utilicen diseños diferentes tanto a nivel de su arquitectura como de su software. Cuando los comparamos con los sistemas convencionales de celdas sectorizadas, los sistemas de conmutación de haz pueden incrementar el rango de una estación base de un 20 % a un 200 % dependiendo de las circunstancias [8].

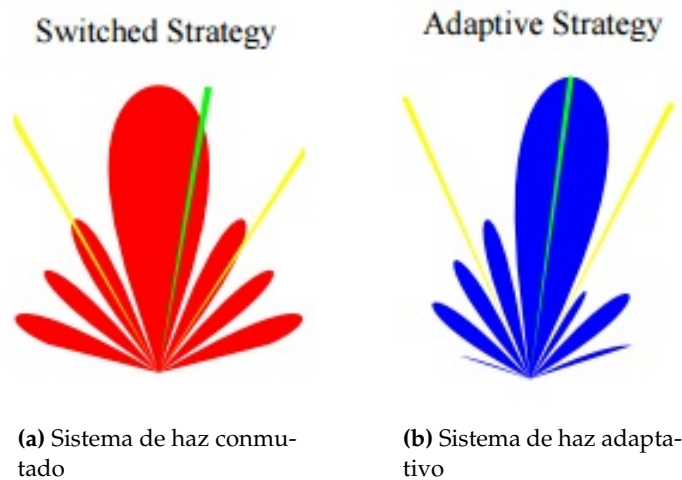
Hay sin embargo, limitaciones en los sistemas de haz conmutado. Debido a que los haces están predeterminados, la fuerza de la señal varía cuando el usuario se mueve a través del sector. Como se mueve hacia los bordes del lóbulo principal del haz, la fuerza de la señal puede decaer rápidamente antes de que el usuario se conmute a otro micro-sector. Otra limitación ocurre debido a que el sistema de conmutación haz no está en la capacidad de distinguir entre la señal de interés y una señal interferente. Si la señal interferente esta aproximadamente en el centro del haz y la señal deseada está alejada del centro del mismo, la señal interferente se sobrepone a la señal deseada. En estos casos la calidad de la transmisión disminuye [8].

Los arreglos de antenas de haz adaptativo tienen un enfoque diferente. Ya que a diferencias de los arreglos de haz conmutado, los arreglos de haz adaptativo pueden alterar dinámicamente su haz para optimizar el rendimiento del sistema [8].

Estos sistemas adaptativos utilizan algoritmos de procesamiento digital sofisticados para distinguir continuamente entre las señales deseadas, las propagaciones multitrayecto de las mismas y las señales interferentes, así como también calcula sus direcciones de arribo. El sistema continuamente ajusta sus diagramas de radiación basándose en los cambios de localización de las señales de interés y las señales interferentes. La habilidad de hacerles seguimiento a los usuarios con los lóbulos principales y anular al mismo tiempo las señales interferentes con nulos asegura que la transmisión con el usuario sea constante al no haber micro-sectores de cobertura como en los sistemas de haz de seguimiento [8].

Como se vio anteriormente los sistemas de haz de adaptativo representan el mayor nivel de inteligencia de este tipo de sistemas, ya que están en la capacidad

de seguir y adaptarse tanto a las señales de interés como a las señales interferentes [8].



**Figura 2.2:** Patrón de radiación para haces conmutados y adaptativos

Como se observa a la izquierda de la figura 2.2 los sistemas de haz conmutado maximizan su patrón de radiación hacia la dirección de la señal de interés en este caso representada por la línea verde, sin embargo el patrón de radiación no está en la capacidad de anular las señales interferentes por completo ya que dichas señales representadas por las líneas amarillas caen dentro de lóbulos laterales de niveles de potencia bajos con respecto al haz principal. Por otro lado como se puede observar a la derecha de la figura los sistemas de haz de adaptativos maximizan su patrón de radiación hacia la señal de interés con mayor precisión y al mismo tiempo están en la capacidad de anular las señales interferentes ubicando nulos de radiación en dirección a estas [8].

En la figura 2.3 se observa la capacidad que tienen los sistemas de haz adaptativos durante una transmisión con un usuario móvil. Se observa que el sistema está en la capacidad de conocer y al mismo tiempo actualizar la ubicación del usuario móvil con quien está realizando una transmisión a medida que este se traslada dentro de la celda. Esto trae como consecuencia que el sistema está en la capacidad de modificar por completo su patrón de radiación para seguir atendiendo al usuario

en la nueva posición donde se ubique y al mismo tiempo anular a las demás señales interferentes ubicándolas en nulos de radiación [8], como se observa tanto en las figuras 2.3a como en 2.3b.

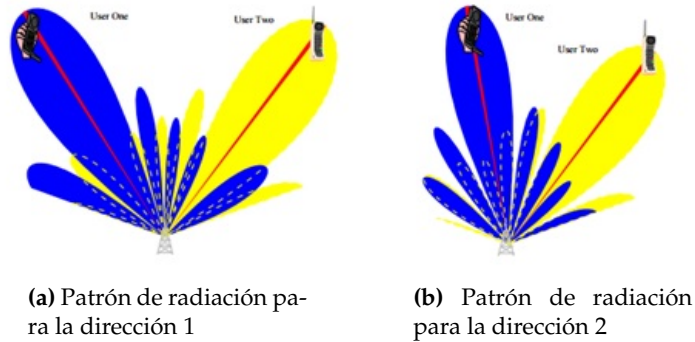


Figura 2.3: Patrón de radiación para haces conmutados y adaptativos

## 2.2. Consideraciones generales para el modelo de un arreglo de antenas.

Es necesario realizar un planteamiento matemático del sistema físico para tomar en cuenta todas las variables presentes dentro del sistema. Se toma el modelo general de propagación de ondas electromagnéticas como base para el modelado del arreglo de antenas, modelo necesario para el planteamiento de un algoritmo de detección de arribo (DoA) que será utilizado como parte fundamental del sistema de arreglo de antenas inteligentes proveyendo la información necesaria que utilizara el algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) para el beamforming del sistema.



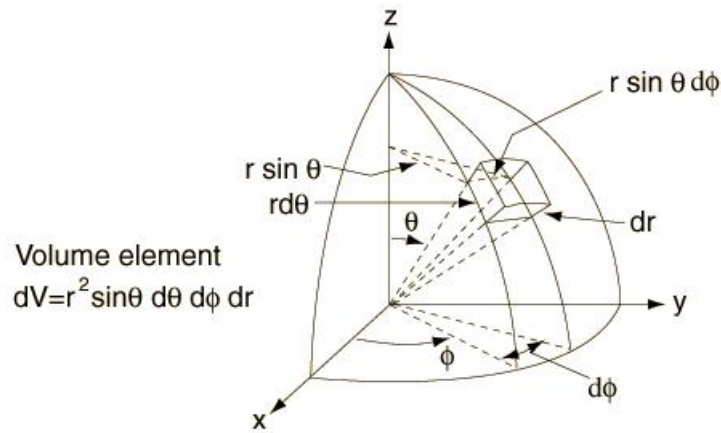


Figura 2.4: Sistema de eje de coordenadas esféricas.

En la figura 2.4 podemos observar el sistema de ejes de coordenadas esféricas, el cual será el sistema de coordenadas espacial que se utilizará a lo largo de este trabajo.

### 2.2.1. Problema Físico de la Propagación de Onda

Para solucionar el problema físico de propagación de onda, partimos de las ecuaciones de Maxwell en el espacio libre (ver ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4), donde la ausencia de cargas eléctricas implican la existencia de campos electromagnéticos [9] [10]. El problema de propagación se soluciona por medio de la ecuación de onda para un medio homogéneo [10].

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.4)$$

El símbolo ( $\times$ ) es el operador rotacional el cual representa la tendencia de un campo vectorial a inducir rotación alrededor de un punto, ( $\cdot$ ) representa la divergencia la cual mide la diferencia entre el flujo saliente y el flujo entrante de un campo vectorial sobre la superficie que rodea a un volumen. Por otro lado  $\mathbf{B}$  es la inducción magnética y  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico. Mientras que  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$  son las constantes dieléctrica y magnética, respectivamente. Usando la ecuación 2.1 en la siguiente identidad vectorial, resulta:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} \quad (2.5)$$

De las ecuaciones 2.3 y 2.4, se tiene:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{B}) = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Tomando en cuenta la ley de Gauss y el hecho de que no hay cargas, el primer término del lado izquierdo de la ecuación 2.5 se anula y combinando la ecuación 2.6 con la identidad vectorial de la ecuación 2.5, se tiene la forma homogénea de la ecuación de onda [9] [10]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

En el espacio libre  $c$  es la velocidad de propagación de una onda electromagnética, donde  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ . Al resolver la ecuación de onda, el campo eléctrico  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  en dirección de  $\mathbf{r}$  es [10]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \cong S(t)e^{j(\omega t - \mathbf{r}^T \mathbf{k})} \quad (2.8)$$

Donde  $S(t)$  es la señal transmitida y varía lentamente en comparación a la portadora  $e^{j\omega t}$  de frecuencia angular  $\omega$ . El término  $e^{j(\omega t - \mathbf{r}^T \mathbf{k})}$  representa la variación espacial del campo eléctrico,  $\mathbf{r}^T$  indica la transpuesta del vector posición,  $\mathbf{k}$  es el vector de onda y su magnitud  $|\mathbf{k}| = k = \omega/c = 2\pi/\lambda$  es el número de onda y  $\lambda$  es la longitud de onda.

### 2.2.2. Modelo Paramétrico de los Datos

La mayoría de los enfoques modernos al procesamiento de señales, se basan en ciertas suposiciones hechas a los datos observados [10]. En este trabajo de grado se adoptará el siguiente modelo.

Para simplificar la notación de los siguientes análisis, se asume que el vector de onda está contenido en el plano  $x - y$ , en cuyo caso  $\theta = 90$ . En la Figura 2.5 se muestra un arreglo genérico, donde la dirección de llegada de la fuente (usuario) se simboliza con el ángulo  $\theta$ , y se mide respecto al eje  $x$ .

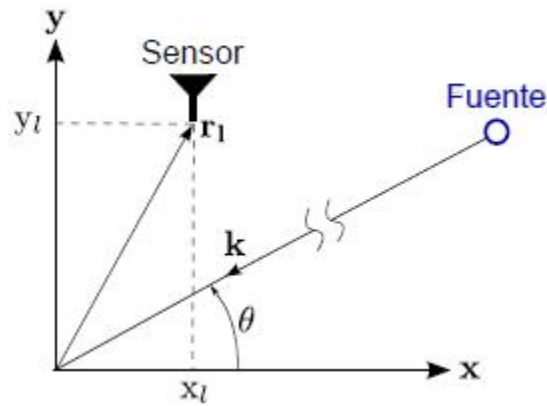


Figura 2.5: Geometría de un arreglo genérico

Para el modelo asumido, el vector de onda queda descrito como:

$$\mathbf{k} = k \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{pmatrix}^T \quad (2.9)$$

Y para el sensor, se tiene:

$$\mathbf{r}_1 = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \end{pmatrix}^T \quad (2.10)$$

Donde el superíndice T indica la transpuesta. Usando las ecuaciones 2.8 y 2.9, el campo eléctrico medido en el sensor l para un arreglo genérico es:

$$E(\mathbf{r}_1, t) = S(t)e^{j[\omega t - k(x_1 \cos(\theta) + y_1 \sin(\theta))]} \quad (2.11)$$

Para que todos los elementos del arreglo se comporten exactamente igual, se necesita que cada uno tenga una ganancia unitaria en todo el ancho de banda de la señal y, en consecuencia la salida que resulta será proporcional al campo eléctrico recibido. Con esta condición, y descartando por conveniencia el término de la portadora pues en la práctica generalmente la señal es reducida a banda base antes del muestreo [10], la señal de salida  $x_l(t)$  del  $l$ -ésimo elemento queda modelada por:

$$x_l(t) = e^{-jk(x_l \cos(\theta) + y_l \sin(\theta))} S(t) = a_l(\theta) S(t) \quad (2.12)$$

Para un arreglo de antenas de  $L$  elementos con geometría arbitraria, el vector de salida del arreglo se obtiene como:

$$x(t) = a_l(\theta) S(t) \quad (2.13)$$

Donde  $a_l(\theta)$  es el llamado vector de direccionamiento, acción vector o vector de propagación del arreglo, el cual representa la respuesta del arreglo dada una dirección de llegada  $\theta$  [10].

### 2.2.3. Arreglo de Antenas

El desarrollo de este trabajo de grado estará basado en los Arreglos Lineales Uniformes o como son llamados por sus siglas en inglés (ULA), como arreglos base para el desarrollo de los sistemas de antenas inteligentes. Cuyo eje del arreglo está ubicado a lo largo del eje  $X$  de coordenadas.

Para el caso de un arreglo lineal uniforme ubicado a lo largo del eje  $X$  como se observa en la figura 2.6 el vector de direccionamiento puede ser desarrollado de la siguiente manera. Tomando en cuenta que el arreglo está ubicado a lo largo del eje la ecuación 2.12 toma la siguiente forma:

$$X_l(t) = e^{-jkx_l \cos(\theta)} S(t) = a_l(\theta) S(t) \quad (2.14)$$

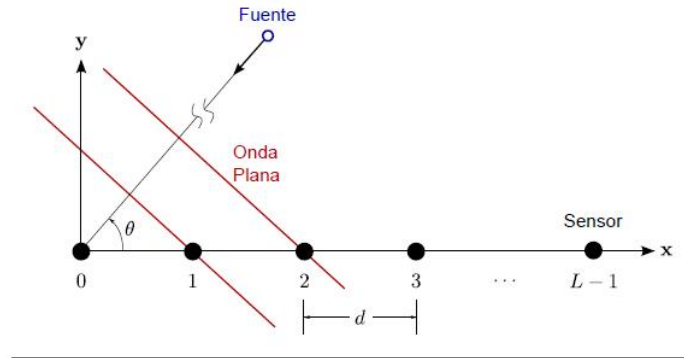


Figura 2.8: Arreglo Lineal Uniforme (ULA) de un conjunto de antenas.

Figura 2.6: Geometría de un Arreglo Lineal Uniforme ubicado en el eje X

De la ecuación 2.10 para un ULA se tiene que:

$$r_l = \begin{pmatrix} x_l & 0 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} ld & 0 \end{pmatrix}^T \quad (2.15)$$

Donde  $l = 0, 1, 2, \dots, L - 1$  representa los elementos del arreglo, y  $d$  es la distancia entre dos elementos de antenas consecutivos, por lo tanto  $r_l$  representa el vector de posición desde el origen de coordenadas hasta el  $l$ -ésimo elemento del arreglo [10]. Asumiendo que el primer elemento del arreglo está ubicado en el origen de coordenadas  $(0, 0)$ , la onda plana que llega al elemento 2 viaja una distancia más larga igual a  $d \cos \theta$  con respecto al frente de onda que llega al primer elemento, por lo tanto llega después. El atraso de fase con el que llega la onda al elemento 2 con respecto al elemento 1 viene dado por el argumento  $kld \cos \theta$  que surge de las ecuaciones 2.14 y 2.15, y esto mismo ocurre con cada uno de los elementos quedando el vector de direccionamiento de un ULA descrito como [11]:

$$a_{\text{ULA}}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & e^{-jk d \cos \theta} & e^{-jk 2d \cos \theta} & \dots & e^{-jk(L-1)d \cos \theta} \end{pmatrix}^T \quad (2.16)$$

Nótese que para el caso de un arreglo lineal, el vector de direccionamiento es independiente de la elevación del ángulo  $\phi$  [11]. Consideremos un arreglo de antenas de  $L$  elementos que recibe  $P$  señales incidentes de usuarios localizados en distintas direcciones  $\theta_1, \dots, \theta_P$ . Entonces el vector de salida del arreglo puede ser expresado

como:

$$x(t) = a(\theta_1)S_1 + \dots + a(\theta_P)S_P = \sum_{i=1}^P a(\theta_i)S_i \quad (2.17)$$

Donde  $S_i(t)$ , con  $i = 1, \dots, P$  representa la  $i$ -enésima señal en banda base. La ecuación 2.17 se puede escribir de forma compacta si se define una matriz de direccionamiento y un vector de señales de la siguiente forma:

$$A(\theta) = \begin{pmatrix} a(\theta_1) & a(\theta_2) & \dots & a(\theta_P)e^{-jk(L-1)d \cos \theta} \end{pmatrix}_{L \times P} \quad (2.18)$$

$$S(t) = \begin{pmatrix} s_1(t) & s_2(t) & \dots & s_P(t) \end{pmatrix}_{P \times 1}^T \quad (2.19)$$

De esta manera y tomando en cuenta la presencia de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN-Additive White Gaussian Noise), se obtiene el modelo general del sistema:

$$X(t) = (A(\theta)S(t) + n(t))_{L \times 1} \quad (2.20)$$

Todos los métodos de estimación DOA requieren que  $P < L$  donde  $P$  representa el número de señales incidentes y  $L$  el número de elementos del arreglo. Es interesante notar que en el caso de que haya ausencia de ruido, la salida del arreglo esta entonces confinada a un sub-espacio dimensional  $P$  del espacio total, lo cual prevén los vectores de direccionamiento. Este sub-espacio dimensional  $P$  es el sub-espacio de la señal, y en base a esto están fundamentados los métodos basados en sub-espacios [10].

#### 2.2.4. Matriz de Observaciones

En la práctica, para la estimación de la dirección de arribo DoA mediante el procesamiento de señales se utiliza un conjunto finito de datos. Partiendo del vector de salida  $x(t)$ , se genera una matriz  $X(t)$  que contiene las  $N$  observaciones de  $L$  elementos de antena, para  $t = 1, 2, \dots, N$ . De forma similar a la ecuación 2.20, la

expresión matricial para un conjunto de observaciones queda definida como:

$$X(t) = (A(\theta)S(t) + N(t))_{L \times N} \quad (2.21)$$

En base a un arreglo lineal de antenas como el que se observa en la figura 2.7 se deduce la matriz de observaciones a partir de un arreglo lineal de antenas, generalizado en cuanto a la separación de sus elementos [7].

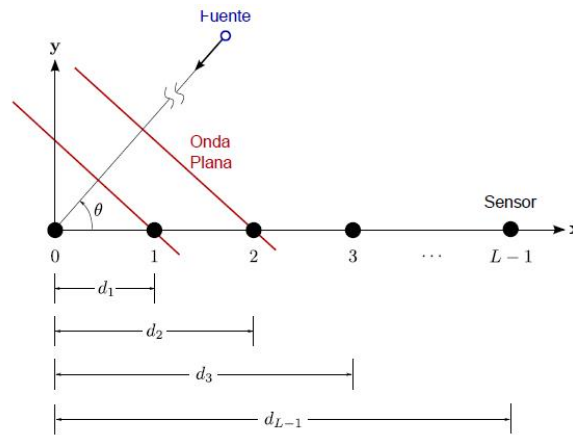


Figura 2.7: Arreglo lineal de antenas

De acuerdo al número de elementos de antena L se tiene que:

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(N) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L(1) & x_L(2) & \cdots & x_L(N) \end{pmatrix}_{L \times N} \quad (2.22)$$

Por otro lado, la matriz de direccionamiento  $A(\theta)$  se expande con respecto al número de elementos de antena L de la siguiente manera:

$$A(\theta) = \begin{pmatrix} a(\theta_1) & a(\theta_2) & \cdots & a(\theta_1) \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

$$\therefore A(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ e^{-jk d_1 \cos \theta_1} & e^{-jk d_1 \cos \theta_2} & \dots & e^{-jk d_1 \cos \theta_P} \\ e^{-jk d_2 \cos \theta_1} & e^{-jk d_2 \cos \theta_2} & \dots & e^{-jk d_2 \cos \theta_P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-jk d_L \cos \theta_1} & e^{-jk d_L \cos \theta_2} & \dots & e^{-jk d_L \cos \theta_P} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

y la matriz de observaciones de las fuentes  $S(t)$  queda definida como:

$$S(t) = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_P(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1(1) & s_1(2) & \dots & s_1(N) \\ s_2(1) & s_2(2) & \dots & s_2(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_P(1) & s_P(2) & \dots & s_P(N) \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

La matriz  $N(t)$  de Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN) cuya media es cero y varianza  $\sigma^2$ , se puede definir de la siguiente manera:

$$N(t) = \begin{pmatrix} n(1) & n(2) & \dots & n(N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1(1) & s_1(2) & \dots & n_1(N) \\ n_2(1) & s_2(2) & \dots & n_2(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_L(1) & n_L(2) & \dots & n_L(N) \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

### 2.2.5. Matriz de Correlación

Muchos de los algoritmos de estimación de la DoA dependen de la matriz de correlación entre las señales incidentes  $S_d(k)$  y las señales recibidas  $X_m(k)$ . Cada señal recibida contiene un nivel de ruido denominado ruido Gaussiano, ya que su densidad de probabilidad corresponde a una distribución de Gauss y por lo tanto es de promedio cero. Este ruido Gaussiano se introduce inevitablemente en el medio de transmisión ya que es inherente a este.



Si las fuentes están en movimiento la matriz de vectores de dirección varía con el tiempo y los correspondientes ángulos de arribo también cambian. A menos que se indique lo contrario, la dependencia del tiempo puede suprimirse y la matriz de correlación quedaría dada por:

$$R_{xx} = E[X(t)X(t)^H] \quad (2.27)$$

Dado que:

$$X(t) = A(\theta)S(t) + n(t) \quad (2.28)$$

Y utilizando la propiedad:

$$(PQ)^H = Q^H P^H \quad (2.29)$$

Se obtiene:

$$R_{xx} = E[(A(\theta)S(t) + n(t))(A(\theta)^H S(t)^H + n(t)^H)] \quad (2.30)$$

$$R_{xx} = E[A(\theta)S(t)S(t)^H A(\theta)^H + A(\theta)S(t)n(t)^H + n(t)S(t)^H A(\theta)^H + n(t)n(t)^H] \quad (2.31)$$

$$R_{xx} = E[A(\theta)S(t)S(t)^H A(\theta)^H] + E[A(\theta)S(t)n(t)^H] + E[n(t)S(t)^H A(\theta)^H] + E[n(t)n(t)^H] \quad (2.32)$$

Los términos  $E[A(\theta)S(t)n(t)^H] = 0$  y  $E[n(t)S(t)^H A(\theta)^H] = 0$  ya que corresponden a la matriz de ruido Gaussiano y, por definición, el valor esperado (promedio)

de una distribución de probabilidad Gaussiana es 0 y además tomando en cuenta que  $A(\theta)$  es constante, resulta:

$$R_{xx} = A(\theta)R_{ss}A(\theta)^H + R_{nn} \quad (2.33)$$

Donde:

$R_{xx}$  es la matriz de autocorrelación de las señales recibidas por el arreglo de antenas.

$R_{ss}$  es la matriz de autocorrelación de las señales incidentes.

$R_{nn}$  es la matriz de autocorrelación de ruido  $\sigma_n^2 I$ .

$I$  es una matriz identidad de  $L \times L$ .

$(\cdot)^H$  es el hermitiano de una matriz.

La matriz de autocorrelación de las señales recibidas por el arreglo de antenas  $R_{xx}$  es función de la matriz de autocorrelación de las señales incidentes  $R_{ss}$ . Dadas  $N$  muestras, la matriz de covarianza queda expresada como [12]:

$$R_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t)x(t)^H \quad (2.34)$$

Cabe señalar que cuando no hay correlación en las señales,  $R_{ss}$  es una matriz diagonal ya que los elementos fuera de la diagonal no están correlacionados. Cuando las señales son parcialmente correlacionadas, la matriz  $R_{ss}$  es no-singular. Finalmente cuando las señales son coherentes,  $R_{xx}$  es singular.

### 2.3. Detección de dirección de arribo

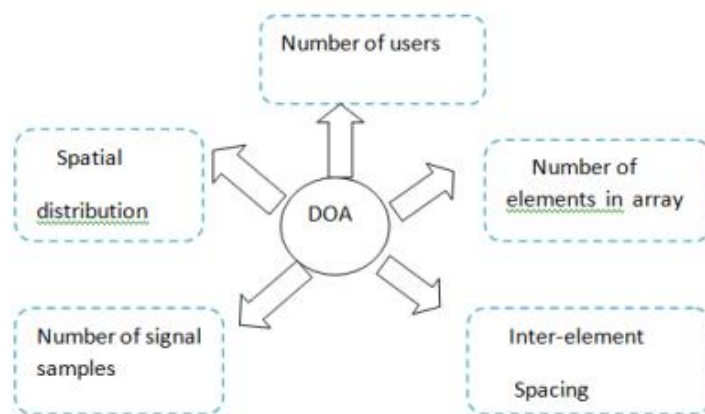
Las técnicas usadas para la detección de la dirección de arribo (DoA) de señales de radio en sistemas móviles ha reviso especial atención debido a que la estimación

de la dirección de arribo de varias señales incidentes en un arreglo de sensores (antenas), es requerida en otros campos fuera de las comunicaciones móviles [13].

La estimación de la dirección de arribo (DoA) utilizando una antena fija tiene varias desventajas como una resolución limitada por el ancho de haz del lóbulo principal de la antena. El ancho del haz del lóbulo principal de la antena es inversamente proporcional al tamaño físico. Por lo tanto, mejorar la precisión de la medida del ángulo incrementando el tamaño físico de la antena no siempre es una solución viable [13].

Por lo tanto un sistema de arreglo de antenas con un procesador de señales DSP puede mejorar la resolución del DoA. Un arreglo de antenas tiene un mejor rendimiento en recepción de las señales y la estimación de los parámetros [13].

Como se observa en la figura 2.8 la estimación del DoA depende de muchos parámetros como el número de usuarios móviles, el espaciado entre los elementos de antena, el número de señales y la distribución espacial [13].



**Figura 2.8:** Parámetros de estimación de la DoA

Los resultados y la precisión de la estimación de la dirección de arribo DoA pueden ser afectados por varios factores entre los que están [14]:

1. **Número de elementos del arreglo:** el número de elementos del arreglo de antenas puede afectar el rendimiento de la estimación DoA en un algoritmo de alta resolución. En términos generales, se podría decir que mientras más elementos contenga el arreglo mejor será la resolución del algoritmo.
2. **Muestras:** En el dominio del tiempo son definidas como muestras, sin embargo en el dominio de la frecuencia el número de muestras es definido como el número de sub-segmentos de tiempo de la transformada discreta de Fourier (DFT).
3. **Relación Señal a Ruido (SNR):** Asumiendo que la señal y el ruido tienen densidad espectral de potencia en la banda de paso plana, y la potencia de la la señal es  $\sigma_p^2$ , la potencia del ruido es  $\sigma_n^2$ , entonces la SNR se puede definir como:

$$\text{SNR} = 20 \log \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \right) \quad (2.35)$$

La relación señal a ruido afecta directamente la resolución de la estimación del algoritmo DoA. Con una SNR baja, el rendimiento de la resolución del algoritmo podría caer. Por lo tanto, la forma de mejorar el algoritmo con una SNR baja, es enfocarse en un algoritmo DoA de alta resolución.

El desarrollo de este trabajo estará enfocado en utilizar el algoritmo MUSIC como algoritmo DoA del sistema de antenas inteligentes para la detección de las señales de arriba, ya que el mismo es considerado como un algoritmo DoA de alta resolución y fácil implementación.

### 2.3.0.1. Algoritmo MUSIC

El algoritmo MUSIC tiene como idea básica llevar a cabo la descomposición característica de la matriz de correlación de datos, resultando en un sub-espacio de señal ortogonal con un sub-espacio de ruido correspondiente a los componentes de la señal entonces estos dos sub-espacios ortogonales son usados para construir una función de espectro, que por medio de la búsqueda espectral de picos, detecta el DoA de las señales [15].

Esto es debido a que el algoritmo MUSIC tiene una alta exactitud, estabilidad y resolución bajo ciertas condiciones. En general, posee las siguientes ventajas cuando es usado para estimar el DoA de las señales [14]:

1. Medición simultánea de múltiples señales.
2. Medición de alta resolución.
3. Alta resolución para señales de haz de antenas.
4. Se aplica a circunstancias de datos cortos.
5. Puede llevar a cabo procesamiento en tiempo real después de usar tecnología de procesamiento de alta velocidad.

El algoritmo MUSIC como muchas de las técnicas adaptativas, es dependiente de la matriz de correlación de datos, por lo cual partiendo de la ecuación de esta [13]:

$$R_{xx} = E[X(t) X(t)^H] \quad (2.36)$$

Donde  $E(\cdot)$  representa la expectativa y  $(\cdot)^H$  representa la transpuesta conjugada del hermitiano [13].

Sustituyendo los valores de 2.20 y 2.36, el resultado de la expresión de  $R_{xx}$  podemos obtenerlo utilizando:

$$R_{xx} = APA^H + \sigma^2 I \quad (2.37)$$

Donde  $P$  es la matriz de covarianza del vector de las señales, y es obtenida de acuerdo con:

$$P = E[s(t) s(t)^H] \quad (2.38)$$

La matriz de covarianza del ruido está dada por  $\sigma^2$  y viene dada de acuerdo a:

$$E[\mathbf{n}(t) \mathbf{n}(t)^H] \quad (2.39)$$

l queda definida como una matriz unitaria de  $L \times L$  [13].

La matriz de correlación es estimada utilizando la ecuación 2.24, donde  $N$  es el número de muestras. Realizando la descomposición en auto-valores y auto-vectores de la matriz de correlación espacial:

Si  $(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{L-1})$  son auto-valores de  $R_{xx}$ , resolviendo se obtiene:

$$|R_{xx} - \lambda_i I| = 0 \quad (2.40)$$

$$|APA^H + \sigma^2 - \lambda_i| = 0 \quad (2.41)$$

$$|APA^H + (\sigma^2 - \lambda_i)| = 0 \quad (2.42)$$

Por lo tanto los auto-valores de  $v_i$  de  $APA^H$  son obtenidos de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$v_i = \sigma^2 - \lambda_i \quad (2.43)$$

Como  $A$  contiene los vectores de dirección los cuales son un rango de columnas independientes y  $P$  está definida como positiva, los auto-valores  $v_i$  de  $APA^H$  son cero. La varianza del ruido  $\sigma^2$  es igual a  $L - P$  auto-valores de  $R_{xx}$ , donde  $P$  es el número de señales incidentes. Los auto-valores  $R_{xx}$  son clasificados de forma decreciente desde el auto-valor más grande al más pequeño, de tal forma que  $\lambda_0$  es el auto-valor más grande y  $\lambda_{L-1}$  es el auto-valor más pequeño [13]. Por lo tanto:

$$\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{L-1} = \sigma^2 \quad (2.44)$$

El auto-vector asociado con un auto-valor particular  $\lambda_i$ , es el auto-vector  $q_i$  como se puede observar:

$$R_{xx} - \lambda_i I = 0 \quad (2.45)$$

Los auto-vectores asociados con los  $L - P$  auto-valores más pequeños, se obtienen mediante:

$$(R_{xx} - \sigma_n^2 I) q_i = APA^H q_i + \sigma_n^2 I - \sigma^2 I = 0 \quad (2.46)$$

$$APA^H q_i = 0 \quad (2.47)$$

Como  $A$  es un rango completo y  $P$  es no singular, [2.47](#) se convierte en:

$$A^H q_i = 0 \quad (2.48)$$

Esto significa que los auto-vectores asociados con los  $L - P$  auto-valores más pequeños, son ortogonales a los  $P$  vectores de dirección que componen  $A$ .

$$\{a(\theta_0) \cdots a(\theta_{P-1})\} \perp \{q_0, \cdots, q_{L-1}\} \quad (2.49)$$

Para encontrar el sub-espacio del ruido, creamos una matriz que contenga los auto-vectores del ruido.

$$V_n = [q_p q_{p+1} \cdots q_{L-1}] \quad (2.50)$$

Ya que los vectores de dirección correspondientes a las componentes de las se-

ñales son ortogonales a los auto-vectores del sub-espacio de ruido se tiene que:

$$\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\theta) = 0 \quad (2.51)$$

Para las direcciones  $\theta$  correspondientes a los DoA de las componentes multi-trayecto y las señales interferentes. Entonces las direcciones de arribo (DoAs) de las múltiples señales incidentes pueden ser estimadas localizando los picos del espectro espacial MUSIC dado por [13]:

$$P_{\text{MUSIC}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (2.52)$$

## 2.4. Algoritmo PSO

Dentro de las heurísticas de la inteligencia colectiva se encuentra la optimización por enjambre de partículas. Esta es en una técnica evolutiva que fue propuesta por Kennedy y Eberhard (1995). Este método fue descubierto a través de un modelo social simplificado y está inspirado en el comportamiento social de organismos como los bancos de peces o bandadas de aves [2].

El algoritmo de PSO nace en un intento por trasladar al campo de la optimización el comportamiento social que exhiben comunidades de organismos tales como las abejas, las aves o los peces en su desplazamiento en busca de alimento [16].

Una solución potencial es representada en PSO por un vector llamado partícula. Cada una de estas partículas  $i$  tiene la misma dimensión  $n$  y se representan de la siguiente manera:

$$\mathbf{X}(i) = (x_{(i,1)}, x_{(i,2)}, \dots, x_{(i,n)}) \quad (2.53)$$



Las partículas, sobre el espacio de búsqueda n-dimensional, se mueven tratando de encontrar una solución óptima. Para hacer esto, cada individuo ajusta su posición de acuerdo a una combinación lineal de su inercia, su propia experiencia y del conocimiento del enjambre [16].

Cada partícula almacena en una memoria la mejor posición encontrada hasta el instante actual  $t$ . La experiencia de la partícula se denota como [17]:

$$P(i) = (p_{(i,1)}, p_{(i,2)}, \dots, p_{(i,n)}) \quad (2.54)$$

El conocimiento del enjambre se conforma por el conjunto de memorias de cada partícula. A diferencia de los algoritmos genéticos, en PSO no existe la competencia entre individuos. Por lo tanto, la interacción entre las partículas, para obtener un beneficio, es la norma. Para hacer esto, cada partícula pone a disposición de los demás su memoria de conocimiento [16].

El intercambio de información dentro de un vecindario de partículas es una forma de compartir la experiencia. Cada partícula recibe información de  $k$  partículas seleccionadas de forma aleatoria en cada iteración del algoritmo. Después, la partícula determina de entre estas partículas aquella que tenga la mejor posición previa. Posteriormente, es seleccionada para que sea parte del proceso de actualización de su posición. Normalmente, el valor de  $k$  es pequeño (método lbest), sin embargo, puede ser tan grande como el tamaño del enjambre (método gbest). Este último criterio hace que las partículas tiendan hacia la mejor partícula encontrada hasta algún instante  $t$ . Las características del problema a solucionar determinan cuál de los dos métodos es más adecuado para su implementación [16].

La mejor partícula del vecindario se representa por [17]:

$$G(i) = (g_{(i,1)}, g_{(i,2)}, \dots, g_{(i,n)}) \quad (2.55)$$

Al igual que en otros algoritmos de tipo evolutivo, el algoritmo PSO necesita de una función de evaluación llamada función Costo. Esta permite determinar la calidad

de las soluciones. Su importancia radica en que es la única forma de poder evaluar la posición de cada partícula [16].

Cada coordenada  $X$  de cada partícula tiene una velocidad o razón de cambio  $V$  [18].

$$V(i) = (v_{(i,1)}, v_{(i,2)}, \dots, v_{(i,n)}) \quad (2.56)$$

Para realizar un desplazamiento, la partícula determina la velocidad considerando su propia inercia  $\omega$ , su memoria de conocimiento y su confianza en el enjambre, para después, sumarla a la posición actual [16].

El grado de confianza lo determinan los operadores aleatorios  $r_1$  y  $r_2$  cuyo rango está acotado entre 0 y 1, junto con los coeficientes de confianza  $c_1$  y  $c_2$ . Estos últimos, también llamados constantes de aceleración, son los términos que tiran a cada partícula hacia las posiciones  $P$  y  $G$  [16].

En otras palabras, las partículas hacen un movimiento hacia una posición intermedia tomando en cuenta la mejor posición previa, la mejor posición de las  $K$  partículas y una posición accesible desde la posición actual como se observa en la figura 2.9 [16].

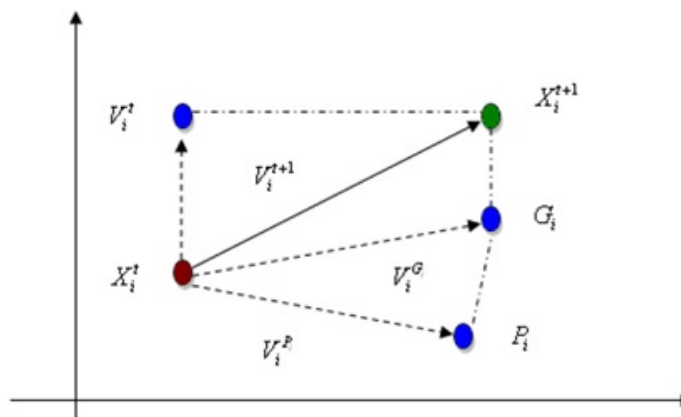


Figura 2.9: Representación del movimiento de una partícula.

Las ecuaciones siguientes ajustan la velocidad y posición de cada partícula [17]:

$$V_i(t + 1) = \omega \times V_i(t) + c_1 r_1 (P_i - X_i(t)) + c_2 r_2 (G - X_i(t)) \quad (2.57)$$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (2.58)$$

Dónde:

- $V_i(t + 1)$ , Velocidad ajustada.
- $\omega$ , Inercia del propio movimiento.
- $c_1$ , Coeficiente de confianza en la experiencia.
- $c_2$ , Coeficiente de confianza en la experiencia del grupo.
- $P_i$ , Mejor posición previa de  $i$ .
- $X_i(t)$ , Posición actual de  $i$ .
- $V_i(t)$ , Velocidad actual de  $i$ .
- $G$ , Mejor posición previa encontrada por el grupo.
- $r_1$  y  $r_2$ , Operadores aleatorios entre 0 y 1.
- $X_i(t + 1)$ , Posición de la partícula  $i$  después del ajuste.

Debido a que en el proceso de actualización de la velocidad están inmiscuidos operadores aleatorios, el método de modificación de la posición de las partículas se puede considerar a fin de cuentas un paso estocástico, pero heurístico [16].

En términos generales, el algoritmo PSO se puede describir en tres pasos. El primero es evaluar cada elemento para determinar la calidad de la posición actual. Esto permite que se puedan encontrar la mejor y las mejores partículas. Después, se deben realizar los ajustes necesarios de las mejores posiciones previas. Por último, se determinan los nuevos desplazamientos para cada partícula con la información

ajustada. Por analogía, estos movimientos no son más que una forma de tratar de imitar a otros individuos [16].

El diagrama de flujo de la optimización por enjambre de partículas se da en la figura 2.10. Los pasos detallados de enfoque de optimización de enjambre de partículas son los siguientes:

1. **Inicialización** El primer paso hacia la implementación del algoritmo PSO es escogen los parámetros que necesitan ser optimizados y darles un rango razonable para que puedan buscar la solución óptima.
2. **Inicializar ubicación enjambre azar y velocidades:** Para comenzar la búsqueda de la posición óptima en el espacio de soluciones, cada partícula comienza en su propia ubicación con una velocidad. Ambos son aleatorios tanto en su dirección y magnitud.
3. **Evaluar la función fitness en las partículas:** La función fitness, usando las coordenadas de cada partícula en el espacio de soluciones, devuelve un valor de fitness que se asignará a la ubicación actual.
4. **Actualizar el mejor individuo y mejor global:** Como una partícula se mueve a través del espacio de búsqueda, que se compara su valor de fitness en la posición actual con el mayor valor fitness que ha alcanzado jamás en cualquiera momento hasta la hora actual, y éste a su vez se compara con el mejor resultado global, y cada posición se actualiza respectivamente.
5. **Actualización de la velocidad y la posición:** Es la velocidad de las partículas en movimiento, y se representan por un vector de valor real. La velocidad de la partícula cambia de acuerdo con las ubicaciones relativas de su mejor individuo y mejor global. Basándose en las velocidades actualizadas, es simple para mover la partícula a su siguiente posición
6. **Criterios de Terminación:** Esta es la condición bajo la cual el proceso de búsqueda terminará. La cual finaliza si el número de iteraciones alcanza el máximo permitido, de lo contrario, se retorna al paso 3.

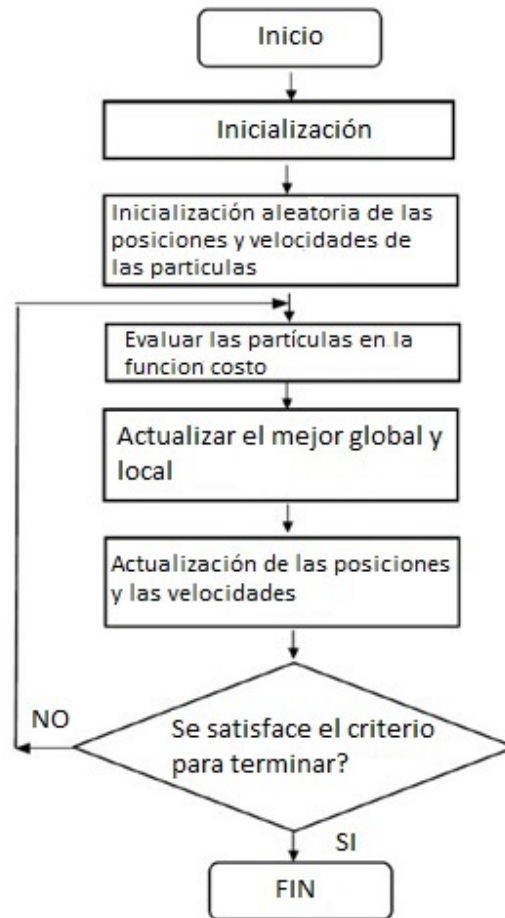


Figura 2.10: Diagrama de Flujo del PSO.

#### 2.4.1. Aplicación de la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) en sistemas de Antenas Inteligentes.

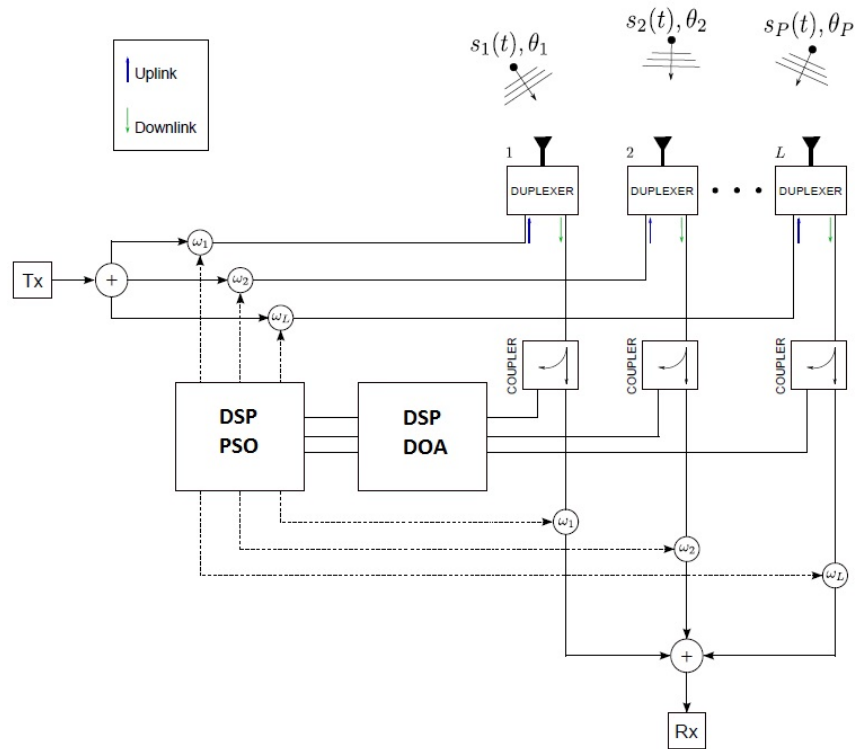
Los sistemas de Antenas Inteligentes cambian su patrón de radiación con la ayuda de unos pocos parámetros ajustables de acuerdo a la estimación y el análisis de las señales que llegan al arreglo, al medio ambiente y a información conocida para mejorar el rendimiento y la capacidad del sistema. Una manera eficaz de determinar la configuración adecuada de un parámetro para el sistema, es la aplicación de procedimientos de optimización heurísticos [1].

El problema de la síntesis del patrón de radiación o beamforming, es el problema de la variación continua del objetivo en tiempo real que requiere una solución óptima rápida para ajustar el patrón y soportar los requerimientos de los servicios. También los parámetros de control están limitados debido al diseño práctico y costos que requiere. En consecuencia el algoritmo PSO es propuesto para solventar estas principales necesidades [1].

Este trabajo se basa en el diseño de un sistema de antenas inteligentes cuya arquitectura estará basada en la información de las direcciones de arribo de las señales proporcionadas por el algoritmo MUSIC, y en base a esto se utilizara la optimización por enjambre de partículas PSO para ajustar los pesos de los elementos del arreglo de antenas. El algoritmo PSO ajustara estos pesos buscando la mejor solución de una función Fitness que definirá el patrón de radiación del sistema, cuyas características serán reducir al mínimo la potencia de salida total en dirección de las señales de interferencia y maximizar la potencia de salida en dirección de las señales de interés. La información de los pesos estará compuesta por la amplitud y la fase de las corrientes de cada uno de los elementos del arreglo de antenas.

## **2.5. Arquitectura de un sistema de Antenas Inteligentes de Haz Adaptativo.**

Los sistemas de antenas inteligentes están conformados por la combinación de un arreglo de antenas (arrays) con una unidad de Procesamiento Digital de Señales (DSP) que optimiza los diagramas de transmisión y recepción dinámicamente en respuesta a una señal de interés en el entorno. En general de esta forma se puede definir un sistema de antenas inteligentes, sin embargo dentro de su estructura existe una multitud de elementos que juegan un papel importante para el sistema. El esquema general de un sistema, en este caso de un sistema de antenas inteligentes de haz adaptativo se observa en la [2.11](#).



**Figura 2.11:** Esquema general de un sistema de antenas inteligentes de haz adaptativo.

Donde las  $P$  señales que inciden al arreglo son censadas por los elementos de antena, seguidamente a cada uno de los elementos se implementan Duplexers los cuales permiten que el sistema pueda operar tanto en transmisión como en recepción al mismo tiempo, gracias a que los Duplexers separan la frecuencia de bajada (Downlink) y de subida (Uplink).

La implementación de los distintos algoritmos DoA y de Beamforming en los dispositivos DSP requiere que las señales que son censadas por el arreglo sean muestreadas, procesando luego dichas muestras para poder determinar las direcciones de arribo de las señales incidentes y poder estimar los distintos haces de radiación en estas direcciones. Para tomar las muestras se implementan acopladores direccionales en el sistema.

Por último, están los dispositivos DSP los cuales son dos, uno encargado de la

etapa de detección de señales de arribo DoA y el otro encargado de la etapa de Beamforming. El dispositivo DSP encargado de la DoA procesa las muestras de las señales tomadas por los acopladores direccionales y por medio del algoritmo MUSIC determina las direcciones de arribo de las señales. En la etapa de Beamforming el procesador DSP encargado de esta etapa genera una serie de vectores que contienen la información de los pesos  $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_L)$  en base a la información obtenida en la etapa DoA. Cada peso  $\omega_L$  está conformado por las variaciones tanto en amplitud y fase que sufren las corrientes que alimentan a cada elemento del arreglo, y son dichas corrientes las que definen el diagrama de radiación del arreglo en cada una de las direcciones. El enfoque de este trabajo de grado estará dirigido a utilizar la naturaleza del algoritmo de optimización por enjambre de partículas PSO en la etapa de Beamforming, para determinar los pesos  $\omega_L$  de cada uno de los elementos de antena logrando así conformar los haces de radiación en las direcciones de las señales de interés, cabe destacar también la utilización del algoritmo MUSIC como algoritmo DoA de detección de arribo.

## 2.6. Sectorización.

La interferencia co-canal puede ser reducida reemplazando una antena omnidireccional en la estación base por varias antenas direccionales, cada una radiando dentro de un sector especificado. Mediante la utilización de antenas direccionales, una celda dada recibirá interferencia y transmitirá con solo una fracción de las celdas co-canales disponibles [19].

La sectorización, consiste en romper una gran área geográfica de servicio en áreas más pequeñas, denominadas celdas, cada una de las cuales puede usar una porción del ancho de banda disponible (reutilización de frecuencias), por lo que es posible proporcionar enlaces inalámbricos a muchos usuarios a pesar del espectro limitado. Las celdas, por lo general, tienen formas y dimensiones irregulares [20].

La forma es determinada en gran parte por el terreno. Dependiendo de su tamaño, las celdas se pueden clasificar como macroceldas (cuando la estación base tiene



suficiente potencia de transmisión para cubrir las áreas de un radio de 1-20Km), microceldas (áreas de radio de 0,1 a 1 km), y picoceldas (medio ambiente interior). Una distancia mínima entre dos celdas, utilizando canales idénticos es requerida, esta distancia es conocida como la distancia de reutilización de canales. Esto también se conoce como la reutilización de canales a través de la separación espacial [20].

La técnica empleada para disminuir la interferencia co-canal y de este modo aumentar la capacidad del sistema utilizando antenas direccionales es la Sectorización donde una celda es normalmente particionada en tres sectores de  $120^\circ$  o 6 sectores de  $60^\circ$  como se muestra en la figura 2.12, [19].

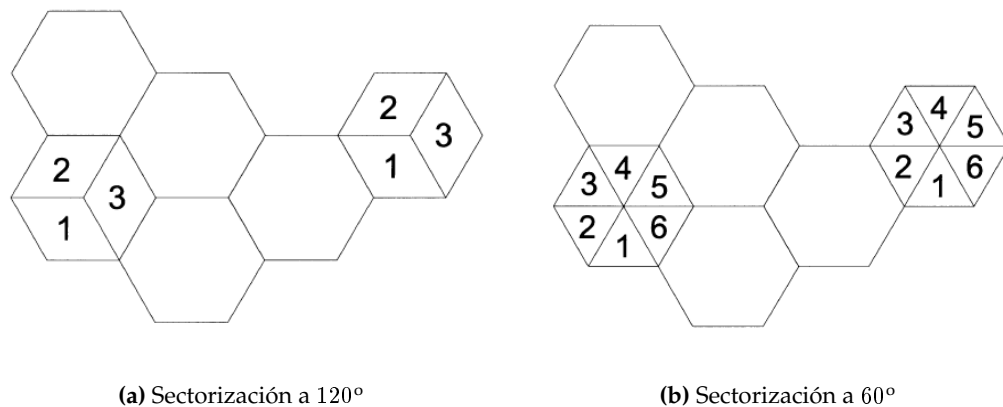


Figura 2.12: Tipos de Sectorización.

Cuando la sectorización es empleada, los canales usados en una celda en particular son divididos en grupos sectorizados y son utilizados solo dentro de un sector en particular, como se muestra en la figura 2.12, [19].

En el centro de cada celda, reside una estación base equipada que trabaja con una banda determinada de frecuencias. Las estaciones bases en las celdas adyacentes se asignan a bandas de frecuencias, que contienen frecuencias completamente diferentes a las células vecinas. Al limitar el área de cobertura dentro de los límites de una celda, la misma banda de frecuencias puede ser utilizada para cubrir diferentes celdas que están separadas entre sí, por distancias mas grandes [20].

## 2.7. SDMA

El uso de la tecnología de antenas adaptativas para permitir a los usuarios compartir el canal dentro de una celda es llamado por sus siglas en inglés SDMA lo que quiere decir Spatial Division Multiple Access. Cada móvil es seguido por un haz estrecho para transmisiones de subida y bajada como se muestra en la figura 2.13. Una de las ventajas que SDMA trae consigo es que la interferencia co-canal entre celdas puede ser reducida ya que los arreglos de antenas adaptativos son capaces de formar haces estrechos [19].

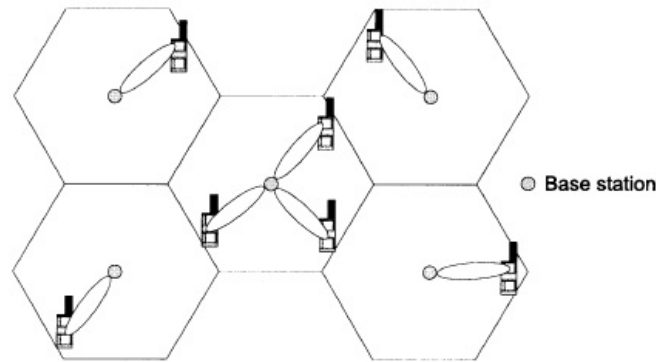
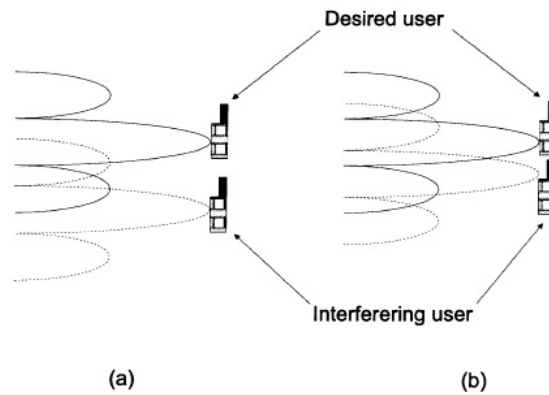


Figura 2.13: Diagrama del Sistema SDMA.

Haciendo uso de los arreglos de antenas adaptativas, pueden ser formados un número de haces con la misma frecuencia, de este modo permitiendo que más de un usuario pueda ser atendido por la misma frecuencia dentro de una celda, siempre y cuando estos estén separados. Por lo tanto, en teoría la capacidad del sistema puede ser substancialmente incrementada. Sin embargo cuando los usuarios se acercan uno al otro, la interferencia co-canal dentro de la celda puede ser generada, si los niveles de los lóbulos laterales son muy altos las señales interferentes ingresarán por estos y afectan la transmisión de la señal deseada. Por otro lado si el usuario interferente está ubicado angularmente cerca del usuario principal, dicho usuario ingresará por el lóbulo principal causando interferencia como se puede ver en la

figura 2.14 [19].



**Figura 2.14:** (a) Interferencia en lobulos laterales, (b) Interferencia en haz principal.

La ventaja potencial de utilizar SDMA es que la eficiencia del espectro y la capacidad de los sistemas existentes pueden ser incrementadas. Los sistemas SDMA también se pueden considerar como una extensión de los sistemas de antenas inteligentes [19].



## Capítulo III

# Procedimientos de la investigación

Este trabajo se desarrollará en tres etapas y el desarrollo adecuado de las mismas será de vital importancia para el cumplimiento de los objetivos planteados. En la figura 3.1 se observan las etapas de este trabajo.

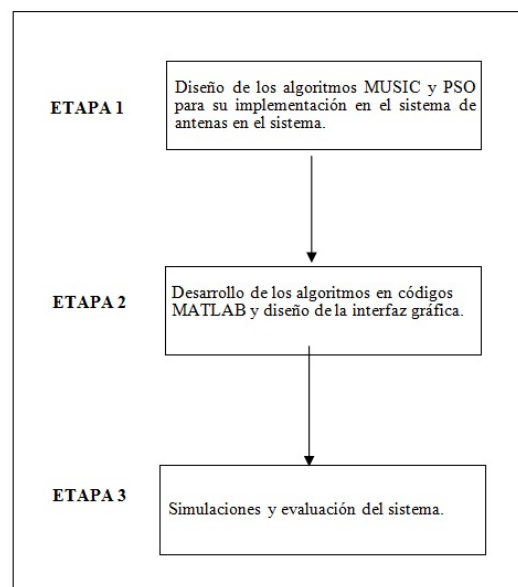


Figura 3.1: Etapas de la investigación.

### 3.1. Diseño de los Algoritmos MUSIC y PSO para su implementación en el sistema de antenas.

#### 3.1.1. Modelado de las señales

Para el desarrollo de este trabajo se tomara como modelo de señal el siguiente:

$$S_1 = A_p \sin(2\pi f_p) * \text{ASK} \quad (3.1)$$

$$S_1 = A_p \sin(2\pi f_p) * \text{FSK} \quad (3.2)$$

$$S_1 = A_p \sin(2\pi f_p) * (M - \text{QAM}) \quad (3.3)$$

Como se puede observar la señal  $S_t$  estará representada por la modulación en banda base de una señal digital modulada ya sea en ASK (Modulación por desplazamiento de amplitud), FSK (Modulación por desplazamiento de fase) o  $M - \text{QAM}$  (Modulación de amplitud por cuadratura), por lo tanto las  $P$  señales del estudio quedaran definidas como:

Donde  $A_p$  es la amplitud de la señal portadora en Voltios definida dentro un rango variable para el estudio ya que se tomará como una variable de interés para estimar el comportamiento del sistema;  $f_p$  es la frecuencia de la señal portadora en MHz, definida dentro del rango de frecuencias portadoras del espectro de telefonía móvil establecido por CONATEL en la tabla 3.1.

Por otro lado para realizar un estudio más amplio sobre la precisión y rendimiento del sistema se tomaran en cuenta las características de las distintas modulaciones, en el caso de las señales ASK y FSK el control sobre los bits transmitidos permitirá modificar las señales permitiendo así estudiar efecto de la correlación entre las mismas y como esto afecta al sistema, por otro lado tanto la amplitud como la frecuencia de las señales también serán de interés por lo cual ambos parámetros son variables.

En cuanto a las señales  $M - QAM$ , el control sobre los bits que conforman las palabras transmitidas definirán la correlación entre las señales, a su vez el tipo de QAM quedara definido por el valor de  $M$  ( $8 - QAM, 16 - QAM, 32 - QAM$ ). La manipulación de las señales en el estudio permitirá estudiar cómo estas afectan el comportamiento y el rendimiento del sistema.

Rango de Frecuencias	Atribución Venezuela
[806 – 890] MHz	MOVIL, FIJO
[947,58 – 960] MHz	MOVIL, FIJO
[1710 – 2710] MHz	MOVIL, FIJO

**Tabla 3.1:** Espectro RF.

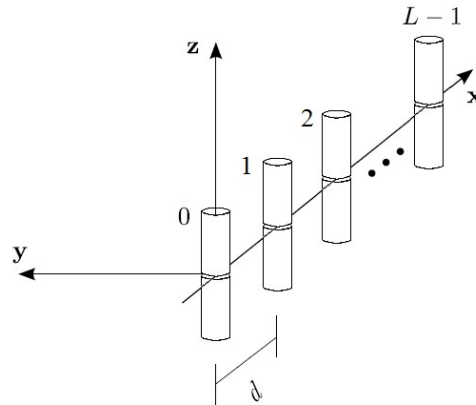
### 3.1.2. Modelado de los Arreglos de Antenas.

Como se definió en la sección 1.4, el enfoque de este trabajo de grado estará dirigido al uso de arreglos de antenas conformados por dipolos los cuales son antenas isotrópicas de ganancia uniforme en todas las direcciones, dichos dipolos estarán orientados en dirección  $a_z$  y el eje del arreglo estará contenido en el eje X. Para el estudio se tomaran en cuenta las siguientes características que definirán los arreglos de antenas las cuales son la distancia entre elementos la cual será de  $\lambda/2$ , la longitud de los dipolos los cuales serán de  $\lambda/2, 3\lambda/4$  y  $\lambda$ , y el número de elementos que conformaran el arreglo que estará comprendido entre 5 a 12 elementos.

De acuerdo a la tabla 3.1 la frecuencia nominal de los dipolos queda definida como:

$$f_{op} = \frac{(890\text{MHz} + 806\text{MHz})}{2} = 848\text{MHz} \simeq 850\text{MHz} \quad (3.4)$$

Por lo tanto la frecuencia nominal de los dipolos queda fijada en 850MHz y su ancho de banda en  $BW = 85\text{MHz}$ . El número de elementos de antena condiciona la calidad de la estimación de las señales y la etapa de conformación de haz (Beamforming), ya que la matriz de observaciones está formada por el producto de la matriz



**Figura 3.2:** Esquema del Arreglo de Antenas.

de direccionamiento y la matriz de las señales, por lo tanto la cantidad de elementos  $L$  afecta la matriz de direccionamiento. En cuanto a etapa de conformación de haz, la cantidad de elementos afecta la resolución angular del haz principal de radiación. Además de esto hay que tomar en cuenta que la carga de procesamiento del sistema aumenta al aumentar el número de elementos en el arreglo, ya que los datos a procesar por los dispositivos DSP son mayores.

### 3.1.3. Desarrollo del Algoritmo de detección de arribo MUSIC.

El algoritmo de detección de arribo MUSIC toma muestras de las señales incidentes en cada dipolo del arreglo de antenas para crear la matriz  $X$  la cual está definida en la ecuación 2.20. Para el estudio de este trabajo la frecuencia de muestreo de las señales será variable ya que permitirá observar el rendimiento que puede presentar el algoritmo, sin embargo es conveniente utilizar una frecuencia de muestreo intermedia que este por debajo de la frecuencia de la onda plana, debido a que al momento de implementar este tipo de sistema se debe tomar en cuenta limitaciones de hardware, por lo tanto la frecuencia de muestreo por defecto es de 150MHz.

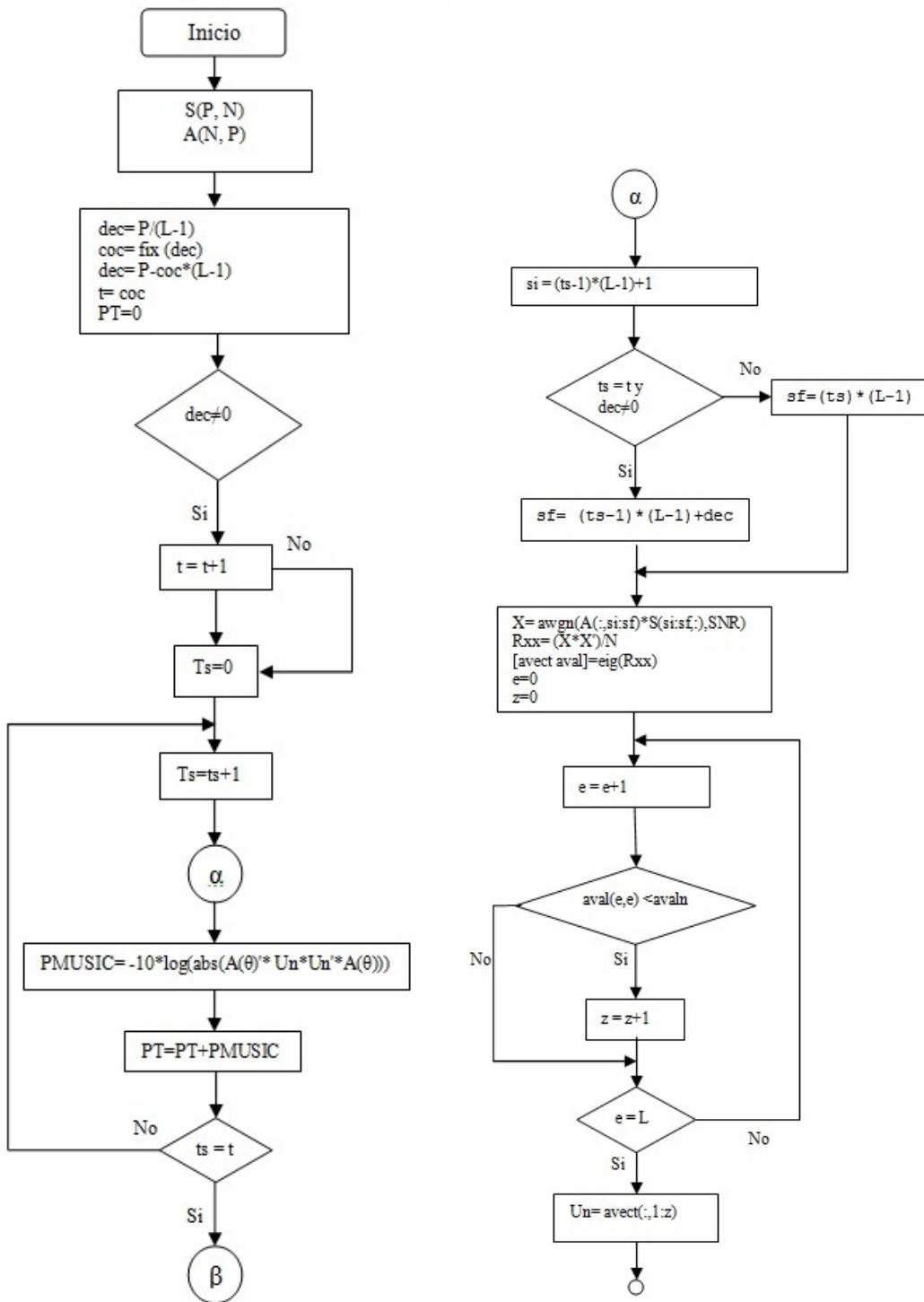
La limitación del algoritmo MUSIC se presenta debido a que solo puede detectar  $L - 1$  señales siendo  $L$  el número de antenas que conforman el arreglo de ante-



nas, tomando en cuenta esto se diseñó el algoritmo de tal manera que para procesar una cantidad de señales mayores a  $L - 1$  estas se procesan en intervalos, donde se procesan las primeras  $L - 1$  señales incidentes y luego las señales restantes. Al momento de implementar el algoritmo dentro de un sistema es importante establecer intervalos de tiempo que garanticen el continuo funcionamiento del mismo para poder detectar señales en tiempo real.

La correlación de la matriz  $X$  se descompone en autovalores y autovectores, de los cuales se toman los autovectores asociados a los autovalores del ruido, estableciendo un valor que representa un umbral que distingue los autovalores del ruido y las señales, es importante destacar que mientras más grande sea el valor del umbral esto permitirá tomar una mayor cantidad de autovalores que mejoraran la resolución del pseudoespectro MUSIC logrando así una mejor rendimiento del algoritmo de detección, pero este no debe exceder los valores de los autovalores de la señal debido a que de lo contrario no se obtiene una buena detección, por lo cual se estableció que los autovalores deben de estar dentro del rango de 0 y 0.1.

Obtenido el pseudoespectro MUSIC se detectan los picos del mismo para identificar las direcciones de las señales recibidas, para distinguir los picos del ruido se estableció un umbral de detección, que permitiera establecer el nivel mínimo de los picos para su correcta detección. Para el estudio se asignó un nivel de umbral de 10 dB para garantizar una buena detección, sin embargo para efectos prácticos el umbral puede ser variable. En las figuras 3.3 y 3.4 se muestra el diagrama de bloques del código .m realizado en Matlab para elaborar el algoritmo MUSIC.



(a) Diagrama de bloques del código MUSIC.

(b) Diagrama de bloques del código  $\alpha$ .

Figura 3.3: Diagrama de bloques del código .m del algoritmo MUSIC.

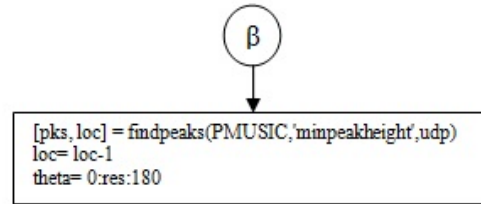


Figura 3.4: Diagrama de bloques del código  $\beta$ .

### 3.1.4. Diseño del Algoritmo PSO.

Después de haber establecido los parámetros de las antenas, las señales de entorno y la DoA, se procedió con la creación del algoritmo PSO para optimizar el diagrama de radiación para cada dirección obtenida en la DoA, a partir del cual antes de la ejecución del PSO se discrimina la dirección principal de las señales interferentes y adicionalmente, se consideraron las características de la antena para que su diagrama de radiación se adapte a la misma.

Entre los parámetros principales utilizados para el funcionamiento del PSO se encuentran el número de iteraciones, el número de partículas, la atracción individual ( $c_1$ ), la atracción social ( $c_2$ ) y la inercia de las partículas ( $\omega$ ), los cuales están definidos en la sección 2.4, los cuales deben cumplir con las siguientes condiciones para garantizar la convergencia de las partículas:

$$0 \leq c_1 + c_2 \leq 4 \quad (3.5)$$

$$\frac{c_1 + c_2}{2} - 1 \leq \omega \leq 1 \quad (3.6)$$

Durante la ejecución del algoritmo PSO las partículas se van a desplazar a través de  $2 \times L$  dimensiones, siendo  $L$  la cantidad de dipolos que posee la antena, de las cuales las primeras  $L$  dimensiones van a estar asociadas a las fases de los pesos de cada dipolo, mientras que las siguientes  $L$  dimensiones a la amplitud de los pesos de cada dipolo, como se muestra en la figura. Para controlar el rango de búsqueda de las partículas se definieron los parámetros  $\alpha$  máximo y  $\alpha$  mínimo, los cuales

constituyen el rango de amplitud de los pesos, y  $\beta$  máximo y  $\beta$  mínimo los cuales conforman el rango de fase de los pesos.

Y para regular la máxima velocidad de las partículas se añadieron las variables  $\alpha$  máximo y  $\beta$  máximo (velocidad) para controlar el máximo módulo de las velocidades que se aplicarán a las dimensiones de amplitud y fase respectivamente.

Para optimizar el diagrama de radiación se establecieron niveles bajos para los lóbulos laterales de alrededor -12 dB y niveles cercanos a los -20 dB para los nulos de radiación lo cual garantiza niveles de potencia bajos en dirección de las señales interferentes, sin embargo para estudios prácticos los niveles tanto para lóbulos laterales como para nulos de radiación serán variables para ajustarse a las necesidades que se requieran.

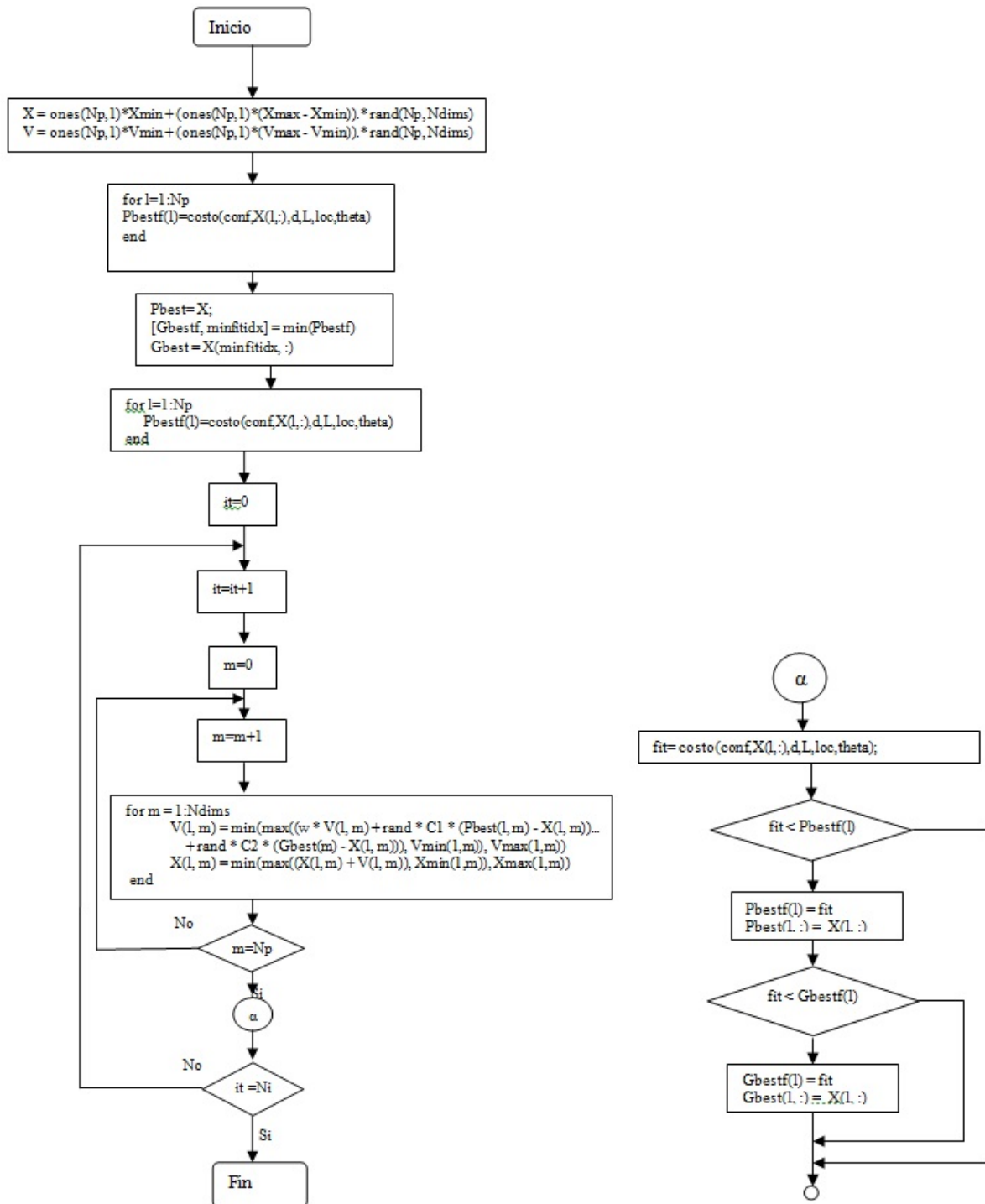
La función costo empleada para optimizar el patrón de radiación se definió como:

$$\text{costo} = c_{ml} * ml + c_{sll} * sll + c_{null} * null \quad (3.7)$$

Donde  $ml$  representa la diferencia de uno menos el valor de la dirección principal en el diagrama de radiación,  $sll$  representa la diferencia de los niveles obtenidos de los lóbulos laterales menos el nivel permitidos de los mismos y  $null$  representa la diferencia del promedio de los valores de las direcciones de las señales interferentes obtenidos en el diagrama de radiación menos de niveles permitidos de éstos, mientras que  $c_{ml}$ ,  $c_{sll}$  y  $c_{null}$  representan el costo del lóbulo principal, los lóbulos laterales y los nulos de radiación respectivamente. Los niveles de los lóbulos laterales se obtienen al calcular el segundo pico o máximo más elevado en el diagrama de radiación.

Adicionalmente los valores  $sll$  y  $null$  están programados para que cuando se encuentren por debajo de los niveles establecidos se le asignará un valor nulo, lo cual quiere decir que la solución encontrada cumple con las condiciones anteriormente señaladas, para el valor de  $ml$  no fue necesario hacer esto, debido que en un diagrama de radiación normalizado el valor máximo es la unidad. Como consecuencia de lo descrito anteriormente, mientras menor sea el costo de un diagrama

de radiación, este va a cumplir cada vez más con las condiciones establecidas, lo cual se puede ver en la figura 3.6.



(a) Diagrama de bloques del código PSO.

(b) Diagrama de bloques del código PSO.

Figura 3.5: Diagrama de bloques del código .m del algoritmo PSO.

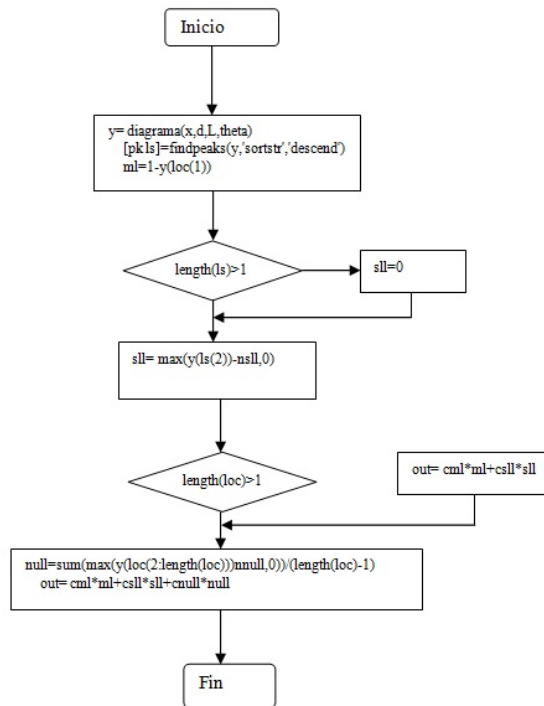


Figura 3.6: Diagrama de bloques del código .m de la función Costo.

## 3.2. Diseño de la interfaz gráfica

### 3.2.1. Procedimiento general

Para realizar las interfaces en Matlab se utilizó el procedimiento descrito en la figura 3.7, el cual consiste en los siguientes pasos:

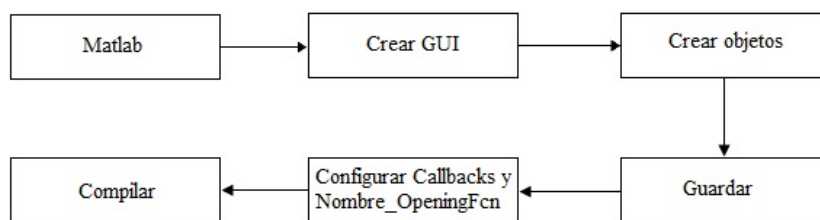
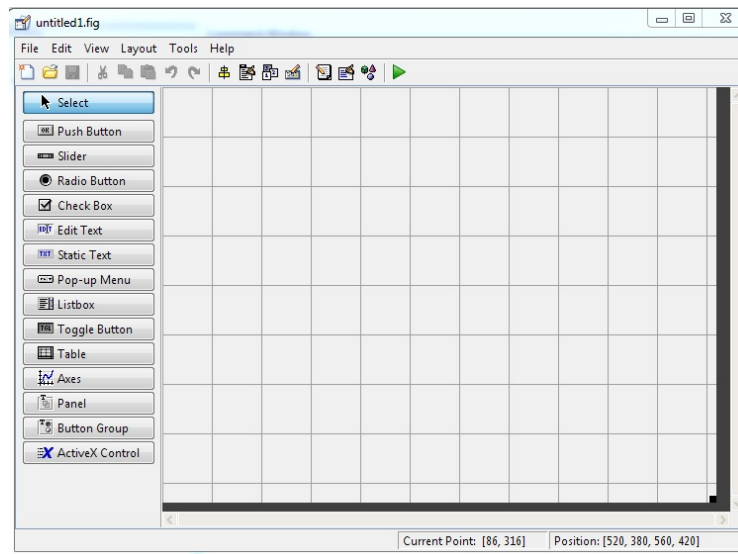


Figura 3.7: Procedimiento genérico para crear interfaces gráficas en Matlab

1. En Matlab se ejecuta el comando "gui", despues se abrirá un ventana en donde se pueden crear otras interfaces previamente creadas, se debe seleccionar la opción de GUI en blanco.
2. A continuación genera un archivo .fig, el cual crea una interfaz gráfica en blanco como se muestra en la figura 3.8. Donde el área de color gris es donde se le pueden agregar elementos, y el panel que está a la izquierda están los objetos que se le pueden añadir a la interfaz, entre los cuales destacan:
  - Push button
  - Radio button
  - Edit text
  - Pop-up Menu
  - Listbox
  - Axes
  - Panel



**Figura 3.8:** Intefaz gráfica en blanco en Matlab



3. Después se le hace click en el elemento del panel izquierdo que se desee añadir, después se hace un segundo click en el cuadro, una vez que cree el elemento se hace doble click en el elemento y aparecerá una ventana llamada *Inspector*, mejor conocido como el inspector de propiedades, la cual contiene una lista de variables asociadas a ese objeto que permiten hacer varias configuraciones del objeto seleccionado desde esa ventana, tales como el tipo de letra, el color de fondo, entre otros.
4. Entonces, se busca la variable *String* y se le escribe el texto que se desee para el elemento y se busca la variable *Tag*, que es el nombre con el que se asocia el elemento. De esa misma manera se agregan todos los objetos necesarios para la interfaz.
5. Después se debe guardar, y a continuación, se crea el archivo `.m` asociado a la interfaz, entonces se hace click secundario en los objetos que se agregaron que generan una acción, y se selecciona *View Callbacks*, y hace click en *Callback*, lo cual redirecciona al Callback del objeto en el fichero `.m`, y se procede a escribir códigos de Matlab que realicen los cambios deseados.
6. Dentro del fichero `.m` se debe ir a la función `Nombredearchivo_OpeningFcn` y se escriben los datos requeridos justo antes de ejecutarse el programa, finalmente se vuelve a guardar.

### 3.2.2. Estado del Arte

Se realizaron las interfaces gráficas siguiendo el procedimiento escrito en la sección 3.2.1 adicionalmente, se la agregaron las siguientes barras de herramientas a las interfaces:

- Archivo

En este menú tiene las opciones de ir a, el cual permite ir a la siguiente y anterior etapa de la interfaz actual; imprimir, que permite imprimir la interfaz actual, y salir, cuya función es salir del programa.

- Edición

Solo dispone de la opción copiar figura, que permite copiar la interfaz actual en el portapapeles de windows, para poder "pegar"la imagen en cualquier editor de documentos como Microsoft Office.

- Herramientas

Esta barra de herramientas solo está disponible en las interfaces de la DoA y el PSO, debido a que permite ir a las interfaces de agregar o eliminar señales ASK, FSK y QAM (ver figuras 3.15a, 3.15b y 3.15c respectivamente), la interfaz de configuración de la DoA se ver en la figura 3.14 y la del PSO en la figura 3.19

- Ver

Permite ver las configuraciones realizadas anteriormente, es decir, se puede observar el esquema del sistema como en la figura; la configuración del arreglo, el cual se puede observar la misma y la posición e impedancia vista en cada dipolo (ver figura 3.9), las señales recibidas, configuración de la DoA en la cual se encuentran las características de las señales y la configuración de la DoA (ver figura 3.10) , la configuración del PSO, el cual contiene las características de la función costo y la configuración del PSO, (ver figura 3.11) y los resultados.

- Ayuda

En esta barra de herramientas se encuentran las opciones menú de ayuda, en el cual se da soporte del programa, y acerca de.

De acuerdo con lo establecido con la figura 3.1, la primera etapa de la interfaz consiste en configurar el arreglo de antenas, tal y como se observa en la siguiente figura 3.12.

Como se indicó en la sección 3.1.2 la cantidad de dipolos del arreglo es de 5 a 12, la distancia de separación entre los elementos es  $0,5\lambda$ , la longitud del dipolo también en  $\lambda$  es de 0.5, 0.75 y 1, los cuales se muestran al hacer click en cada menú desplegable, además los cambios realizados se verán reflejados en el gráfico del

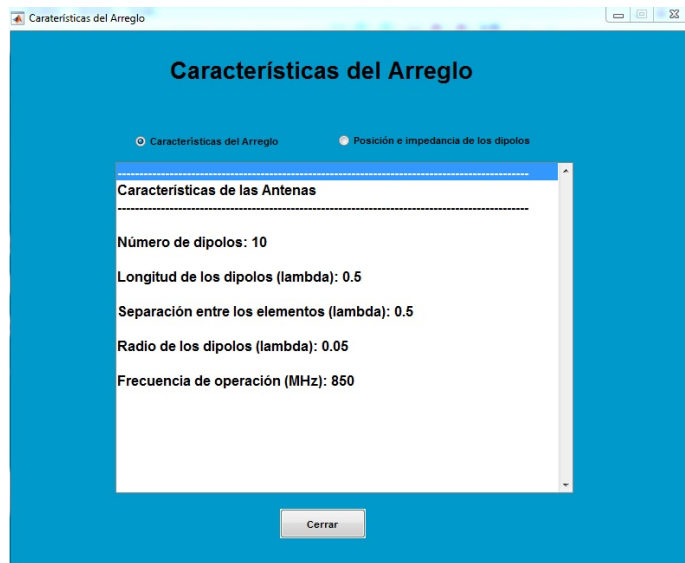


Figura 3.9: Interfaz en la que se observa las características del arreglo

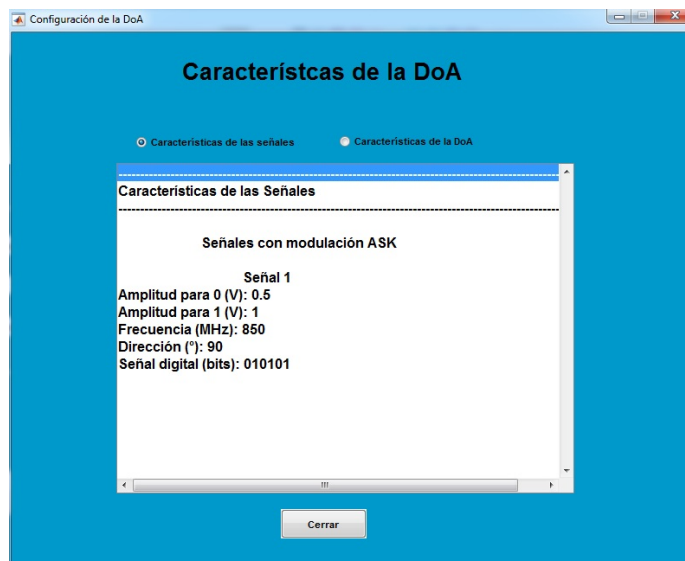


Figura 3.10: Interfaz en la que se observa las características de la DoA

arreglo en 3D, el cual se puede rotar para observar diferentes perspectiva del mismo, por lo tanto con el botón de vista predeterminada se retornará a la vista por defecto del gráfico.

En la barra de herramienta se encuentra el menú de archivo, en el cual se tiene

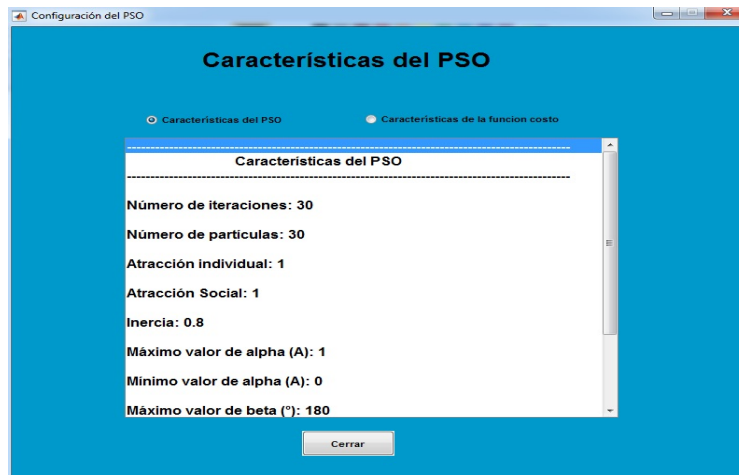


Figura 3.11: Interfaz en la que se observa las características del PSO

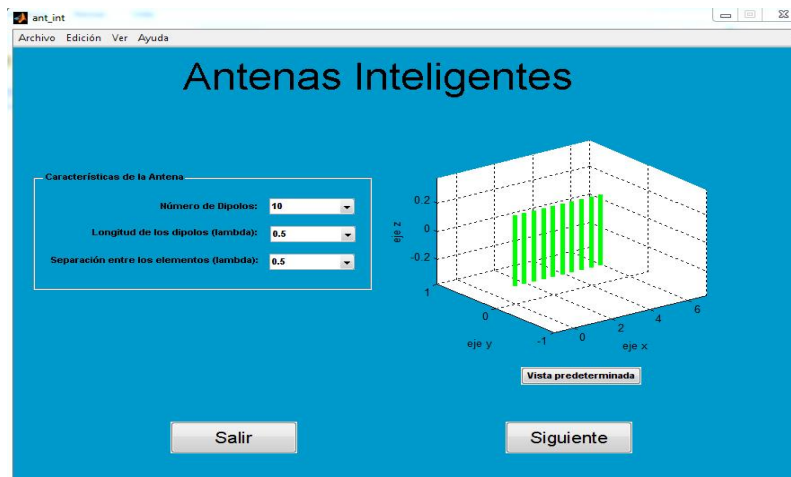
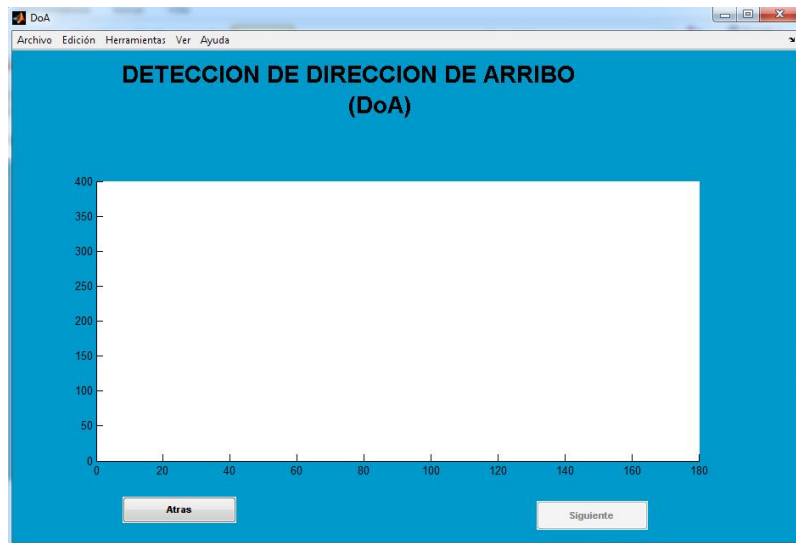


Figura 3.12: Interfaz en la que se configura el arreglo

la opción de ir a la siguiente etapa (DoA), también se puede imprimir y salir del programa en la cual se recibe un mensaje para confirmar la salida, de igual manera con el botón de salir de la interfaz; el opción de edición se puede copiar la interfaz actual; en la opción ver está la configuración del arreglo, el cual abre otra ventana sobre la cuál se muestra toda la información de la antena y la posición de los elementos (ver figura 3.9); y en la opción de ayuda se puede acceder al menú de ayuda.



**Figura 3.13:** Interfaz de la DoA, cuando no están recibiendo señales que se observa el pseudoespectro MUSIC

Un vez realizado los ajustes del arreglo al hacer click en siguiente, se abre la interfaz de la DoA (ver figura 3.13), en el cual aparece un que mensaje que indica que se debe agregar señales, debido a que no se está recibiendo ninguna señal, en la barra de herramientas de la DoA se tiene el menú de archivo, el cual es idéntico al de la ventana anterior, con la diferencia de que puede regresar a la ventana de las antenas inteligentes, y en caso de que se haya detectado al menos una señal, se puede acceder a la ventana del PSO como con el botón de siguiente.

En la ventana de ver se pueden observar las configuraciones del arreglo, de la DoA y se pueden observar las señales que se están recibiendo (en caso de que hayan señales recibidas), en la opción de ayuda se puede ir al menú de ayuda y al acerca de. En la opción de herramientas se puede ingresar a la configuración de la DoA y también se pueden agregar y eliminar señales ASK, FSK, y QAM.

Al seleccionar configuración de la DoA se abre la siguiente ventana asociada a la misma, la cual se puede observar en la figura 3.14.

Para configurar la DoA se siguieron los lineamientos seguidos en la sección tal, en la barra herramientas se encuentran archivo, el cual solo permite imprimir y



Figura 3.14: Interfaz de configuración la DoA

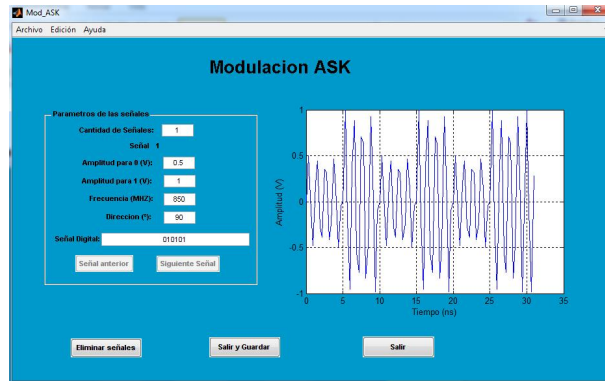
salir, en edición se puede copiar la ventana como en las anteriores, y las opciones del menú de ayuda. Ahora si en la DoA se selecciona agregar señales ASK, FSK y QAM, se abrirán sus interfaces, las cuales se pueden observar en las figuras 3.15a, 3.15b y 3.15c respectivamente.

En estas ventanas se dispone de un cuadro en la cual se muestra la gráfica la señal, tomando en cuenta las características de las modulación, tales como la amplitud, la frecuencia, y la señal digital, ésta última cual se compone de datos binarios, mientras que las dos primeras dependen del tipo de modulación; y las barras de herramientas están configurados de igual manera que la interfaz de configuración de la DoA.

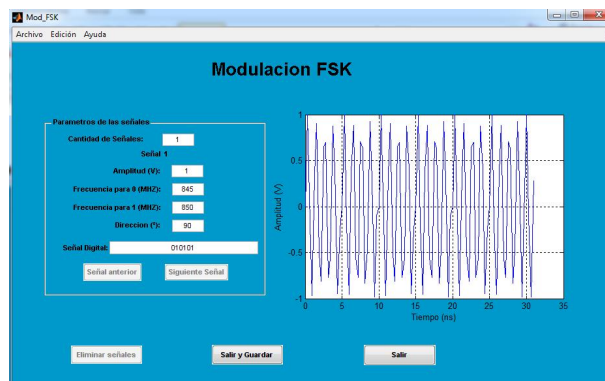
Si no se ha agregado señales de un determinado esquema de modulación, entonces el botón de eliminar señales, estará deshabilitado, en cambio, si ya existen señales de ese esquema, al presionarlo, dichas señales no MUSIC; de forma similar ocurre con los botones de señal anterior y siguiente, los cuales no se encuentran habilitados si no se han agregado señales, además permite mostrar la señal indicada, así como modificar las características de esa señal especificada.

Una vez agregadas las señales, la interfaz de la DoA tendrá un aspecto como la se ve en figura 3.16, en el cual se muestra el pseudoespectro MUSIC, así como las señales detectas de acuerdo con la configuración de la DoA, por lo tanto el programa no podrá ingresar al PSO si la DoA no detecta al menos una señal; y además

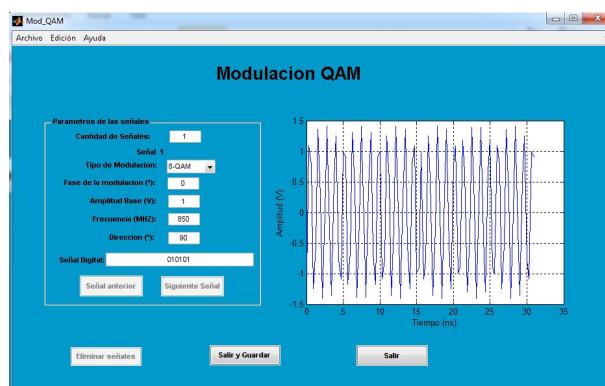
estará habilitada la opción de señales recibidas la cual que se encuentra en la barra herramientas ver como se muestra en la figura 3.17, en la cual se pueden observar las señales recibidas según la modulación de la señal y su dirección.



(a) Señales ASK



(b) Señales FSK



(c) Señales FSK

Figura 3.15: Interfaces en la que se agregan o eliminan señales con esquemas de modulación ASK, FSK y QAM



**Figura 3.16:** Interfaz de configuración la DoA al recibir señales

Una vez detectadas la señales en la DoA, la siguiente etapa es la conformación de haz para cada dirección detectada, para la cual se realizó la interfaz del PSO mostrada en la figura 3.18, en la que el menú de archivo se puede regresar a la DoA, o cuando termine obtener todos los diagramas, se puede acceder a la interfaz de resultados, en el menú de herramientas se puede ir a la configuración del PSO, en el menú de ver se puede observar las configuraciones realizadas al arreglo de antenas, la configuración de la DoA y el PSO, y las señales recibidas.

El botón atrás permite regresar a la DoA, mientras que el botón siguiente inicia la ejecución del PSO para obtener el diagrama de radiación para esa dirección y habilita el botón repetir búsqueda actual, el cual permite optimizar los pesos encontrados a partir de los obtenidos, cuando en el botón siguiente cambie a finalizar, y en el gráfico en polar es donde se mostrará el diagrama de radiación obtenido, mientras que en el gráfico en cartesiano se observará la evolución del mejor costo y el promedio obtenido de los mejores costos.

La interfaz de la configuración del PSO se puede ver en la figura 3.19, en el cual se puede realizar todos ajustes establecidos 3.1.4.

Finalmente, después de optimizar los pesos de los dipolos para cada señal, se



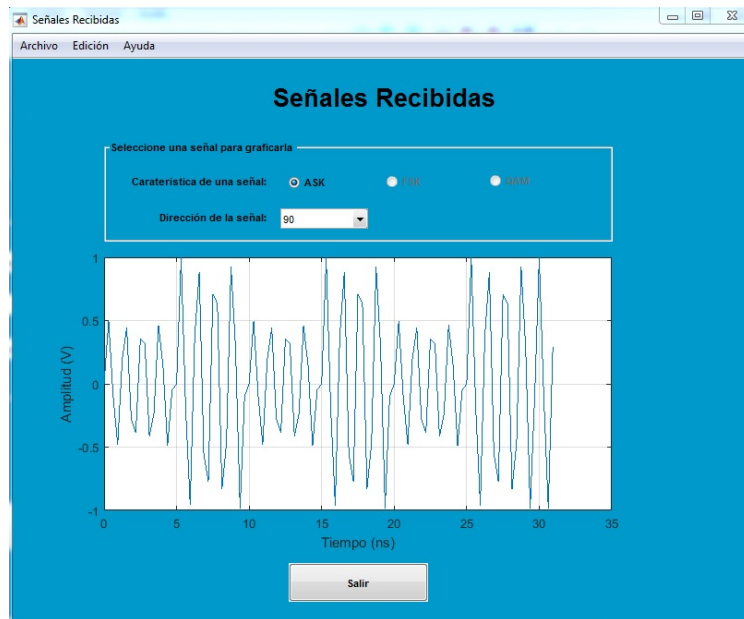


Figura 3.17: Interfaz para observar las señales recibidas

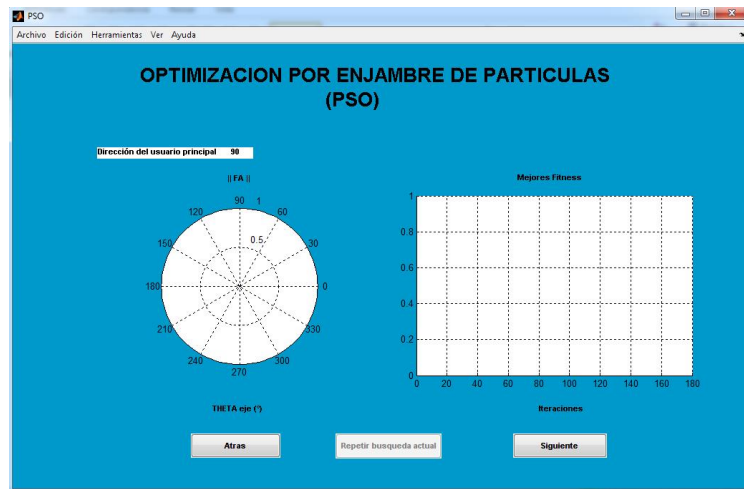


Figura 3.18: Interfaz del PSO

puede ingresar hacia la interfaz de resultados la cual se puede observar en la figura 3.20, en la cual se puede visualizar los diagramas de radiación asociado a cada dirección detectada, además se puede observar el diagrama con coordenadas rectangulares y polares, y en magnitud y decibelios.



Figura 3.19: Interfaz de la configuración del PSO

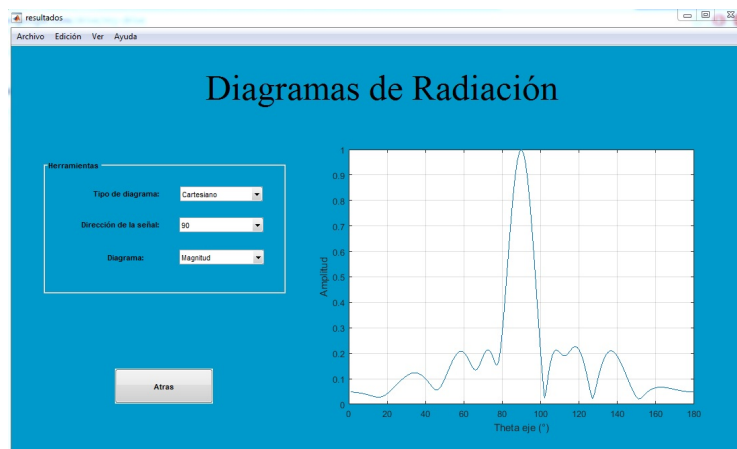


Figura 3.20: Interfaz para observar los diagramas obtenidos

Esta interfaz cuenta con las barras de herramientas archivo, el cual permite guardar todos los resultados obtenidos y configuraciones realizadas en un archivo .txt; ir al PSO; imprimir y salir del programa, edición; ver, allí se pueden ver las configuraciones del arreglo, de la DoA y del PSO, las señales recibidas y los resultados (ver 3.21), en el cual indica las pesos obtenidos en el PSO para cada señal detectada, los resultados de la función costo, y las impedancias y pesos obtenidos

en cada dipolo, directividad de cada diagrama. Para las impedancias se realizó un estudio que determinó que era factible realizar una interpolación de impedancias propias y mutuas de la antena con respecto a la cantidad de dipolos de la misma. Y para calcular la directividad se debe utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{Directividad} = 10 \log \left( \frac{4\pi}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} |f(\theta, \phi)|^2 \sin(\theta) d\phi d\theta} \right) \quad (3.8)$$

Donde  $f(\theta, \phi)$  es la función a la que se va a calcular la directividad, como el patrón de radiación del dipolo, el factor de arreglo y el diagrama total.

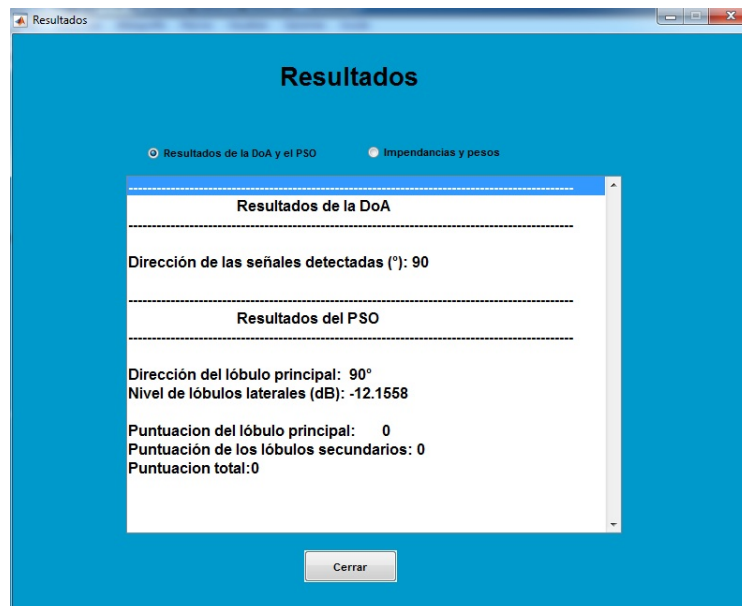


Figura 3.21: Interfaz para observar los resultados obtenidos

### 3.3. Simulaciones

En esta etapa, primero se van a realizar simulaciones con la etapa DoA, tomando en cuenta que la antena tiene 10 elementos con una separación de  $0,5\lambda$  y las simulaciones se harán con cada esquema de modulación (ASK, FSK y QAM), se consideraron los siguientes escenarios para la etapa DoA :

1. Comportamiento del sistema cuando la SNR varia..
2. Comportamiento del sistema cuando la frecuencia de portadora de las señales varia..
3. Comportamiento del sistema cuando las Señales son próximas entre si..

Y para el PSO, se realizaron simulaciones con las siguientes características:

1. Comportamiento del sistema cuando la experiencia grupal  $c_2$  de las partículas es igual a 0.
2. Comportamiento del sistema cuando la experiencia individual  $c_1$  de las partículas es igual a 0.
3. Comportamiento del sistema cuando la experiencia individual  $c_1$  y la experiencia grupal  $c_2$  de las partículas es igual a 1.
4. Comportamiento del sistema cuando el costo de los lóbulos laterales tiene mayor valor en la función costo.
5. Comportamiento del sistema cuando el costo de los nulos tiene mayor valor en la función costo.
6. Comportamiento del sistema cuando el costo del haz principal, los lóbulos laterales y los nulos de radiación es el mismo.

Finalmente se hará una comparación de los diagramas obtenido por el algoritmo PSO y simulado estos diagramas en el programa EZNEC en base a los pesos obtenidos del algoritmo PSO.

## Capítulo IV

# Análisis, interpretación y presentación de los resultados

### 4.1. Simulaciones

En esta sección se desarrollaran las simulaciones de las etapas DoA y PSO del sistema comparando su rendimiento de acuerdo a las variaciones de las distintas variables que las componen, dichas simulaciones se realizaron en la interfaz gráfica desarrollada en este trabajo de grado. Como se menciono los algoritmos DoA y PSO fueron desarrollados en codigos .m de MATLAB, y a partir de estos se desarrollo una interfaz gráfica en el apartado GUI de MATLAB, la cual tiene la finalidad de permitir a los usuarios realizar un estudio del rendimiento del sistema de antenas inteligentes, permitiendo estudiar las respuestas del mismo tomando en cuenta todas las variables que lo componen.

### 4.2. Simulaciones Etapa DoA

En esta etapa se analizara el comportamiento bajo ciertas circunstancias de la etapa DoA del sistema, dicha etapa trabaja utilizando el algoritmo MUSIC como

algoritmo de detección (DoA), por lo cual en base al espectro MUSIC se analizara la respuesta del sistema.

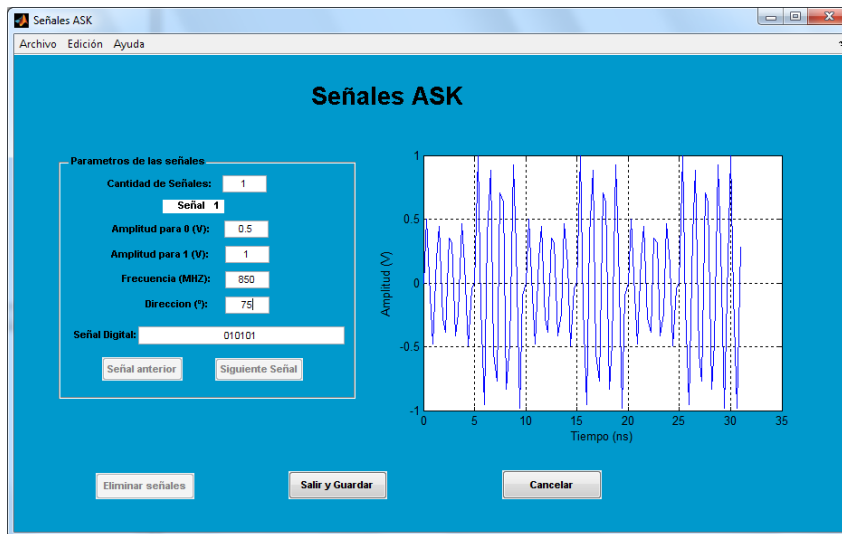
#### 4.2.1. Prueba 1: Comportamiento del sistema cuando la SNR varia.

Para realizar esta prueba se utilizo la siguiente configuración del arreglo de antenas.

<b>Número de Elementos de Antena</b>	10
<b>Longitud de Dipolos (<math>\lambda</math>)</b>	0.5
<b>Separación entre Elementos (<math>\lambda</math>)</b>	0.5

**Tabla 4.1:** Configuración del Arreglo de Antenas.

Como señales bajo prueba se tomaron en cuenta las siguientes señales las cuales poseen la misma portadora ubicada en la frecuencia de operación de los dipolos a 850 MHz, pero moduladas en distintos esquemas.



**Figura 4.1:** Señal 1.

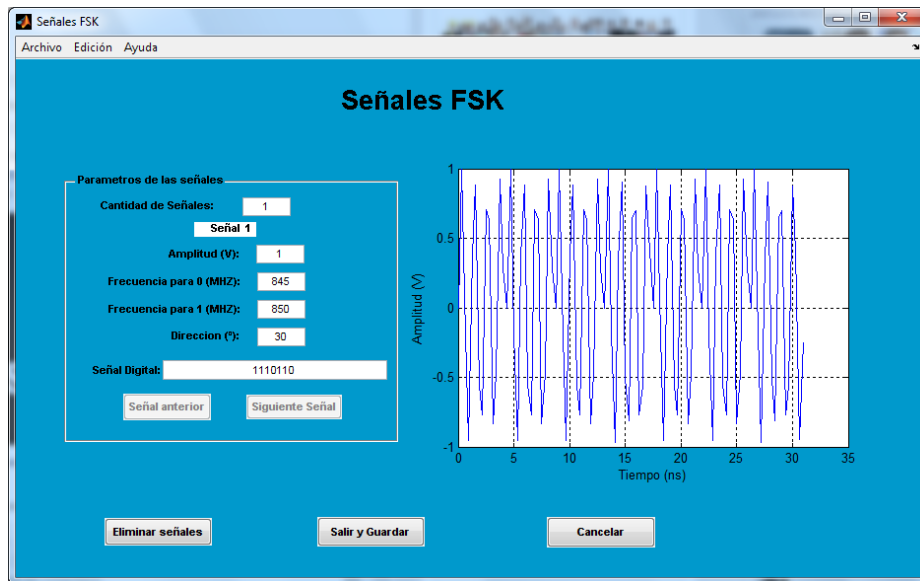


Figura 4.2: Señal 2.

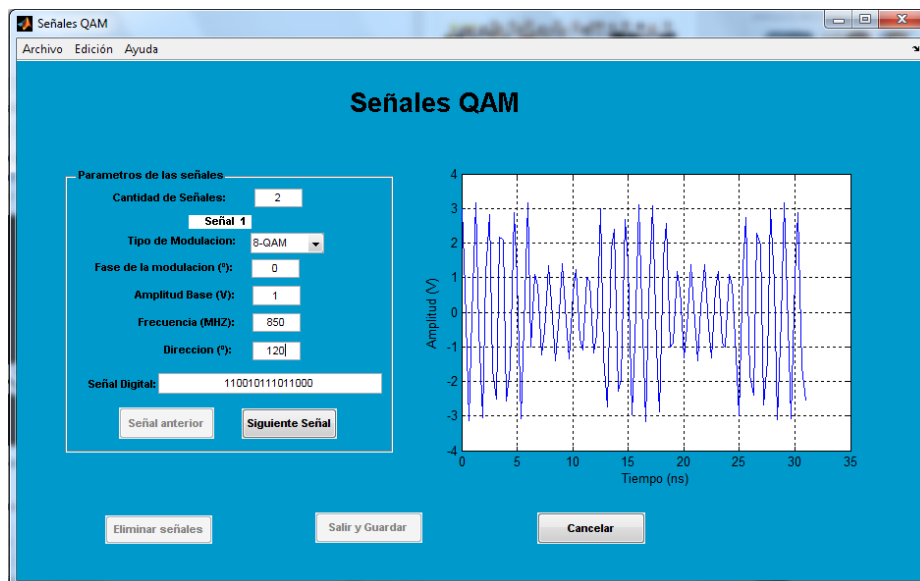


Figura 4.3: Señal 3.

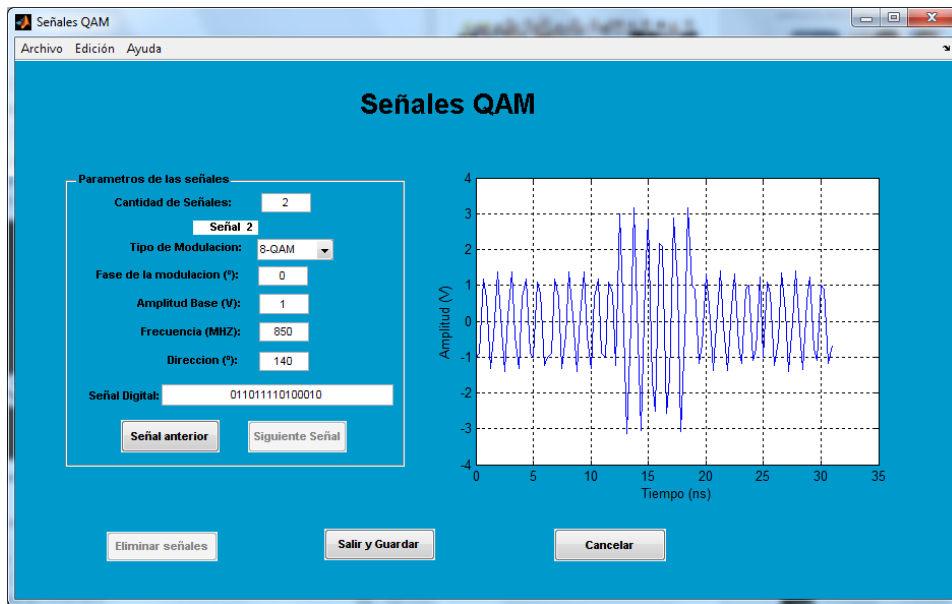


Figura 4.4: Señal 4.

### Espectro MUSIC.

En la tabla 4.2 se presenta la configuración de los parámetros del algoritmo MUSIC, debido a que la relación señal a ruido varia para el estudio está no aparece reflejada en la tabla.

<b>Cantidad de Muestras</b>	100
<b>Frecuencia de Muestreo (MHz)</b>	3400
<b>Auto valores de Ruido</b>	0.05
<b>Resolución Angular (°)</b>	0.01
<b>Umbral de Detección (dB)</b>	15

Tabla 4.2: Configuración del algoritmo MUSIC.

Para el estudio se realizaron 3 pruebas bajo distinta relación señal a ruido, en la siguiente tabla se presenta las distintas SNR.

<b>Relación Señal a Ruido (SNR)</b>	30dB	20dB	12dB
-------------------------------------	------	------	------

Tabla 4.3: Valores de Señal a Ruido.



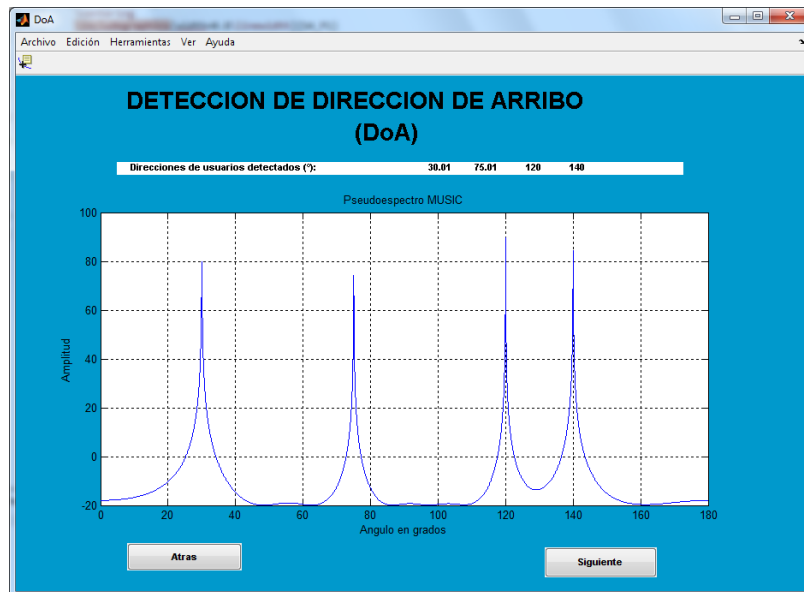


Figura 4.5: Espectro MUSIC con relación señal a ruido de 30 dB.

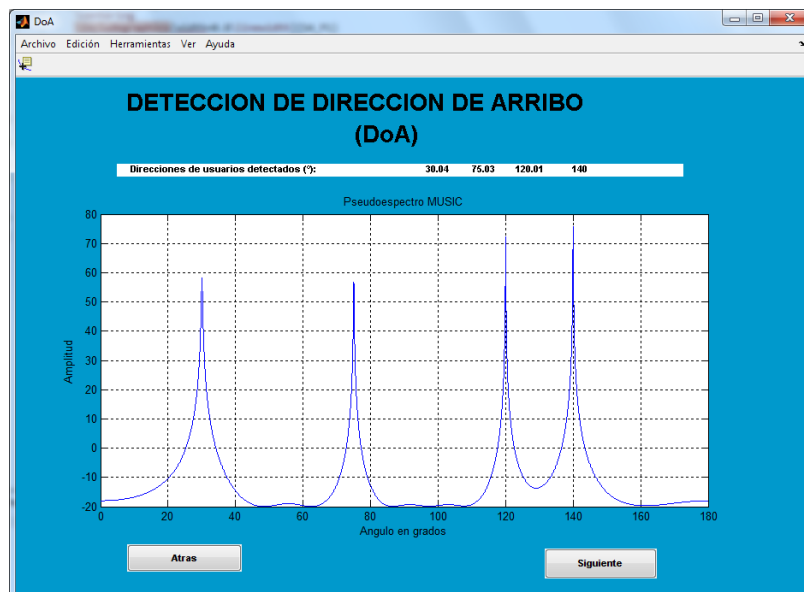


Figura 4.6: Espectro MUSIC con relación señal a ruido de 20 dB.



Figura 4.7: Espectro MUSIC con relación señal a ruido de 12 dB.

SNR	30°	75°	120°	140°
Espectro MUSIC SNR 30 dB	30.01	75.01	120	140
Espectro MUSIC SNR 20 dB	30.04	75.03	120.01	140
Espectro MUSIC SNR 12 dB	29.98	75.29	120.35	139.92

Tabla 4.4: Resultados del Espectro MUSIC.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 4.4 se puede observar que para una relación señal a ruido (SNR) de 30 dB y 20 dB el sistema estima con precisión las direcciones de las señales que ingresan al sistema.

Por otro se aprecia que para una relación señal a ruido de 12 dB la estimación del sistema varía, a pesar de esto la estimación sigue siendo buena, sin embargo como se puede apreciar en la figura 4.7 aparece una quinta dirección detectada de una señal no presente en el sistema, esto se debe a que para una relación señal a ruido muy baja, el ruido presente y las señales se mezclan por lo cual la información espacial contenida en la matriz de covarianza se distorsiona, ocasionando que el algoritmo falle.

#### 4.2.2. Prueba 2: Comportamiento del sistema cuando la frecuencia de portadora de las señales varia.

En esta prueba se observara el comportamiento de la etapa DoA, cuando las señales incidentes en el sistema están moduladas a diferentes portadoras, ubicadas dentro del ancho de banda del sistema establecido en la ecuación ?? en 95 MHz donde las frecuencias de portadoras van de 806 MHz a 890 MHz.

Para realizar esta prueba se utilizo la siguiente configuración del arreglo de antenas.

Número de Elementos de Antena	10
Longitud de Dipolos ( $\lambda$ )	0.5
Separación entre Elementos ( $\lambda$ )	0.5

Tabla 4.5: Configuración del Arreglo de Antenas.

Como señales bajo prueba se tomaron en cuenta las siguientes señales las cuales están moduladas a distintos esquemas.

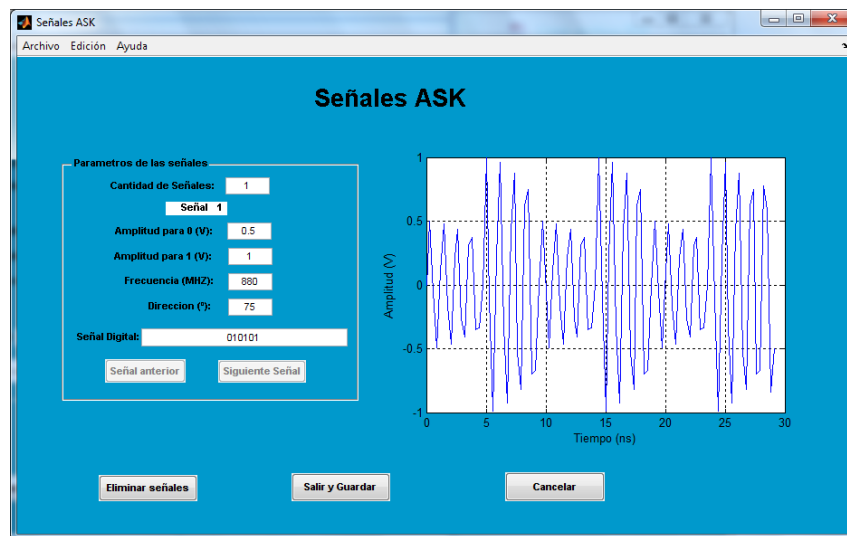


Figura 4.8: Señal 1.

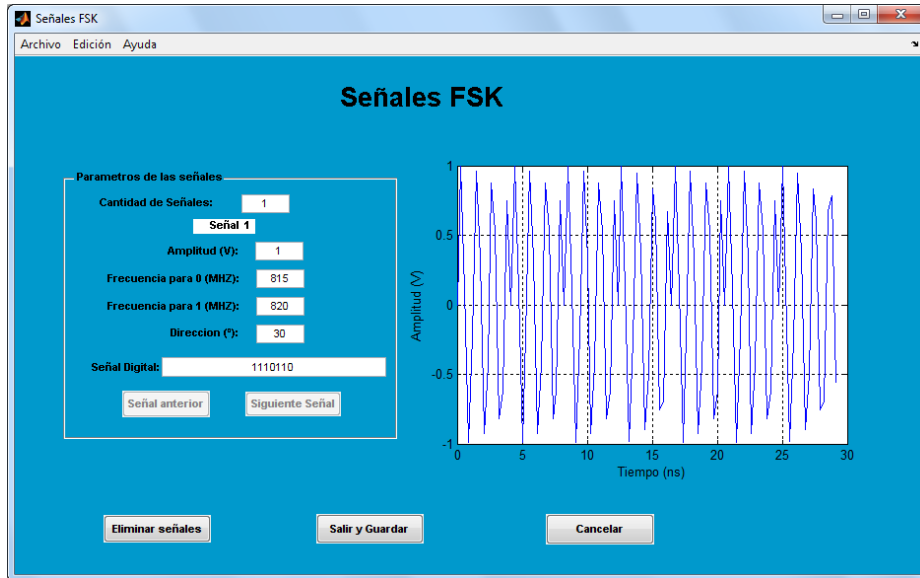


Figura 4.9: Señal 2.

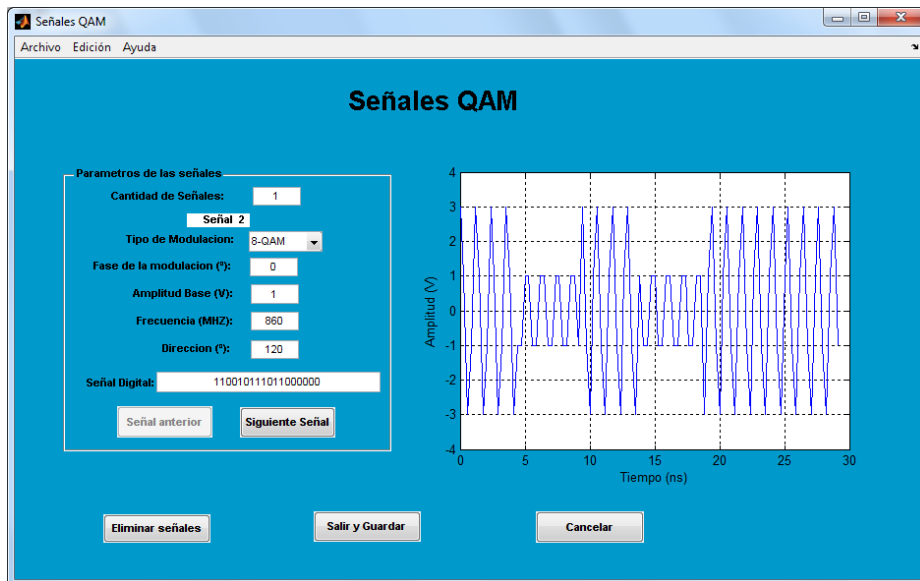


Figura 4.10: Señal 3.

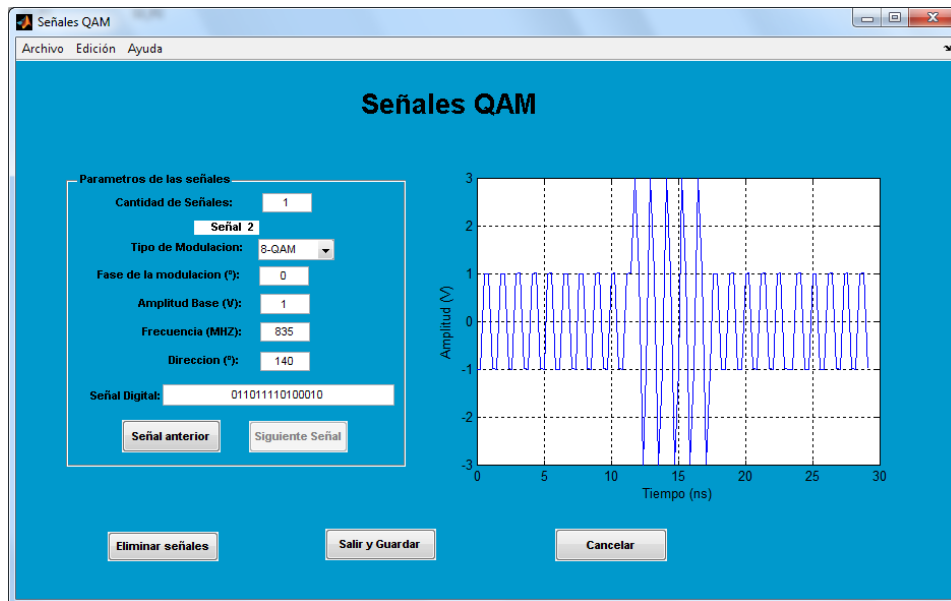


Figura 4.11: Señal 4.

### Espectro MUSIC.

En la tabla 4.6 se presenta la configuración de los parámetros del algoritmo MUSIC utilizados en esta prueba.

<b>Cantidad de Muestras</b>	100
<b>Frecuencia de Muestreo (MHz)</b>	3400
<b>Auto valores de Ruido</b>	0.05
<b>Resolución Angular (°)</b>	0.01
<b>Umbral de Detección (dB)</b>	15
<b>Relación Señal a Ruido (dB)</b>	30

Tabla 4.6: Configuración del algoritmo MUSIC.

De las figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11 se observa que para el estudio se consideraron las siguientes frecuencias como frecuencias de portadoras.

Señal 1	Señal 2	Señal 3	Señal 4
880MHz	820MHz	860MHz	835MHz

Tabla 4.7: Frecuencias de Portadoras.

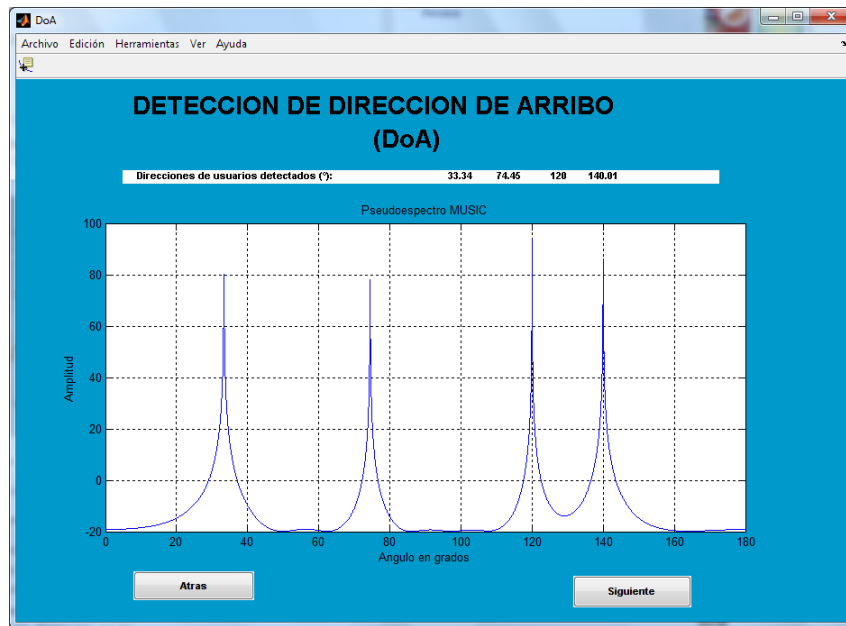


Figura 4.12: Espectro MUSIC de Señales a distinta Frecuencia de Portadora.

De la figura 4.12 obtenemos el siguiente resultado:

<b>Direcciones</b>	30°	75°	120°	140°
<b>Espectro MUSIC</b>	33.34	74.45	120	140.01

Tabla 4.8: Resultados del Espectro MUSIC.

Observando los resultados reflejados en la tabla 4.8 se evidencia que la precisión del algoritmo MUSIC no es exacta. Esto se aprecia más en el caso de la Señal 1 la cual tiene una portadora de 820 MHz, donde su dirección en el plano horizontal con respecto al eje del arreglo es de 30° y la estimación realizada por el algoritmo para esta señal es de 33,34° la cual dista mucho de la dirección de la señal.

### 4.2.3. Prueba 3: Comportamiento del sistema cuando las Señales son próximas entre si.

En esta prueba se el comportamiento de la etapa DoA, cuando las señales incidentes en el sistema son próximas entre si, en otras palabras cuando son angularmente cercanas.

Para realizar esta prueba se utilizo la siguiente configuración del arreglo de antenas.

<b>Número de Elementos de Antena</b>	10
<b>Longitud de Dipolos (<math>\lambda</math>)</b>	0.5
<b>Separación entre Elementos (<math>\lambda</math>)</b>	0.5

Tabla 4.9: Configuración del Arreglo de Antenas.

Como señales bajo prueba se tomaron en cuenta las siguientes señales las cuales están moduladas a distintos esquemas.

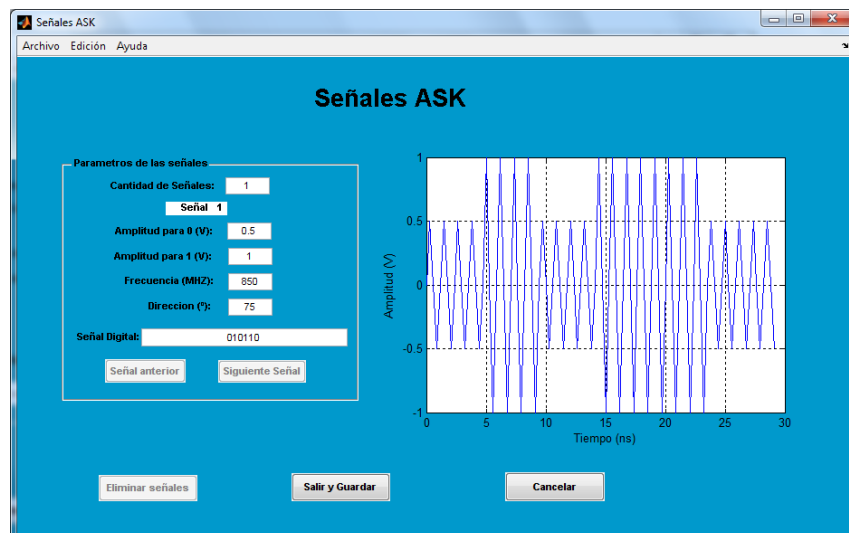


Figura 4.13: Señal 1.

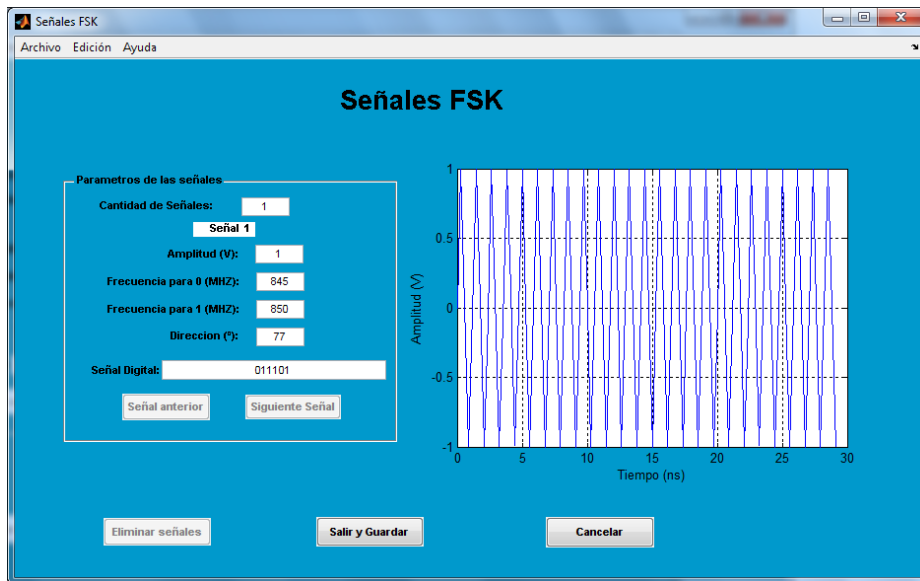


Figura 4.14: Señal 2.

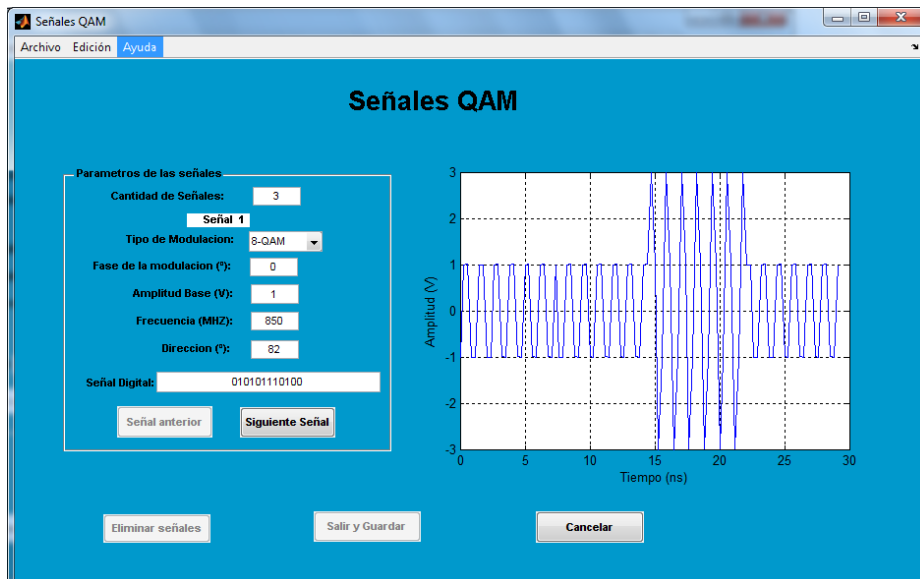


Figura 4.15: Señal 3.



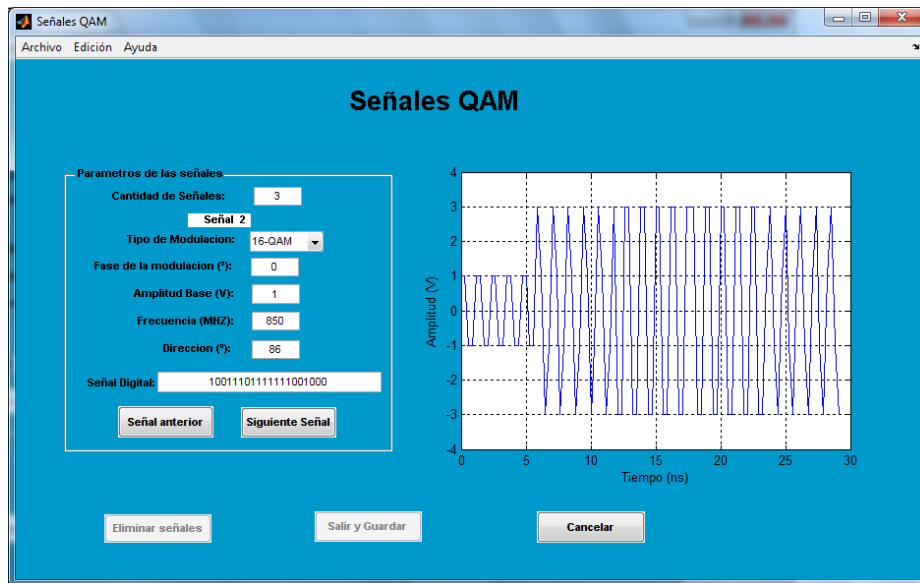


Figura 4.16: Señal 4.

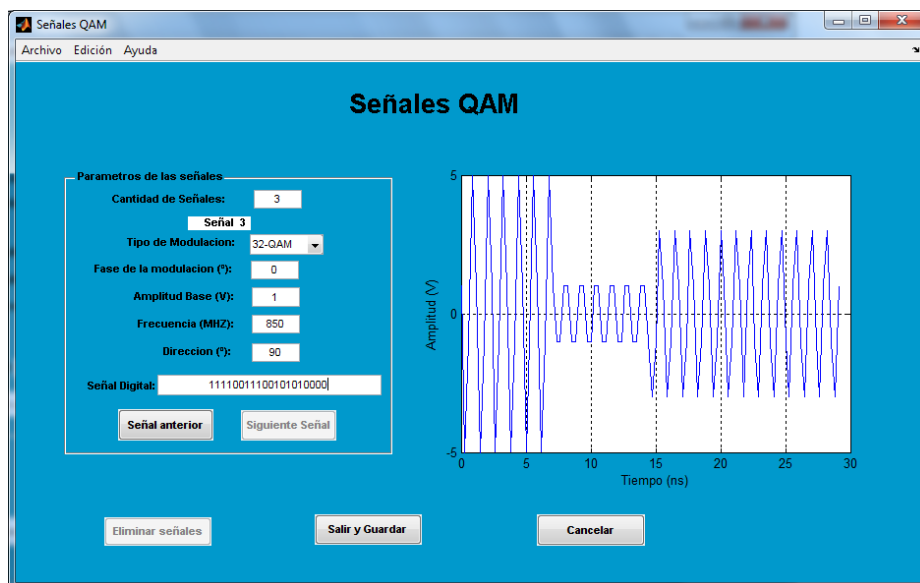


Figura 4.17: Señal 5.

### Espectro MUSIC.

En la tabla 4.10 se presenta la configuración de los parámetros del algoritmo MUSIC utilizados en esta prueba.

<b>Cantidad de Muestras</b>	100
<b>Frecuencia de Muestreo (MHz)</b>	3400
<b>Auto valores de Ruido</b>	0.05
<b>Resolución Angular (°)</b>	0.01
<b>Umbral de Detección (dB)</b>	15
<b>Relación Señal a Ruido (dB)</b>	30

Tabla 4.10: Configuración del algoritmo MUSIC.



Figura 4.18: Espectro MUSIC de Señales próximas entre sí.

<b>Direcciones</b>	75°	77°	82°	86°	90°
<b>Espectro MUSIC</b>	75.82	?	81.73	85.94	89.9

Tabla 4.11: Resultados del Espectro MUSIC.

Los resultados reflejados en la tabla 4.11 indican que debido a la proximidad de las señales la estimación de las direcciones de arribo no es exacta, como se puede apreciar las señales son detectadas en otras direcciones sin embargo estas distan

tanto de las ideales, sin embargo observando la figura 4.18 se aprecia que solo fueron detectadas 4 direcciones de arribo y en la tabla 4.11 se constata que la señal que no se detecto es la señal ubicada a 77°. Como se pudo ver a medida que las señales son muy proximas entre sí esto genera que la etapa DoA no este en la capacidad de detectar las direcciones de arribo con exactitud o en su defecto no las detectará.

### 4.3. Simulaciones Etapa PSO

Tomando en cuenta que la etapa PSO toma como parámetros de entrada las direcciones de arribo obtenidas en la etapa anterior DoA, es importante establecer una configuración de los parámetros DoA que permita realizar una buena estimación de las direcciones de arribo de las señales que ingresan al sistema, dándole así una mayor robustez a la etapa PSO ya que los pesos que esta estimara a partir de los datos de la etapa DoA generaran patrones de radiación cuya dirección de haz principal estará dirigida con mayor precisión a los usuarios. Tomando en cuenta esto se tomo la siguiente configuración de la etapa DoA:



**Figura 4.19:** Configuración de la Etapa DoA utilizada para las pruebas de la Etapa PSO.

Como se observa en la figura 4.19 los parámetros DoA establecidos para el estudio fueron los siguientes:

Parámetro	Valor Establecido
Numero de Muestras	100
Frecuencia de Muestreo	3400 MHz
Autovalores	0.05
Resolución Angular	1°
Umbral de Detección	15 dB
Relación Señal a Ruido	30 dB

Tabla 4.12: Parámetros DoA.

Como señales de muestras para el estudio se seleccionaron 3 señales a distintas modulaciones, una con modulación ASK, otra con modulación FSK y la tercera de ellas modulada en 16 – QAM. Es importante mencionar que las tres señales se encuentran a la misma frecuencia de portadora, la cual se centro a 850 MHz siendo esta la frecuencia de operación de los dipolos. En las siguientes figuras se muestran las señales utilizadas para el estudio:

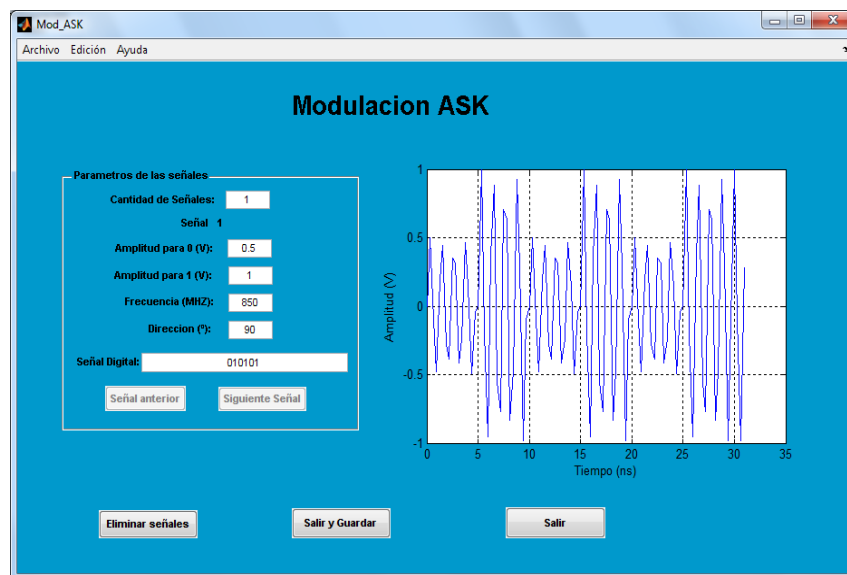


Figura 4.20: Señal ASK (Señal 1).

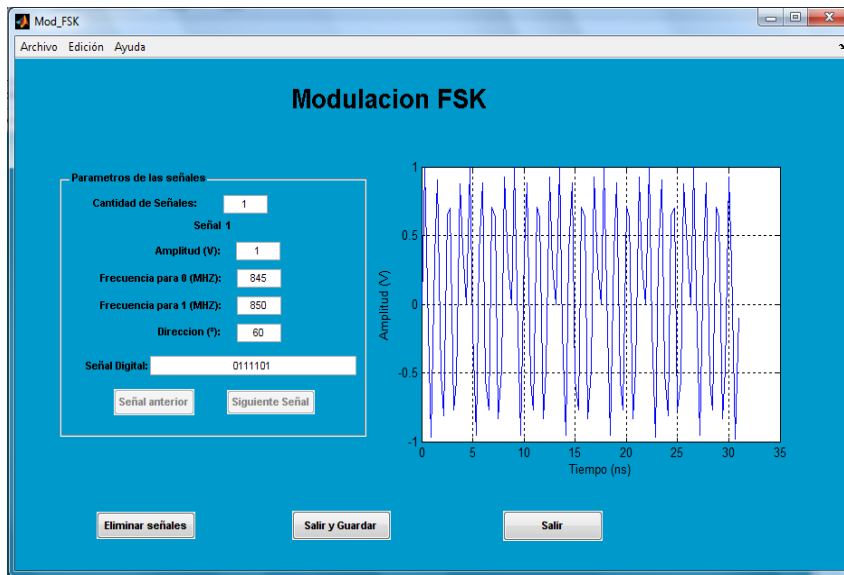


Figura 4.21: Señal FSK (Señal 2).

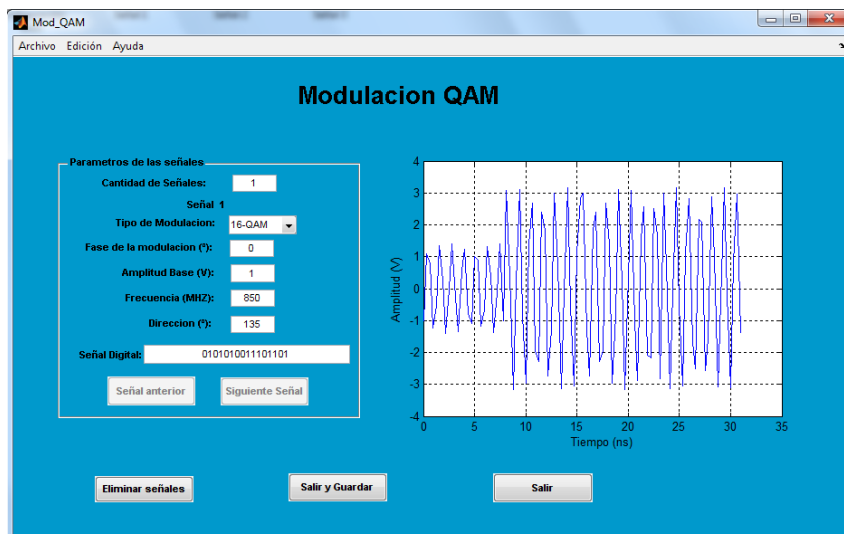


Figura 4.22: Señal 16-QAM (Señal 3).

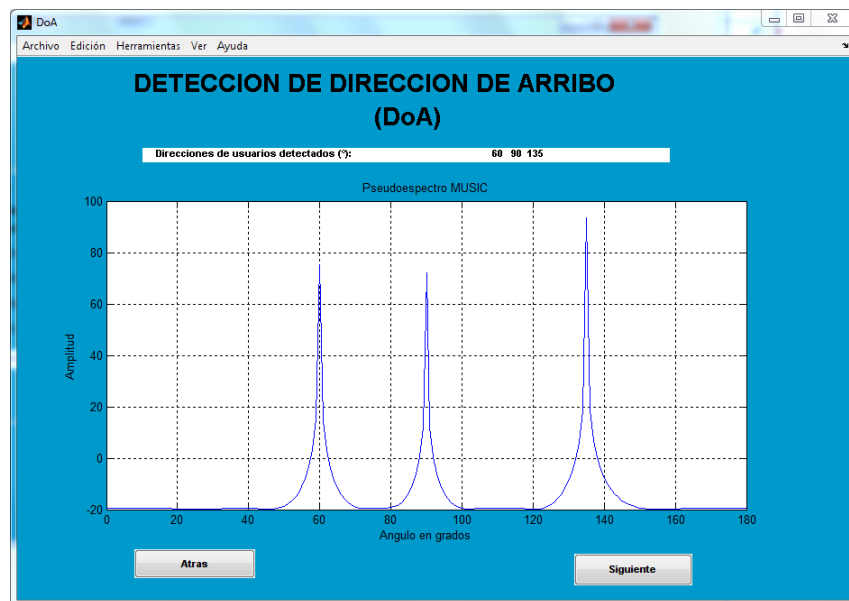


Figura 4.23: Espectro MUSIC de las señales.

En la figura 4.23 se observa el espectro MUSIC obtenido en la etapa DoA, donde se pueden apreciar las direcciones de arribo de las señales detectadas por el sistema, las cuales se ubican a  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  del eje del arreglo en el plano XY.

### 4.3.1. Prueba 1: Comportamiento del sistema cuando la experiencia grupal $c_2$ de las partículas es igual a 0.

Dentro de la ecuación 2.57 está contenida la variable  $c_2$ , la cual representa el coeficiente de confianza en la experiencia del grupo, esto en otras palabras quiere decir que  $c_2$  es la variable que establece el nivel de confianza que tendrán las partículas al momento de comparar un resultado obtenido en un instante determinado con el mejor resultado que haya obtenido el grupo hasta ese momento. El objetivo de esta prueba fue determinar cual es el rendimiento presentado por el sistema al momento de establecer el coeficiente de confianza en la experiencia del grupo  $c_2$  con un valor de 0, viendo así cual es el resultado obtenido en el sistema cuando se omite la variable  $c_2$  dentro del algoritmo PSO.

En la figura 4.24 se observa la configuración efectuada en el algoritmo PSO en la cual la variable  $c_2 = 0$ , siendo la variable  $c_1 = 1$  el coeficiente de confianza en la experiencia individual por lo cual solo tomara en cuenta la experiencia individual.

Parámetros Básicos	
Número de iteraciones:	30
Número de partículas:	30
Atracción Individual (C1):	1
Atracción Social (C2):	0
Inercia (w):	0.8

Función Costo	
Nivel de Lóbulos Laterales (dB):	-12
Nivel de Nulos (dB):	-18
Costo del Lóbulo Principal:	30
Costo de los Lóbulos Laterales:	20
Costo de los Nulos:	10

Rango de posiciones de las partículas	
Alpha máximo:	1
Alpha mínimo:	0
Beta (°) máximo:	180
Beta (°) mínimo:	-180

Velocidad máxima de las partículas	
Alpha máximo:	0.075
Beta (°) máximo:	60

Configuración predeterminada

Cancelar      Aceptar

Figura 4.24: Configuración de las variables del algoritmo PSO siendo  $c_1 = 0$ .



**Evolución de las Señales:**

En las siguientes figuras se presenta la evolución de los diagramas de radiación de cada una de las señales, en los cuales el algoritmo PSO busca maximizar el diagrama en dirección de la señal de interés, y anular las señales interferentes.

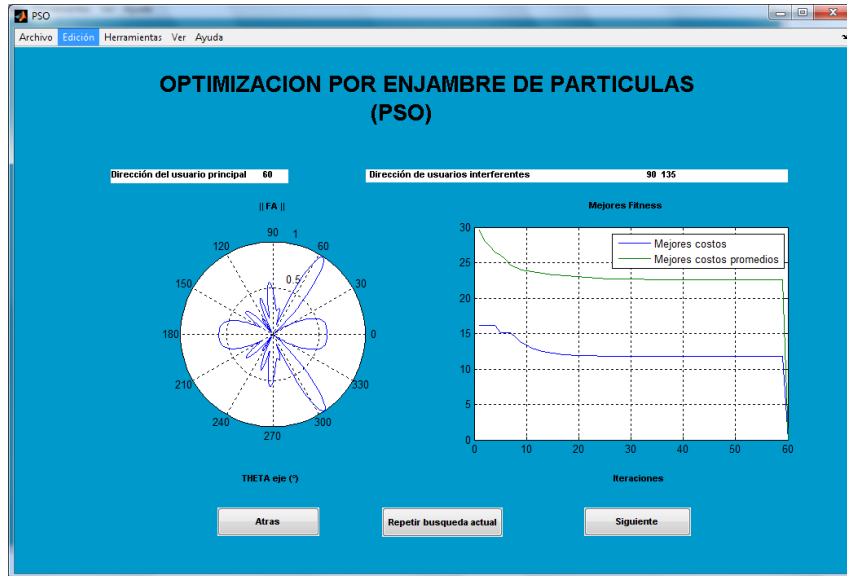


Figura 4.25: Evolución del diagrama de radiación en dirección 60°.

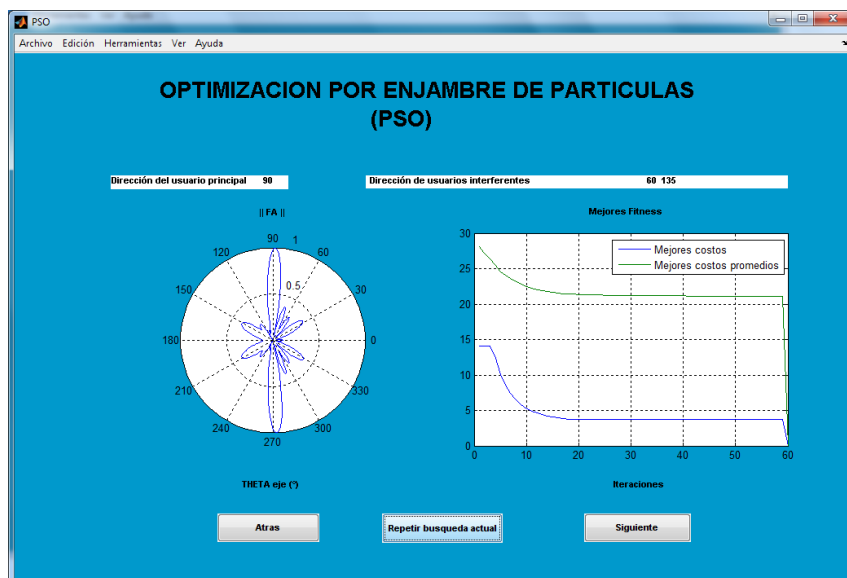
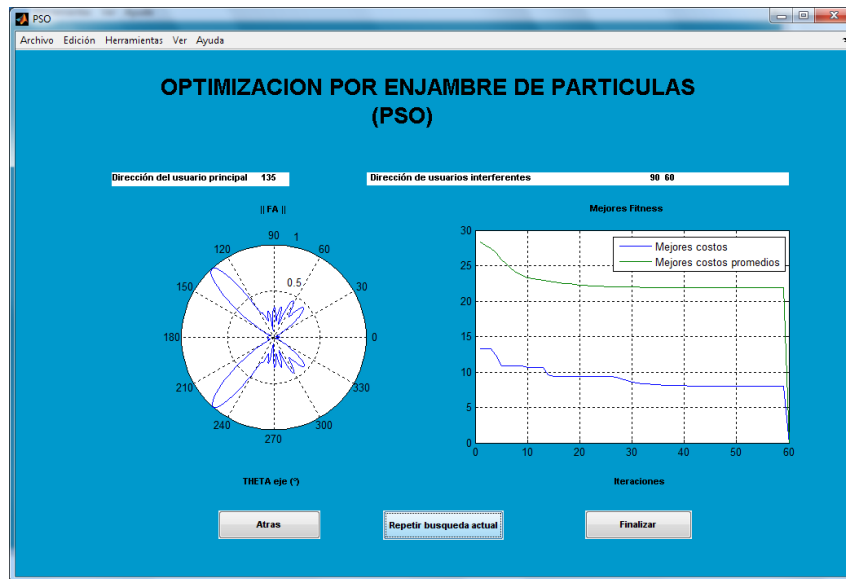


Figura 4.26: Evolución del diagrama de radiación en dirección 90°.



**Figura 4.27:** Evolución del diagrama de radiación en dirección  $135^\circ$ .

Observando las figuras 4.25, 4.26 y 4.27 se puede apreciar que la evolución que presenta el algoritmo PSO luego de 60 iteraciones no es óptima ya que idealmente el resultado más óptimo se obtiene cuando todas las partículas del enjambre convergen a 0, en otras palabras cuando se haya la solución más óptima de la función costo.

**Diagramas de Radiación del Sistema:**

**Señal 1:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 1.

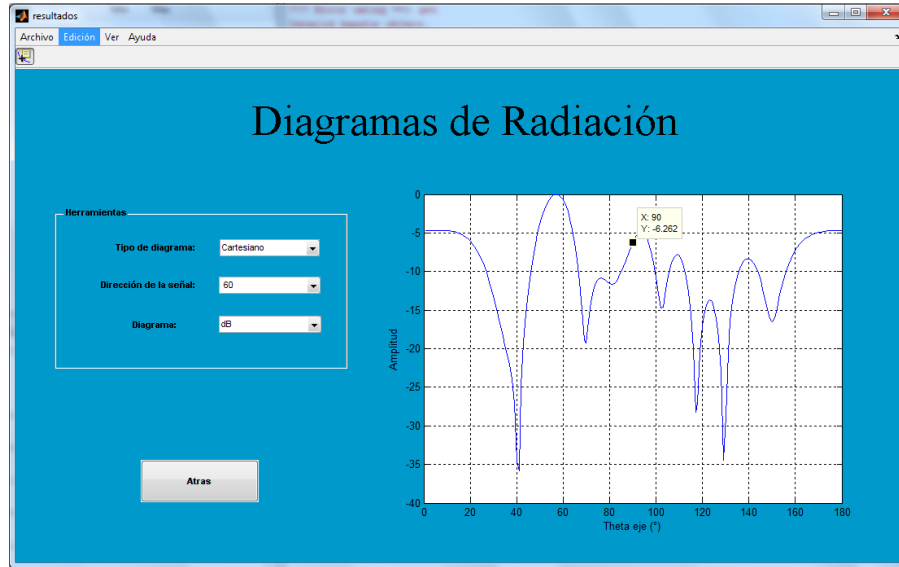


Figura 4.28: Diagrama de radiación a 60° con nivel de interferencia a 90°.

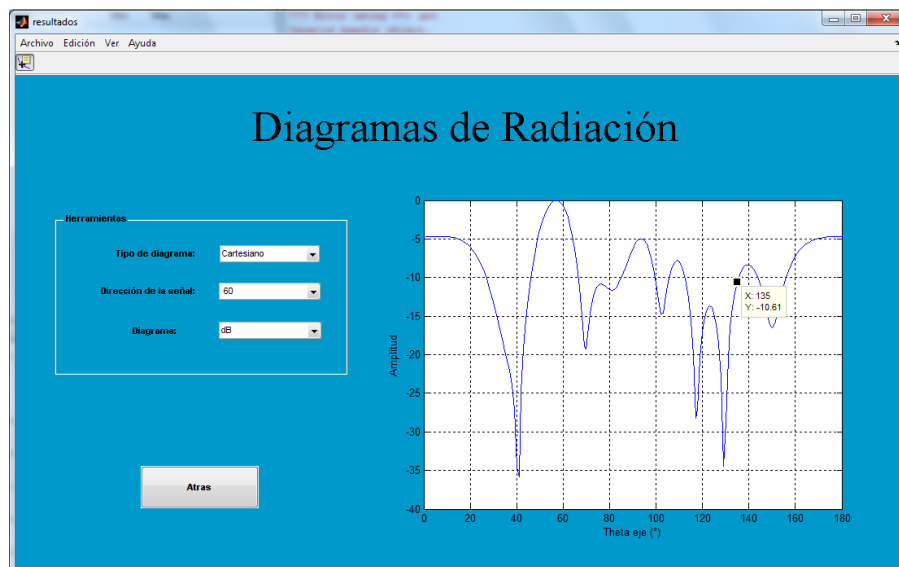


Figura 4.29: Diagrama de radiación a 60° con nivel de interferencia a 135°.

De las figuras 4.28 y 4.29 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 90°	-18 dB	-6.262 dB
Nivel en dirección 135°	-18 dB	-10.61 dB

Tabla 4.13: Nivel de las señales interferencias a la Señal 1.

### Señal 2:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 2.

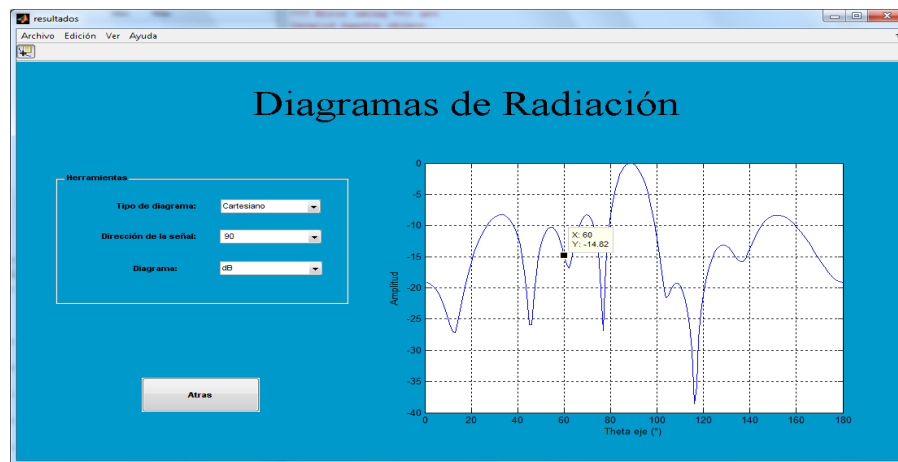


Figura 4.30: Diagrama de radiación a 90° con nivel de interferencia a 60°.

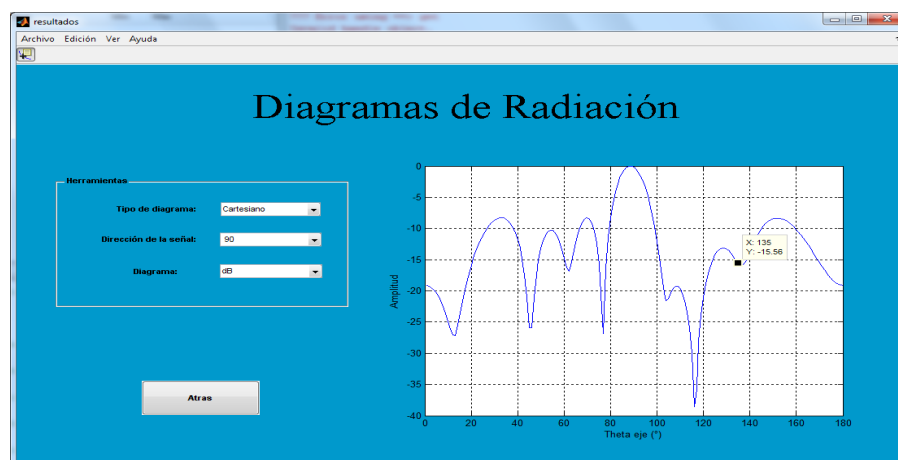


Figura 4.31: Diagrama de radiación a 90° con nivel de interferencia a 135°.

De las figuras 4.30 y 4.31 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-14.82 dB
Nivel en dirección 135°	-18 dB	-15.56 dB

Tabla 4.14: Nivel de las señales interferencias a la Señal 2.

**Señal 3:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 3.

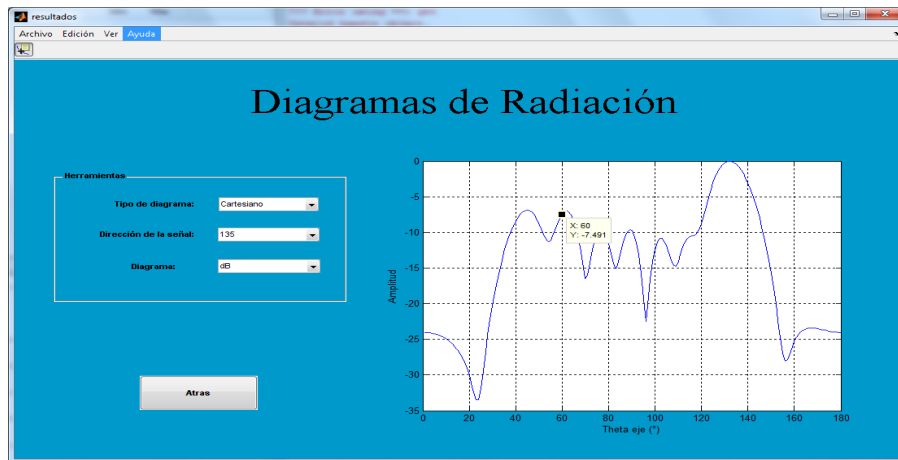


Figura 4.32: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 60°.

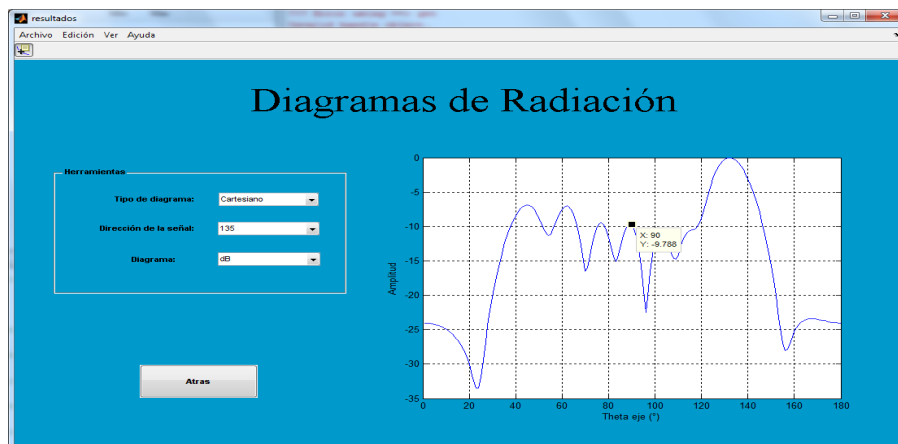


Figura 4.33: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 90°.

De las figuras 4.32 y 4.33 se obtiene:

<b>Dirección Interferente</b>	<b>Valor Esperado</b>	<b>Valor Obtenido</b>
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-7.491 dB
Nivel en dirección 90°	-18 dB	-9.788 dB

**Tabla 4.15:** Nivel de las señales interferencias a la Señal 3.

En base a los resultados obtenidos en las figuras 4.25, 4.26 y 4.27, se puede apreciar que al ser nulo el coeficiente de confianza en el grupo  $c_2$ , las partículas no consiguen una solución eficiente que satisfaga a la función costo por lo cual los resultados obtenidos no son los mas óptimos esto se puede apreciar en las tablas 4.13, 4.14, y 4.15 donde las señales interferentes no son anuladas por el sistema ya que los niveles de radiación tanto de los nulos como de los lóbulos laterales son muy altos. Estos niveles son mas fáciles de observar al ver cada una de las figuras de los diagramas de radiación. Se puede concluir que al anular el coeficiente de confianza en el grupo  $c_2$  el sistema no presentara un buen rendimiento para atender a las señales de interés y anular las interferentes.

### 4.3.2. Prueba 2: Comportamiento del sistema cuando la experiencia individual $c_1$ de las partículas es igual a 0.

Así como en el caso de  $c_2$  dentro de la ecuación 2.57 está contenida la variable  $c_1$ , la cual representa el coeficiente de confianza en la experiencia individual,  $c_1$  es la variable que establece el nivel de confianza que tendrá una partícula al momento de comparar un resultado obtenido en un instante determinado con el mejor resultado que haya dicha partícula hasta ese momento. El objetivo de esta prueba fue determinar cual es el rendimiento presentado por el sistema al momento de establecer el coeficiente de confianza en la experiencia individual  $c_1$  en 0.

En la figura 4.34 se observa la configuración efectuada en el algoritmo PSO en la cual la variable  $c_1 = 0$ , siendo la variable  $c_2 = 1$  el coeficiente de confianza en la experiencia grupal por lo cual solo tomara en cuenta la experiencia grupal.

Configuración del PSO	
<b>Parámetros Básicos</b>	
Número de iteraciones:	60
Número de partículas:	30
Atracción Individual (C1):	0
Atracción Social (C2):	1
Inercia (w):	0.8
<b>Función Costo</b>	
Nivel de Lóbulos Laterales (dB):	-12
Nivel de Nulos (dB):	-18
Costo del Lóbulo Principal:	30
Costo de los Lóbulos Laterales:	20
Costo de los Nulos:	10
<b>Rango de posiciones de las partículas</b>	
Alpha máximo:	1
Alpha mínimo:	0
Beta (°) máximo:	180
Beta (°) mínimo:	-180
<b>Velocidad máxima de las partículas</b>	
Alpha máximo:	0.075
Beta (°) máximo:	60

Figura 4.34: Configuración de las variables del algoritmo PSO siendo  $c_2 = 0$ .

### Evolución de las Señales:

En las siguientes figuras se presenta la evolución de los diagramas de radiación de cada una de las señales, en los cuales el algoritmo PSO busca maximizar el diagrama en dirección de la señal de interés, y anular las señales interferentes.

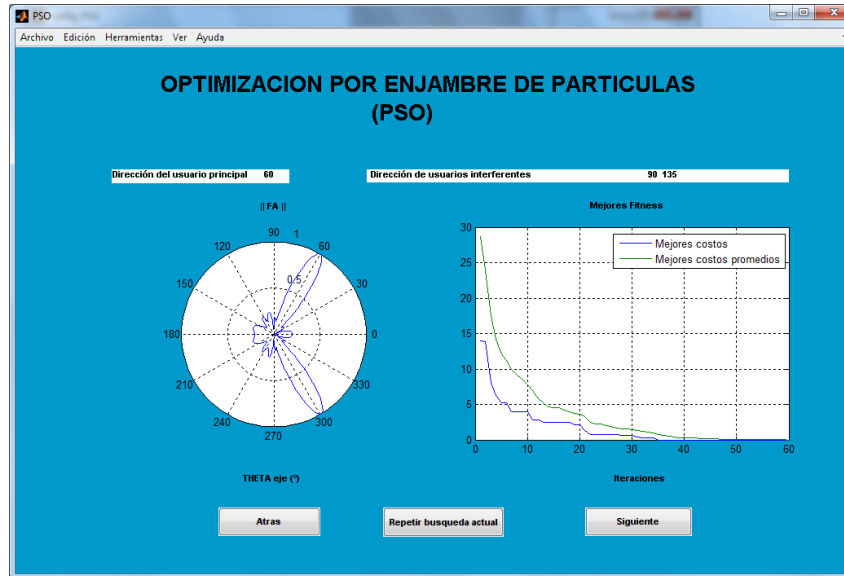


Figura 4.35: Evolución del diagrama de radiación en dirección 60°.

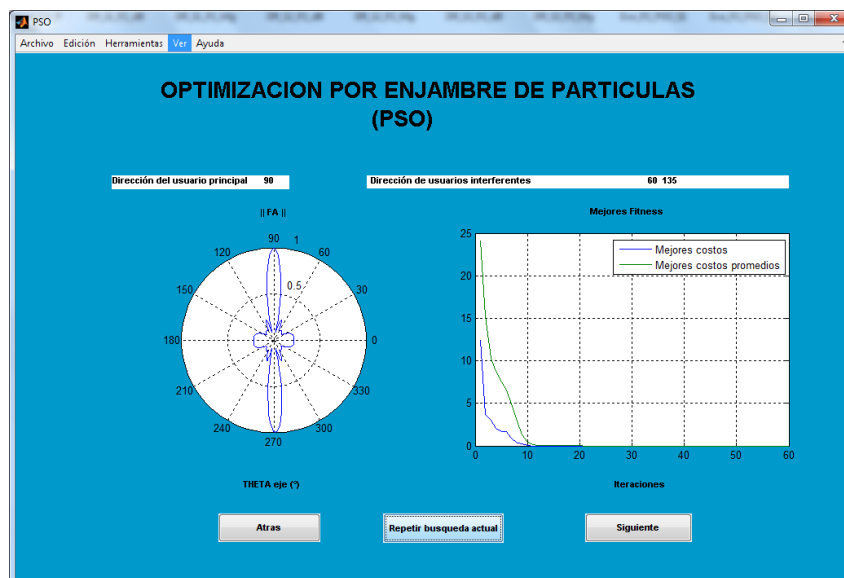


Figura 4.36: Evolución del diagrama de radiación en dirección 90°.



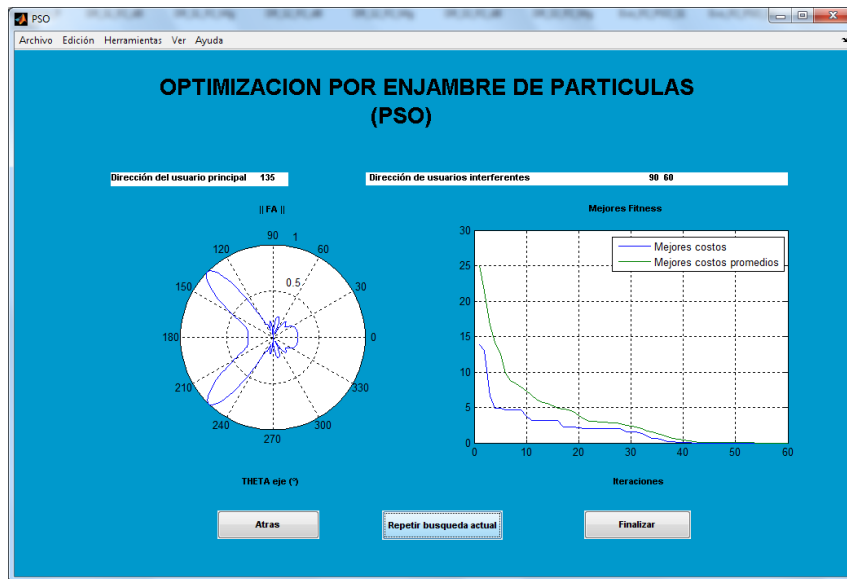


Figura 4.37: Evolución del diagrama de radiación en dirección 135°.

Al observar las figuras 4.35, 4.36 y 4.37 se puede apreciar que a diferencia de la Prueba 1, el resultado final arrojado por el algoritmo PSO es óptimo debido a que se puede apreciar que las partículas convergen a 0, lo que indica que estas encontraron la solución más óptima dentro del espacio de búsqueda que satisface las condiciones de la función costo.

### Diagramas de Radiación del Sistema:

#### Señal 1:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 1.

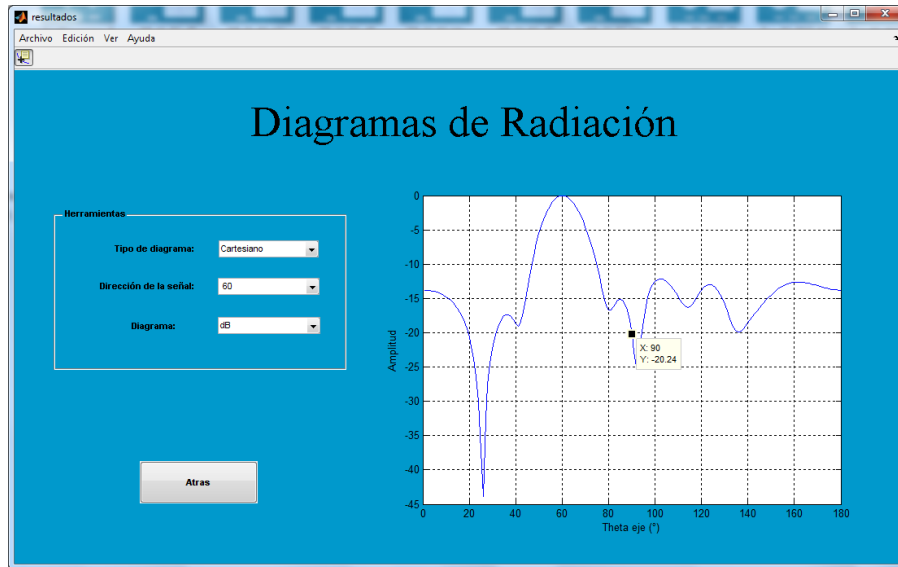


Figura 4.38: Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $90^\circ$ .

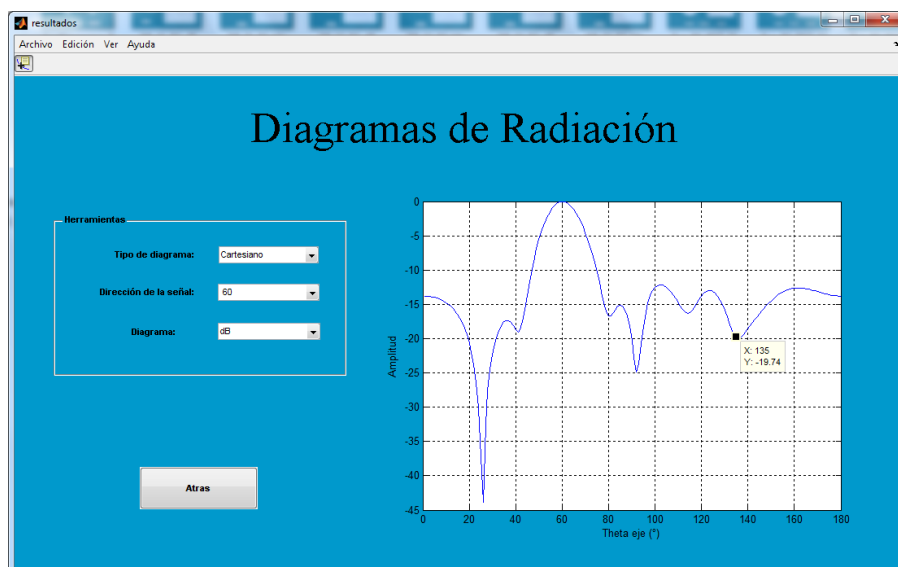


Figura 4.39: Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $135^\circ$ .

De las figuras 4.38 y 4.39 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 90°	-18 dB	-20.24 dB
Nivel en dirección 135°	-18 dB	-19.74 dB

Tabla 4.16: Nivel de las señales interferencias a la Señal 1.

**Señal 2:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 2.

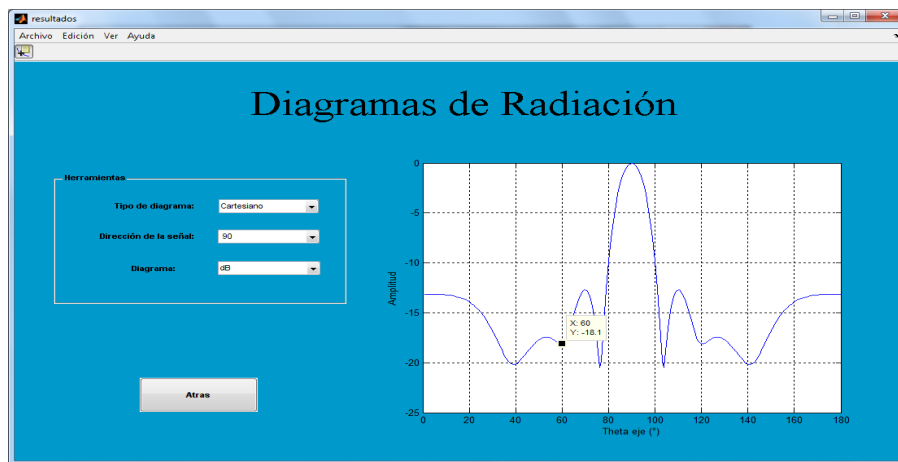


Figura 4.40: Diagrama de radiación a 90° con nivel de interferencia a 60°.

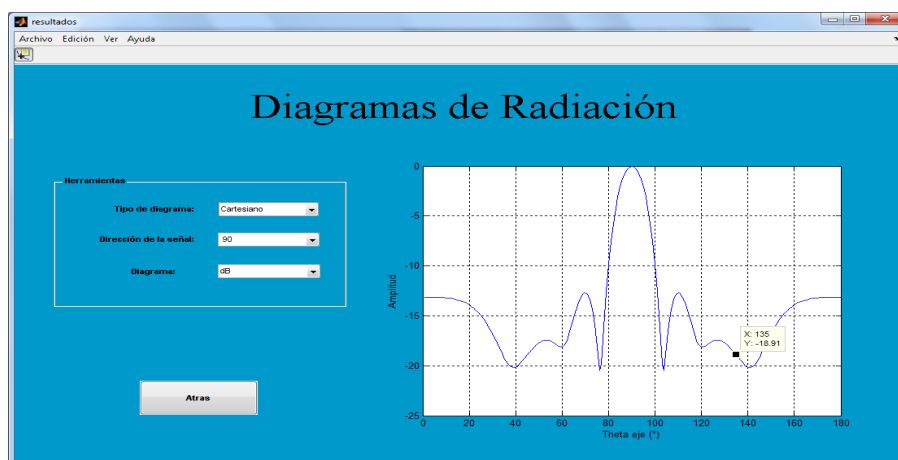


Figura 4.41: Diagrama de radiación a 90° con nivel de interferencia a 135°.

De las figuras 4.40 y 4.41 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-18.1 dB
Nivel en dirección 135°	-18 dB	-18.91 dB

Tabla 4.17: Nivel de las señales interferencias a la Señal 2.

### Señal 3:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 3.

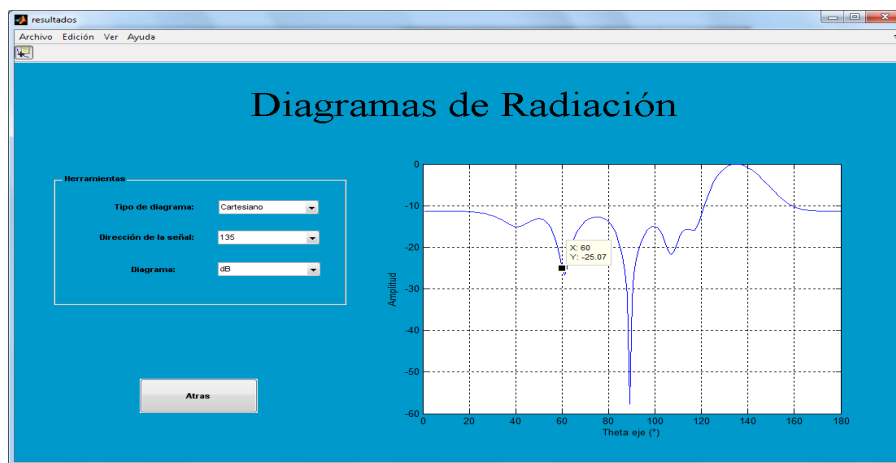


Figura 4.42: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 60°.

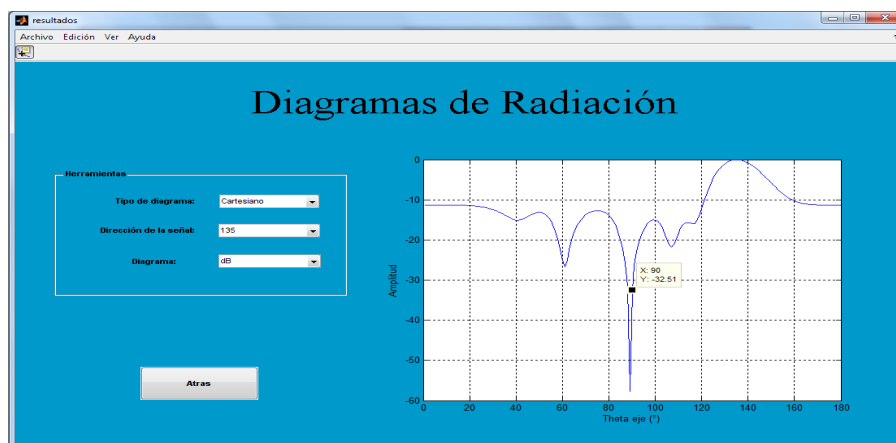


Figura 4.43: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 90°.

De las figuras 4.42 y 4.43 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección $60^\circ$	-18 dB	-25.07 dB
Nivel en dirección $90^\circ$	-18 dB	-32.51 dB

**Tabla 4.18:** Nivel de las señales interferencias a la Señal 3.

De acuerdo a los resultados reflejados en las tablas 4.16, 4.17 y 4.18, los niveles de radiación obtenidos en dirección de las señales interferentes cumplen con las condiciones establecidas en la función costo, ya que como se puede apreciar el nivel establecido por el sistema para anular las señales interferentes se ubica en -18 dB, y los niveles obtenidos se ubican por debajo de los -18 dB. Como se pueden ver en las figuras 4.35, 4.36 y 4.37, las partículas convergen a 0 indicando que el mejor rendimiento posible alcanzado por el sistema bajo las condiciones de  $c_1 = 0$  fue logrado. Por otro lado observando los distintos diagramas de radiación obtenidos, los niveles de los lóbulos laterales se ubican alrededor de los -12 dB, dándole una mayor robustez al sistema ya que las señales que ingresen por estos lóbulos tendrán niveles muy bajos en comparación con el haz principal.

### 4.3.3. Prueba 3: Comportamiento del sistema cuando la experiencia individual $c_1$ y la experiencia grupal $c_2$ de las partículas es igual a 1.

Para esta prueba se tomo en cuenta tanto la experiencia individual  $c_1$  como la experiencia grupal  $c_2$ , para estudiar el comportamiento del sistema y el rendimiento del algoritmo PSO tomando en cuenta ambas variables. Esto significa que las partículas con cada iteración comparan el resultado que obtienen con su mejor resultado individual y con el mejor resultado grupal, lo cual garantiza que la búsqueda sea mas precisa.

En la figura 4.44 se observa la configuración efectuada en el algoritmo PSO en la cual la variable tanto la  $c_1 = 0$  y la variable  $c_2$  son iguales a 1.



Figura 4.44: Configuración de las variables del algoritmo PSO siendo  $c_1$  y  $c_2$  iguales a 1.

**Evolución de las Señales:**

En las siguientes figuras se presenta la evolución de los diagramas de radiación de cada una de las señales, en los cuales el algoritmo PSO busca maximizar el diagrama en dirección de la señal de interés, y anular las señales interferentes.

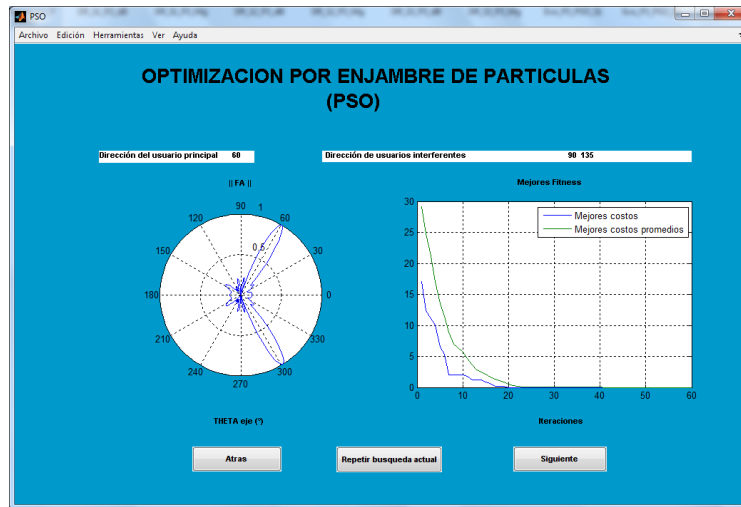


Figura 4.45: Evolución del diagrama de radiación en dirección 60°.

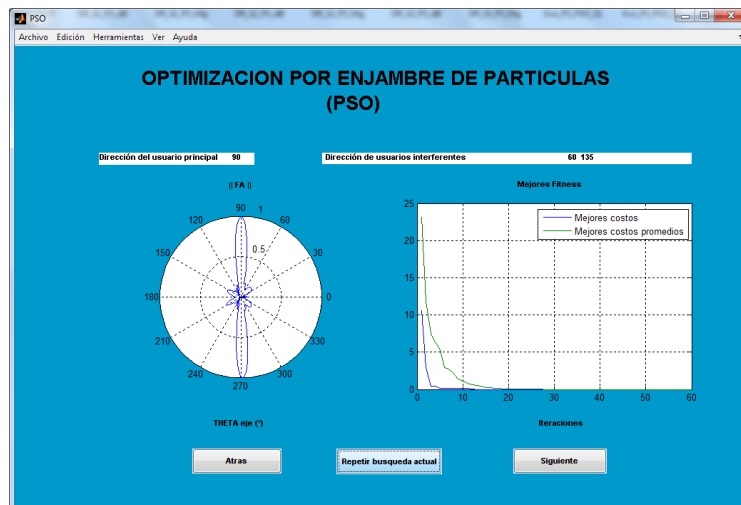
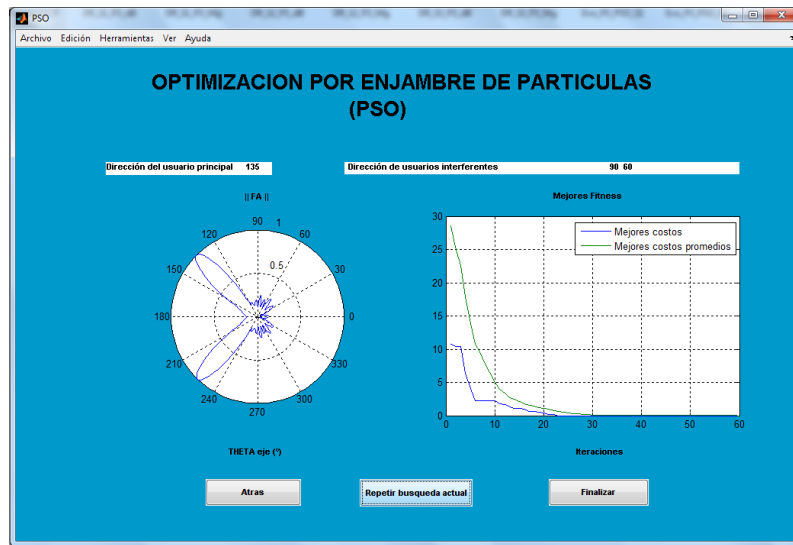


Figura 4.46: Evolución del diagrama de radiación en dirección 90°.



**Figura 4.47:** Evolución del diagrama de radiación en dirección  $135^\circ$ .

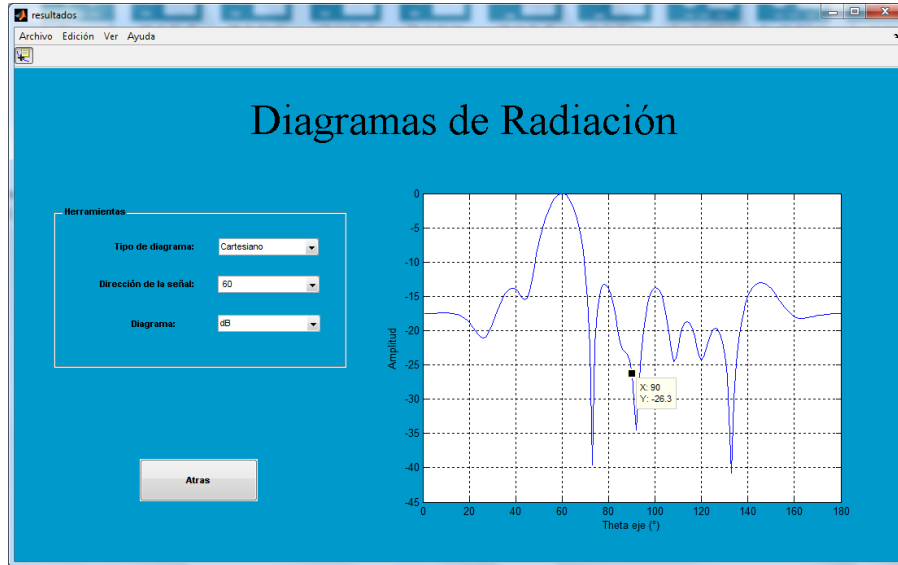
Como se observa en la figuras 4.45, 4.46 y 4.47, las partículas convergen a 0 alrededor de la iteración 40 requiriendo una menor cantidad de iteraciones en comparación con la pruebas anteriores.



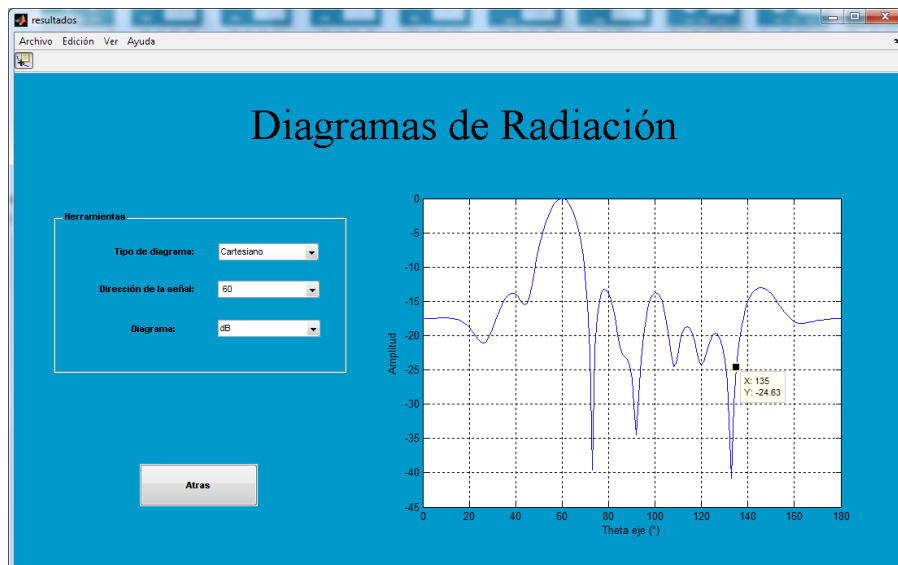
**Diagramas de Radiación del Sistema:**

**Señal 1:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 1.



**Figura 4.48:** Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $90^\circ$ .



**Figura 4.49:** Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $135^\circ$ .

De las figuras 4.48 y 4.49 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección $90^\circ$	-18 dB	-26.3 dB
Nivel en dirección $135^\circ$ s	-18 dB	-24.63 dB

Tabla 4.19: Nivel de las señales interferencias a la Señal 1.

### Señal 2:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 2.

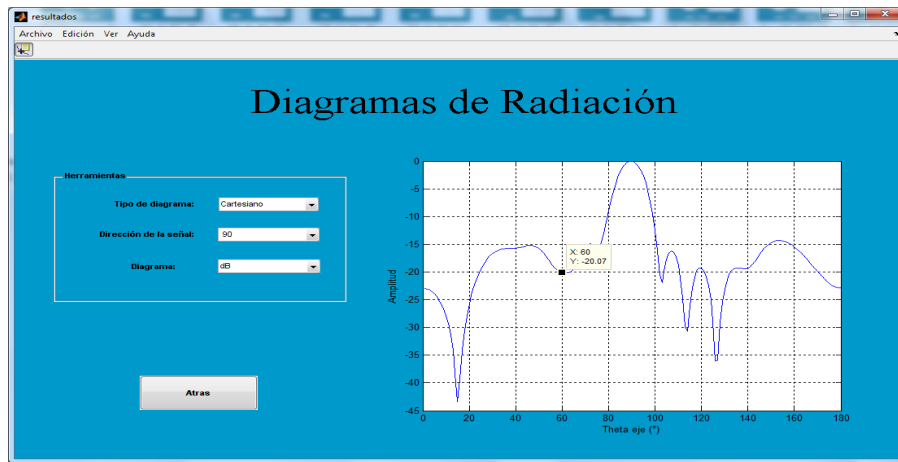


Figura 4.50: Diagrama de radiación a  $90^\circ$  con nivel de interferencia a  $60^\circ$ .

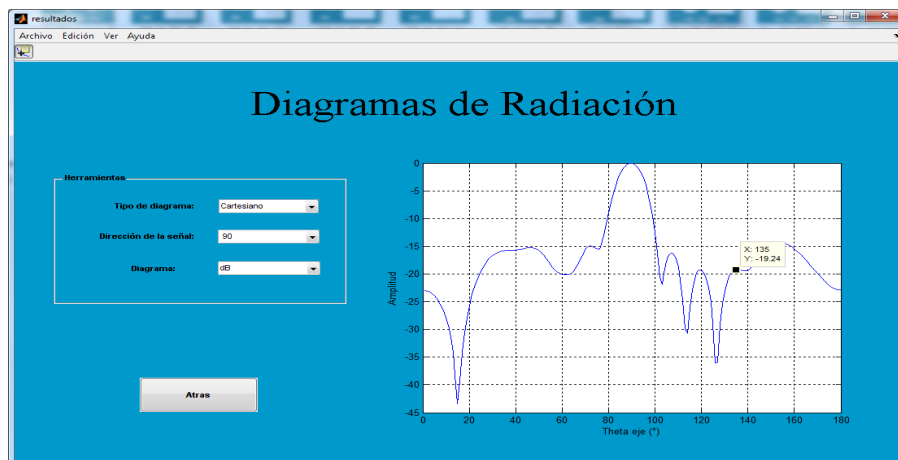


Figura 4.51: Diagrama de radiación a  $90^\circ$  con nivel de interferencia a  $135^\circ$ .

De las figuras 4.50 y 4.51 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-20.07 dB
Nivel en dirección 135°	-18 dB	-19.24 dB

Tabla 4.20: Nivel de las señales interferencias a la Señal 2.

**Señal 3:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 3.

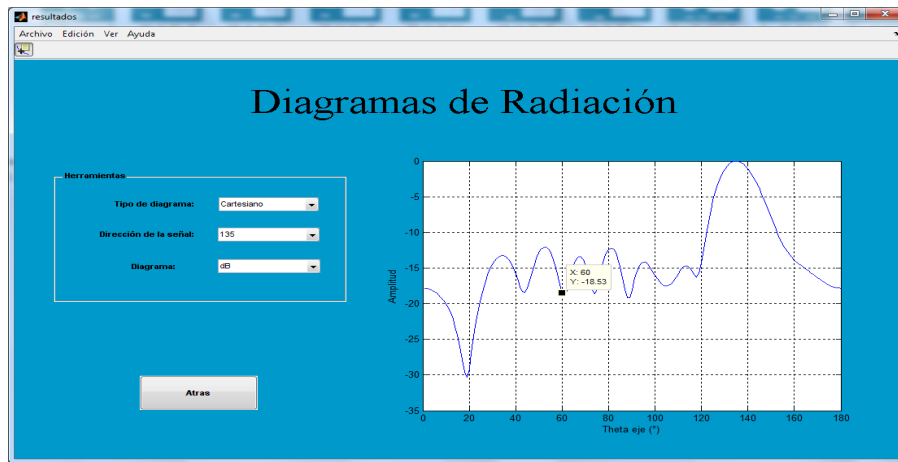


Figura 4.52: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 60°.

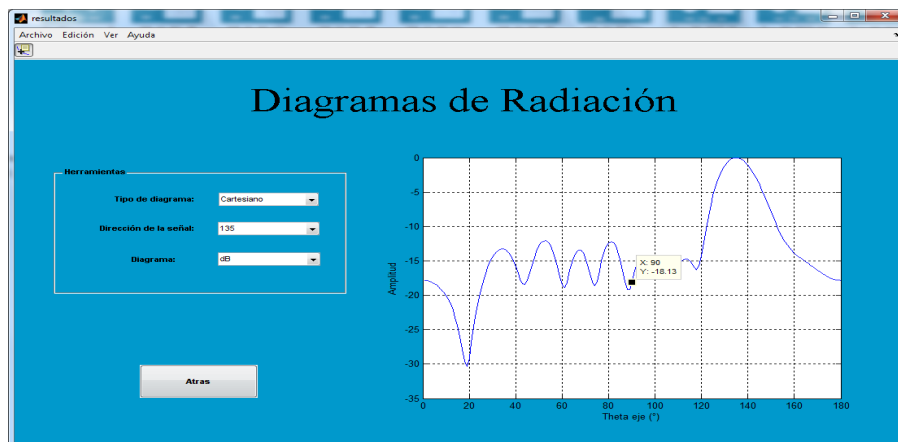


Figura 4.53: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 90°.

De las figuras 4.52 y 4.53 se obtiene:

<b>Dirección Interferente</b>	<b>Valor Esperado</b>	<b>Valor Obtenido</b>
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-18.53 dB
Nivel en dirección 90°	-18 dB	-18.13 dB

**Tabla 4.21:** Nivel de las señales interferencias a la Señal 3.

De las tablas 4.19, 4.20 y 4.21, se observa que los resultados obtenidos cumplen con los requerimientos del sistema ya que en dirección de las señales interferentes los niveles de radiación son muy bajos, ubicándose por debajo de los -18 dB y en las distintas figuras que muestran los diagramas de radiación se observa que el nivel de los lóbulos laterales es bajo. Esta precisión en los resultados se debe a que las partículas como se pudo observar en las figuras 4.45, 4.46 y 4.47 convergen a 0 y como se vio lo hacen en una menor cantidad de iteraciones, lo que favorece al sistema ya que permite que este presente una respuesta mas rápida. Esto se logra gracias a que las partículas toman en cuenta tanto su experiencia individual como su experiencia grupal, lo cual les permite deducir un mejor resultado con una mayor rapidez en comparación con las pruebas anteriores.

#### 4.3.4. Prueba 4: Comportamiento del sistema cuando el costo de los lóbulos laterales tiene mayor valor en la función costo.

Para esta prueba se dio un costo mayor a los lóbulos laterales dentro de la función costo del algoritmo PSO. Lo cual quiere decir que las partículas buscaran una solución de la función costo que estará centrada primordialmente en buscar los lóbulos laterales del diagrama de radiación, preocupandose de que estos cumplan con los niveles establecidos en la configuración del algoritmo.

Configuración del PSO	
<b>Parámetros Básicos</b>	
Número de iteraciones:	60
Número de partículas:	30
Atracción Individual (C1):	1
Atracción Social (C2):	1
Inercia (w):	0.8
<b>Rango de posiciones de las partículas</b>	
Alpha máximo:	1
Alpha mínimo:	0
Beta (°) máximo:	180
Beta (°) mínimo:	-180
<b>Función Costo</b>	
Nivel de Lóbulos Laterales (dB):	-12
Nivel de Nulos (dB):	-18
Costo del Lóbulo Principal:	20
Costo de los Lóbulos Laterales:	30
Costo de los Nulos:	10
<b>Velocidad máxima de las partículas</b>	
Alpha máximo:	0.075
Beta (°) máximo:	60

**Figura 4.54:** Configuración de la función costo siendo el costo de los lobulos laterales mayor.

En la figura 4.54 se observa la configuración del sistema para la etapa PSO, se puede apreciar que en la función costo los lóbulos laterales tienen mayor peso que el haz principal y los nulos de radiación, por lo cual de acuerdo a esa jerarquía el sistema basara su búsqueda en encontrar primero los lóbulos laterales centrados en -12 dB, y luego el haz principal y los nulos de acuerdo a su peso dentro de la función costo.

### Evolución de las Señales:

En las siguientes figuras se presenta la evolución de los diagramas de radiación de cada una de las señales, en los cuales el algoritmo PSO busca maximizar el diagrama en dirección de la señal de interés sin embargo para esta prueba el algoritmo PSO centrara primero su búsqueda en los lóbulos laterales, anulando las señales interferentes.

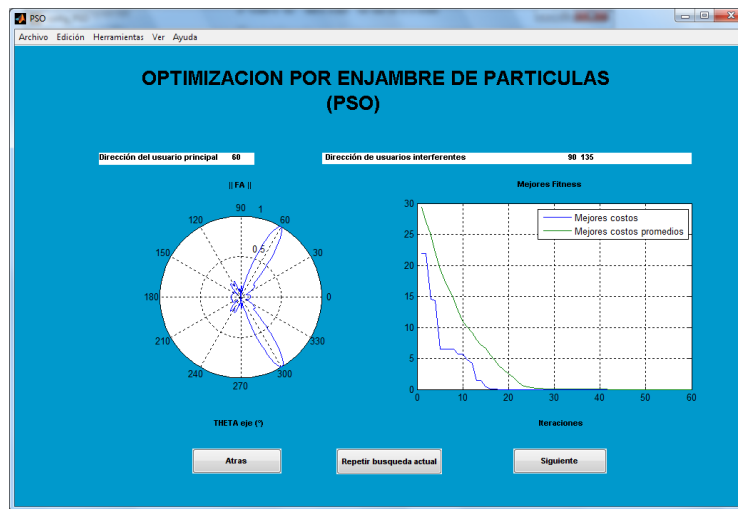


Figura 4.55: Evolución del diagrama de radiación en dirección  $60^\circ$ .

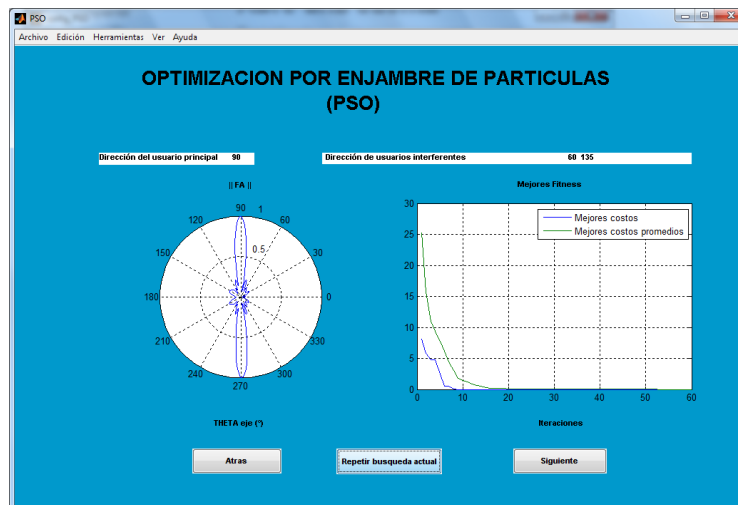


Figura 4.56: Evolución del diagrama de radiación en dirección  $90^\circ$ .

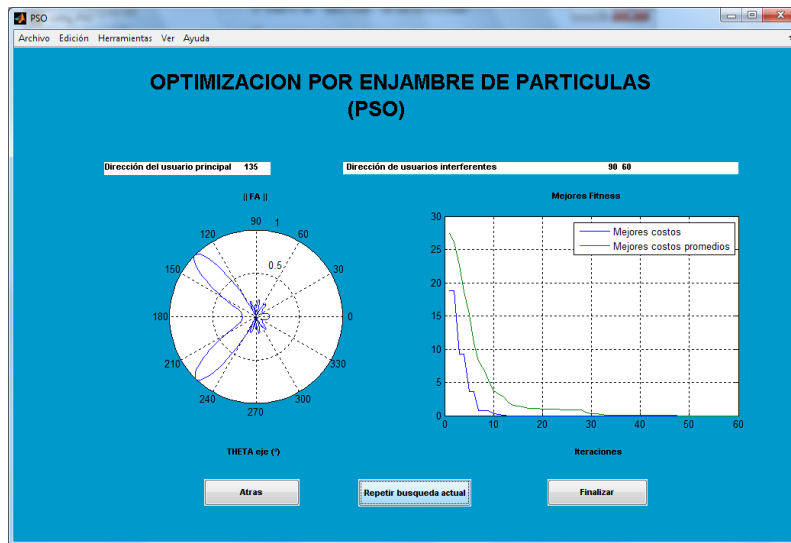


Figura 4.57: Evolución del diagrama de radiación en dirección 135°.

En las figuras 4.55 y 4.57 se aprecia que las partículas no convergen a 0 sin embargo las mismas logran converger a un nivel muy bajo lo para efectos del algoritmo se considera bueno, por otro lado en la figura 4.56 se observa que las partículas convergen por completo lo cual indica que se llegó al resultado óptimo. Para garantizar que las partículas converjan se puede aumentar la cantidad de partículas o el número de iteraciones, garantizando así una optimización del resultado sin embargo esto requeriría un tiempo de respuesta mayor.

### Diagramas de Radiación del Sistema:

#### Señal 1:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 1.

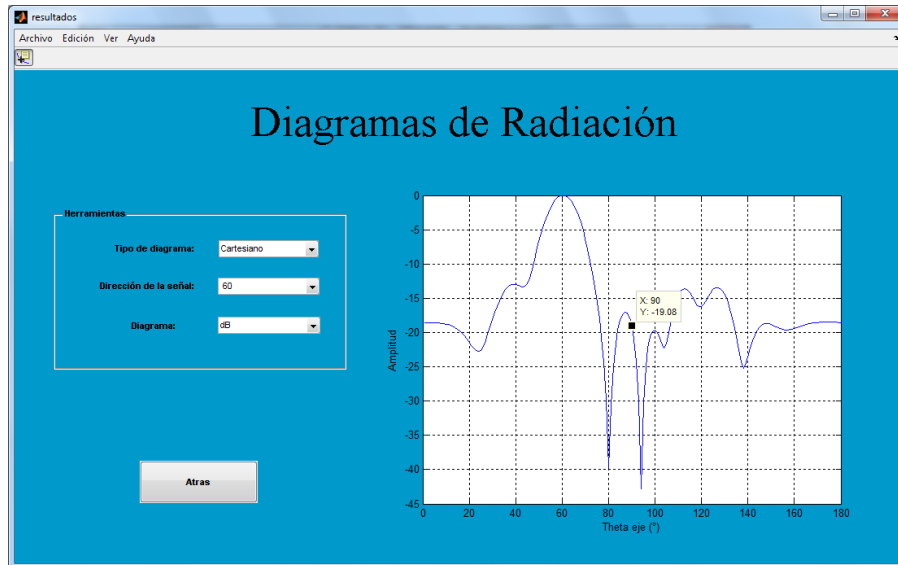


Figura 4.58: Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $90^\circ$ .

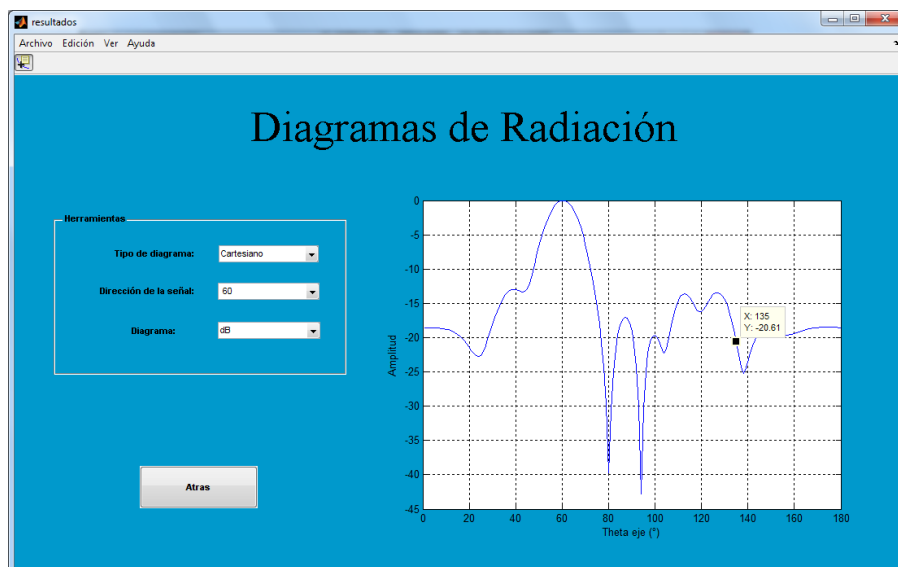


Figura 4.59: Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $135^\circ$ .



De las figuras 4.58 y 4.59 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 90°	-18 dB	-19.08 dB
Nivel en dirección 135°	-18 dB	-20.61 dB

Tabla 4.22: Nivel de las señales interferencias a la Señal 1.

**Señal 2:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 2.

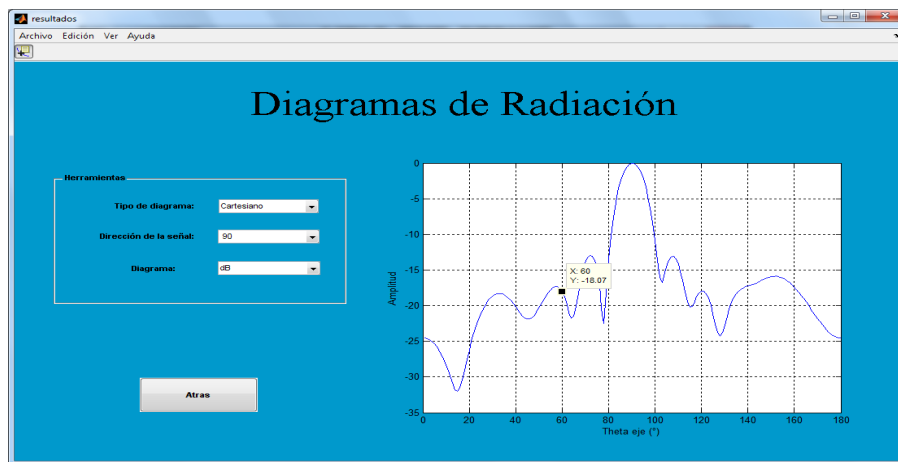


Figura 4.60: Diagrama de radiación a 90° con nivel de interferencia a 60°.

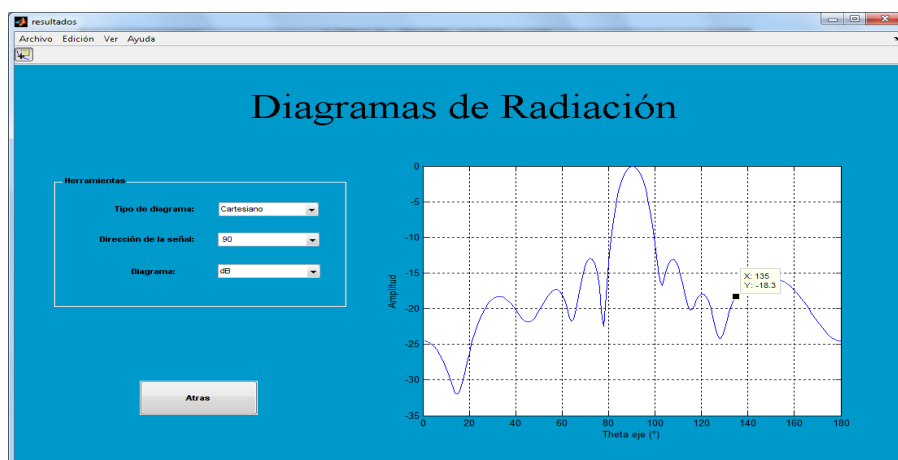


Figura 4.61: Diagrama de radiación a 90° con nivel de interferencia a 135°.

De las figuras 4.60 y 4.61 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-18.07 dB
Nivel en dirección 135°	-18 dB	-18.3 dB

Tabla 4.23: Nivel de las señales interferencias a la Señal 2.

### Señal 3:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 3.

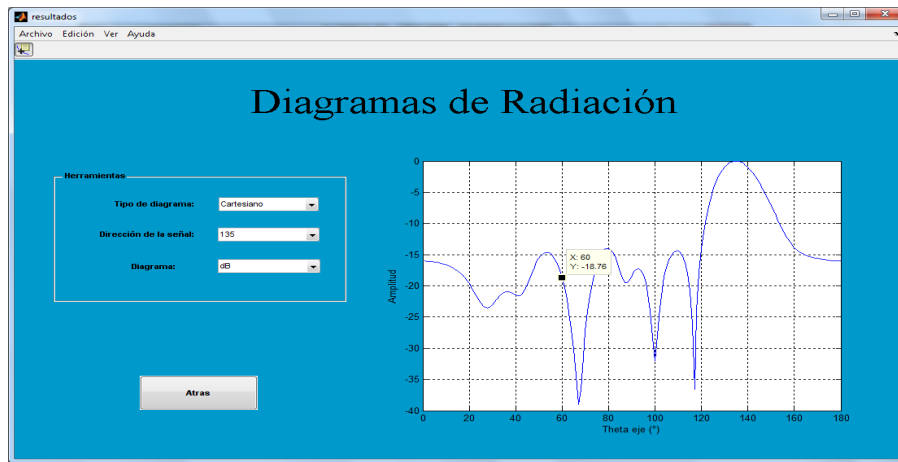


Figura 4.62: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 60°.

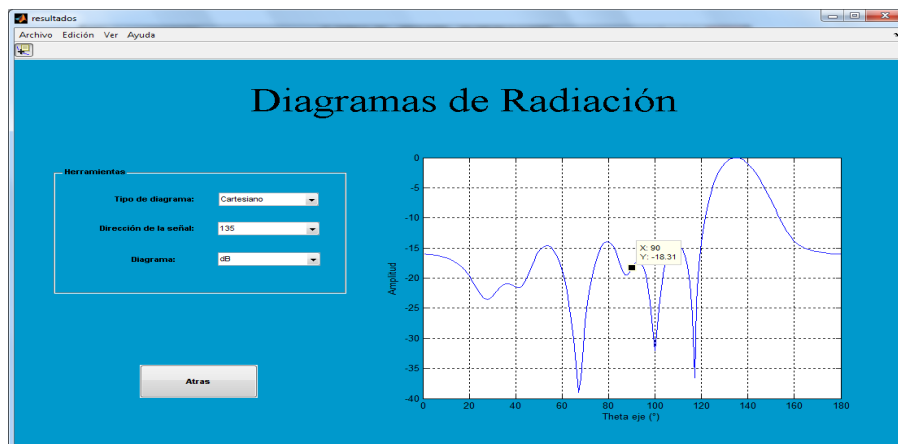


Figura 4.63: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 90°.

De las figuras 4.62 y 4.63 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 60°s	-18 dB	-18.76 dB
Nivel en dirección 90°	-18 dB	-18.31 dB

**Tabla 4.24:** Nivel de las señales interferencias a la Señal 3.

De acuerdo a los resultados reflejados en las tablas 4.22, 4.23 y 4.24, los niveles tanto de los lóbulos laterales, como de los nulos de radiación, están a nivel o por debajo de los niveles establecidos en el sistema que son de -12 dB para los lóbulos laterales y -18 dB para los nulos de radiación. Sin embargo como se pudo ver en las figuras a pesar de obtener niveles de lóbulos y nulos óptimos, los nulos no se ubican justo en las direcciones interferentes. Esto se debe a que se requiere una mayor cantidad de partículas o una mayor cantidad de iteraciones para garantizar así que las partículas converjan a 0 logrando obtener el mejor diagrama posible de acuerdo a las configuraciones del algoritmo. Sin embargo en dirección de las señales interferentes los niveles de radiación cumplen con los requerimientos del sistema.

#### 4.3.5. Prueba 5: Comportamiento del sistema cuando el costo de los nulos tiene mayor valor en la función costo.

Para esta prueba se dio un costo mayor a los nulos de radiación dentro de la función costo del algoritmo PSO. En otras palabras las partículas buscarán una solución de la función costo que estará centrada en buscar los nulos de radiación y ubicarlos en las direcciones de las señales interferentes, preocupándose de que estos cumplan con los niveles establecidos en la configuración del algoritmo.

Configuración del PSO	
<b>Parámetros Básicos</b>	
Número de iteraciones:	60
Número de partículas:	30
Atracción Individual (C1):	1
Atracción Social (C2):	1
Inercia (w):	0.8
<b>Rango de posiciones de las partículas</b>	
Alpha máximo:	1
Alpha mínimo:	0
Beta (°) máximo:	180
Beta (°) mínimo:	-180
<b>Función Costo</b>	
Nivel de Lóbulos Laterales (dB):	-12
Nivel de Nulos (dB):	-18
Costo del Lóbulo Principal:	20
Costo de los Lóbulos Laterales:	10
Costo de los Nulos:	30
<b>Velocidad máxima de las partículas</b>	
Alpha máximo:	0.075
Beta (°) máximo:	60

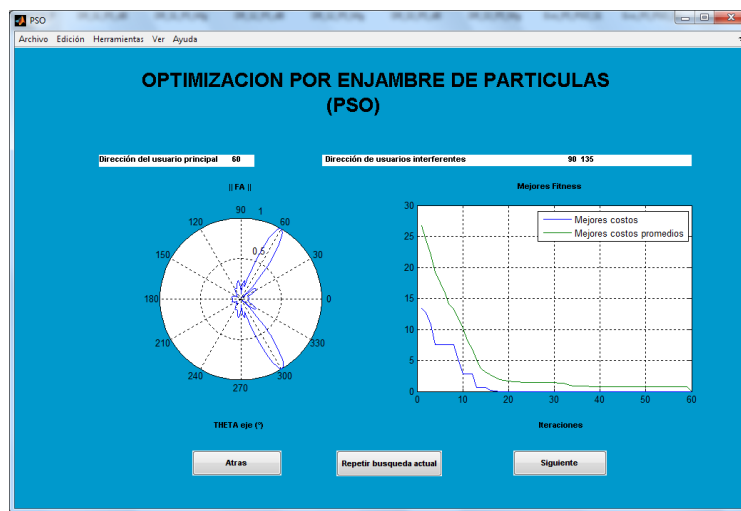
Buttons: Configuración predeterminada, Cancelar, Aceptar

**Figura 4.64:** Configuración de la función costo siendo el costo de los nulos de radiación mayor.

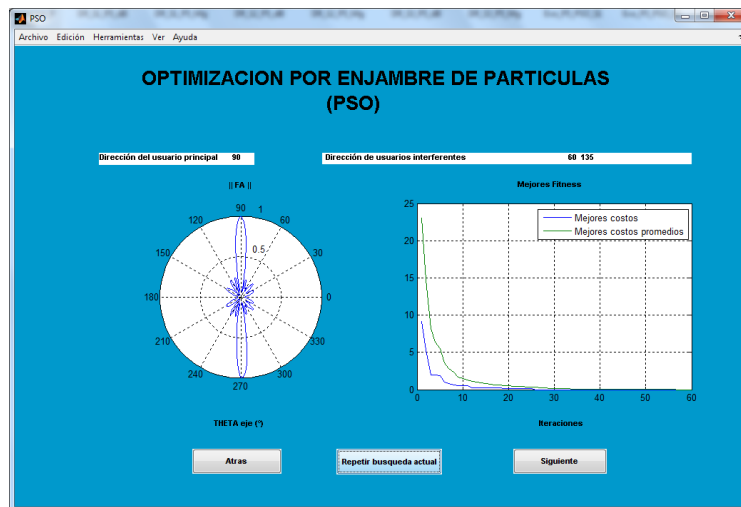
En la figura 4.64 se presenta la configuración del sistema para la etapa PSO, se observa que en la función costo los nulos de radiación tienen mayor peso que el haz principal y los lóbulos laterales, por lo cual de acuerdo a esa jerarquía el sistema basará su búsqueda en encontrar primero los nulos de radiación con niveles de -18 dB, y luego el haz principal y los lóbulos laterales de acuerdo a su peso dentro de la función costo.

**Evolución de las Señales:**

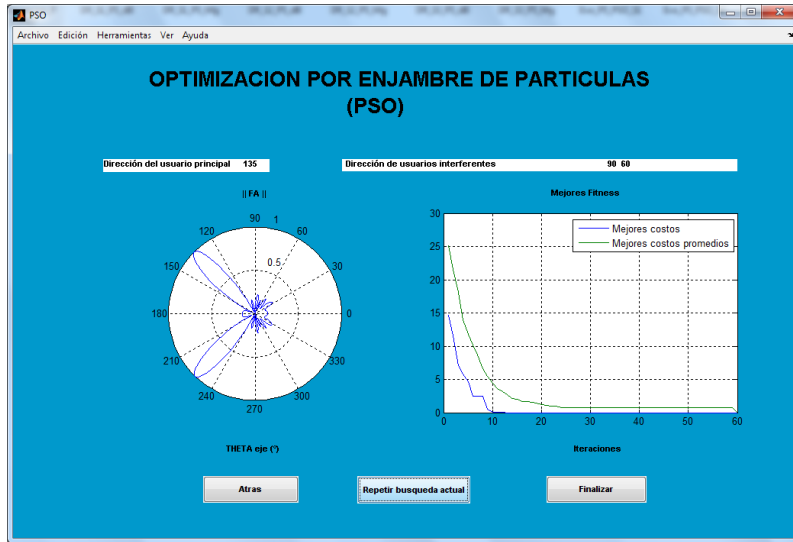
En las siguientes figuras se presenta la evolución de los diagramas de radiación de cada una de las señales, en los cuales el algoritmo PSO busca maximizar el diagrama en dirección de la señal de interés sin embargo para esta prueba el algoritmo PSO se centrara en buscar los nulos de radiación que se ubicaran en las direcciones de las señales interferentes.



**Figura 4.65:** Evolución del diagrama de radiación en dirección 60°.



**Figura 4.66:** Evolución del diagrama de radiación en dirección 90°.



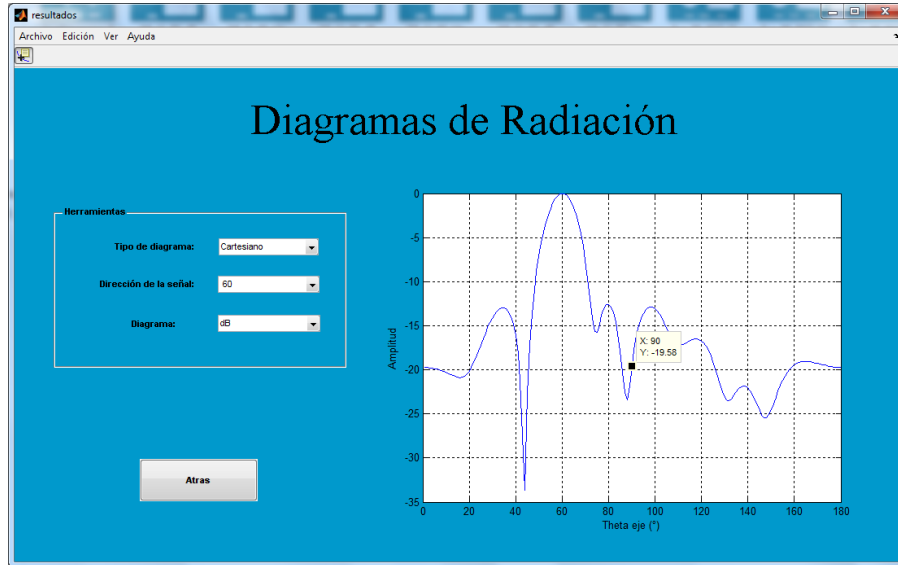
**Figura 4.67:** Evolución del diagrama de radiación en dirección  $135^{\circ}$ .

En las figuras 4.65, y 4.67 se observa que las partículas no convergen a 0 sin embargo convergen a un nivel cercano, lo que se puede considerar como un resultado aceptable. En la figura 4.66 específicamente se puede apreciar que la convergencia se logra alrededor a la iteración 40 llevando un tiempo de ejecución del algoritmo menor al tiempo de las demás resoluciones.

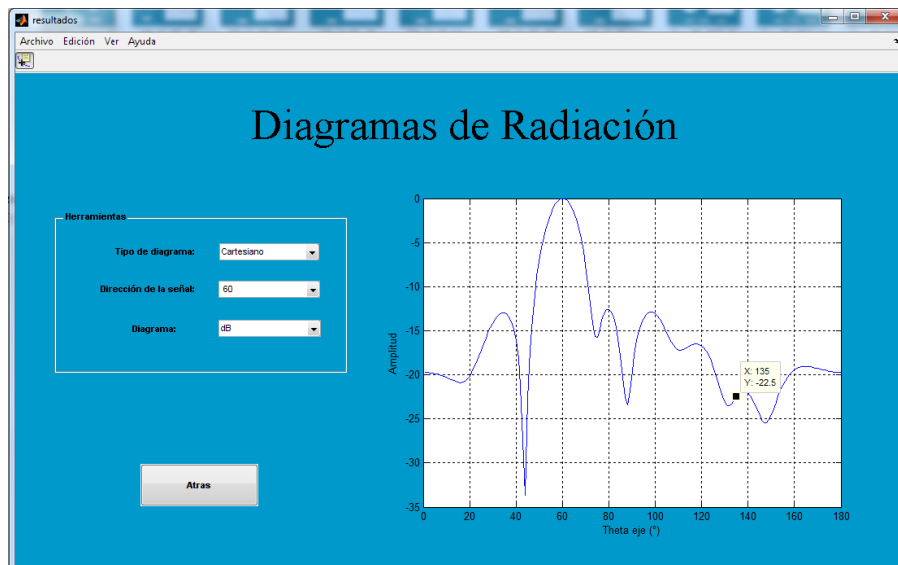
**Diagramas de Radiación del Sistema:**

**Señal 1:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 1.



**Figura 4.68:** Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $90^\circ$ .



**Figura 4.69:** Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $135^\circ$ .

De las figuras 4.68 y 4.69 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección $90^\circ$	-18 dB	-19.58 dB
Nivel en dirección $135^\circ$	-18 dB	-22.5 dB

Tabla 4.25: Nivel de las señales interferencias a la Señal 1.

### Señal 2:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 2.

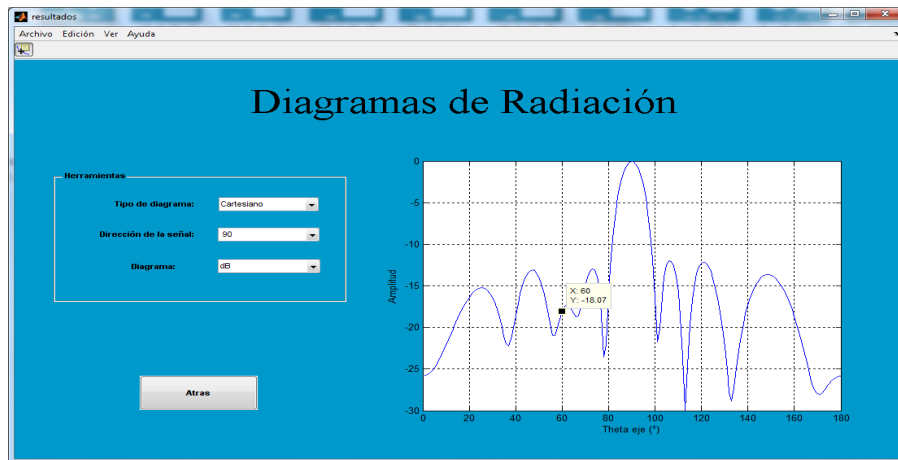


Figura 4.70: Diagrama de radiación a  $90^\circ$  con nivel de interferencia a  $60^\circ$ .

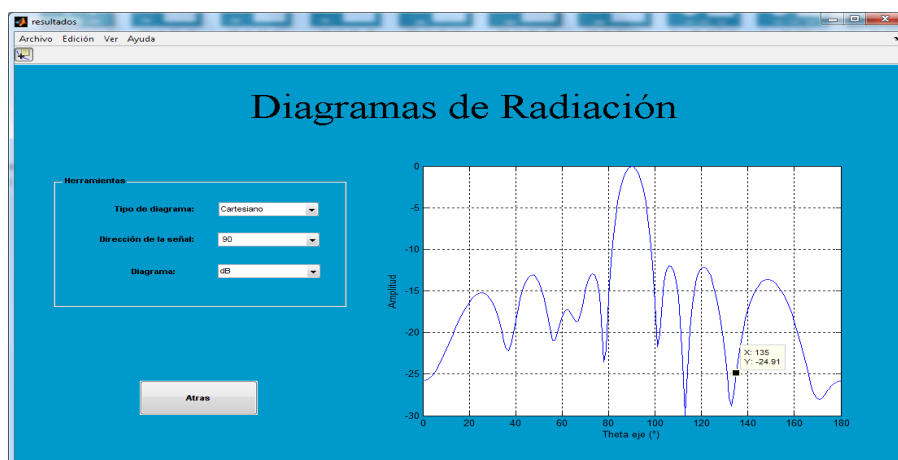


Figura 4.71: Diagrama de radiación a  $90^\circ$  con nivel de interferencia a  $135^\circ$ .



De las figuras 4.70 y 4.71 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-18.07 dB
Nivel en dirección 135°s	-18 dB	-24.1 dB

Tabla 4.26: Nivel de las señales interferencias a la Señal 2.

**Señal 3:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 3.

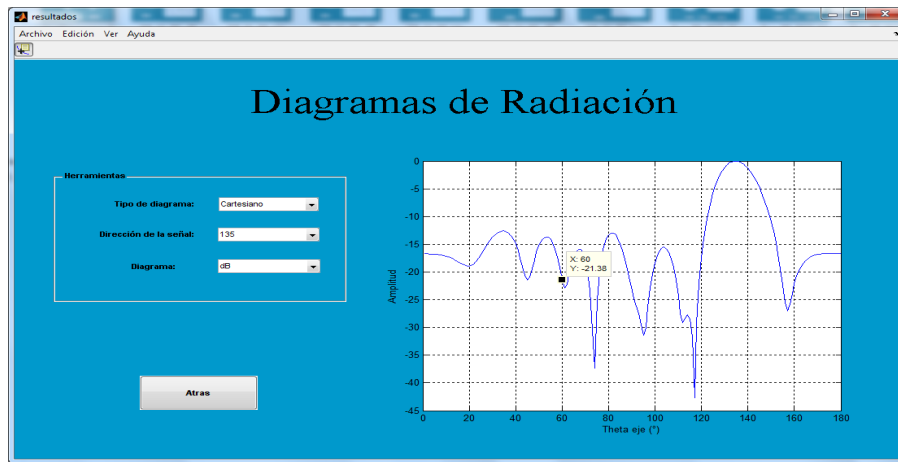


Figura 4.72: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 60°.

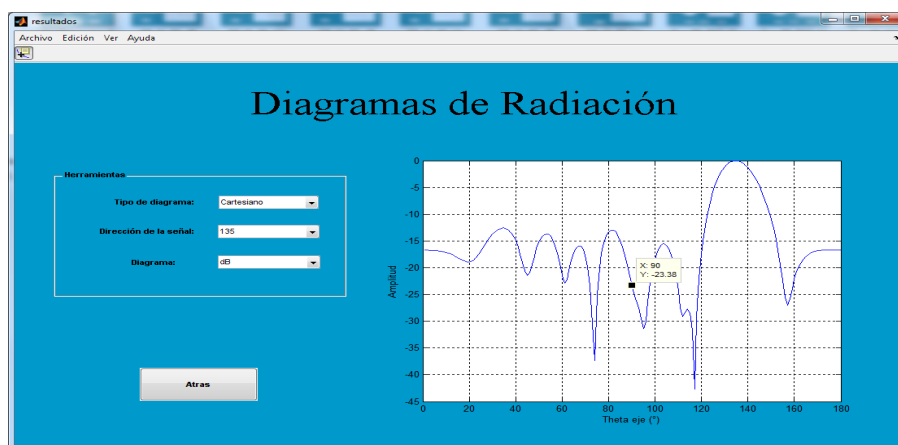


Figura 4.73: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 90°.

De las figuras 4.72 y 4.73 se obtiene:

<b>Dirección Interferente</b>	<b>Valor Esperado</b>	<b>Valor Obtenido</b>
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-21.38 dB
Nivel en dirección 90°	-18 dB	-23.38 dB

**Tabla 4.27:** Nivel de las señales interferencias a la Señal 3.

Observando las figuras de los distintos diagramas obtenidos podemos ver que los nulos de radiación no se encuentran ubicados exactamente en dirección de las señales interferentes al sistema sin embargo observando los resultados de las tablas 4.25, 4.26 y 4.27, podemos decir que en dirección de estas señales los niveles de radiación son muy bajos y cumplen con los niveles establecidos por el sistema, lo que garantizará que las señales no ingresen al sistema ya que serán atenuadas por el mismo.

#### 4.3.6. Prueba 6: Comportamiento del sistema cuando el costo del haz principal, los lóbulos laterales y los nulos de radiación es el mismo.

Para esta prueba se dio el mismo costo a el haz principal, a los lóbulos laterales y a los nulos de radiación dentro de la función costo del algoritmo PSO. En otras palabras las partículas le darán igual importancia en su búsqueda al haz principal, a los lóbulos laterales y a los nulos de radiación, donde se preocuparan por dar al lóbulo principal la mayor dirección posible hacia la señal de interés, buscaran que los niveles de los lóbulos laterales sean bajos y a su vez buscaran centrar los nulos en dirección de las señales interferentes.



Figura 4.74: Configuración de la función costo siendo el costo de los nulos de radiación mayor.

En la figura 4.74 se presenta la configuración del sistema para la etapa PSO.

### Evolución de las Señales:

En las siguientes figuras se presenta la evolución de los diagramas de radiación de cada una de las señales, en los cuales el algoritmo PSO buscara maximizar el diagrama en dirección de la señal de interés y anular las señales interferentes ya sea por medio de nulos de radiación o por medio de lóbulos laterales de niveles bajos.

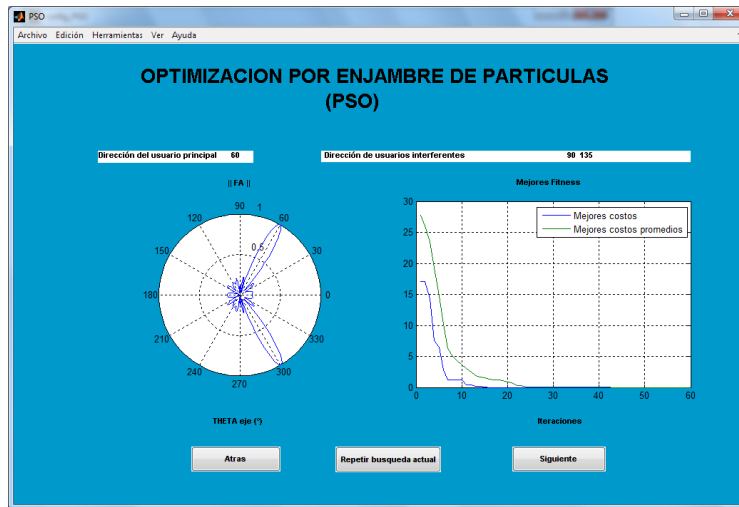


Figura 4.75: Evolución del diagrama de radiación en dirección 60°.

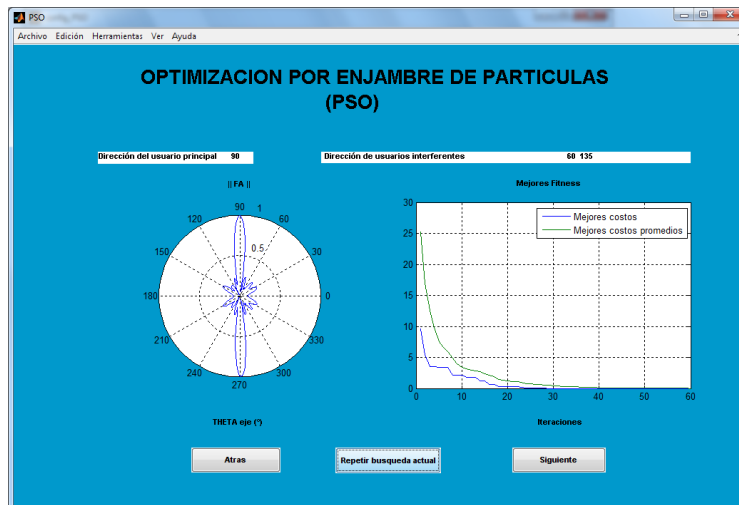


Figura 4.76: Evolución del diagrama de radiación en dirección 90°.

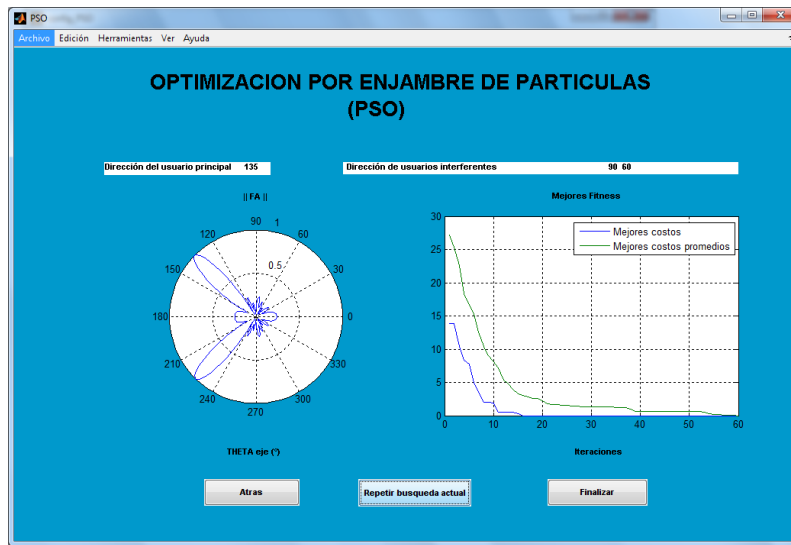


Figura 4.77: Evolución del diagrama de radiación en dirección 135°.

En las figuras 4.75, 4.76 y 4.77, se observa que todas las partículas convergen a 0 encontrando la mejor solución que satisface la función fitness, pero en la figura 4.77 específicamente se puede apreciar que la convergencia se logra llegando a la iteración 60 llevando un tiempo de ejecución del algoritmo mayor al tiempo de las demás resoluciones.

### Diagramas de Radiación del Sistema:

#### Señal 1:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 1.

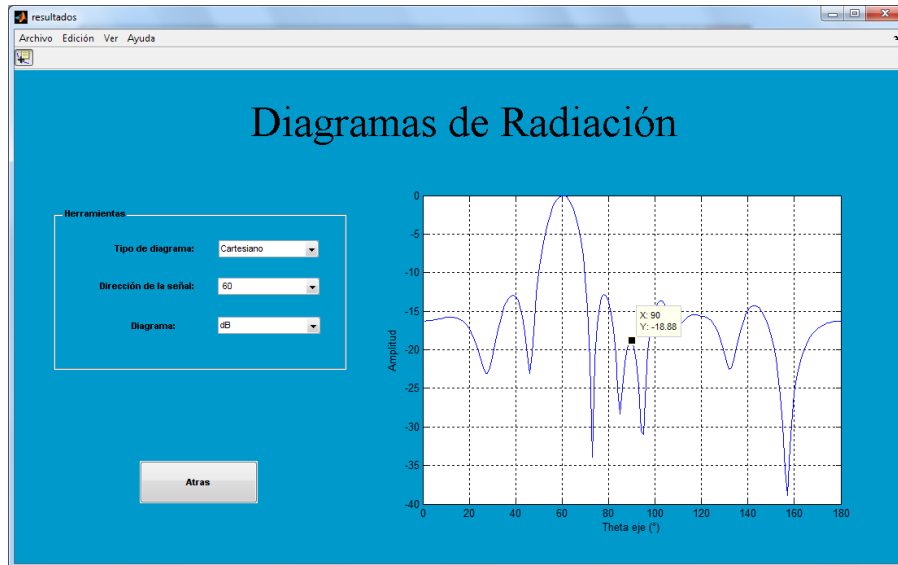


Figura 4.78: Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $90^\circ$ .

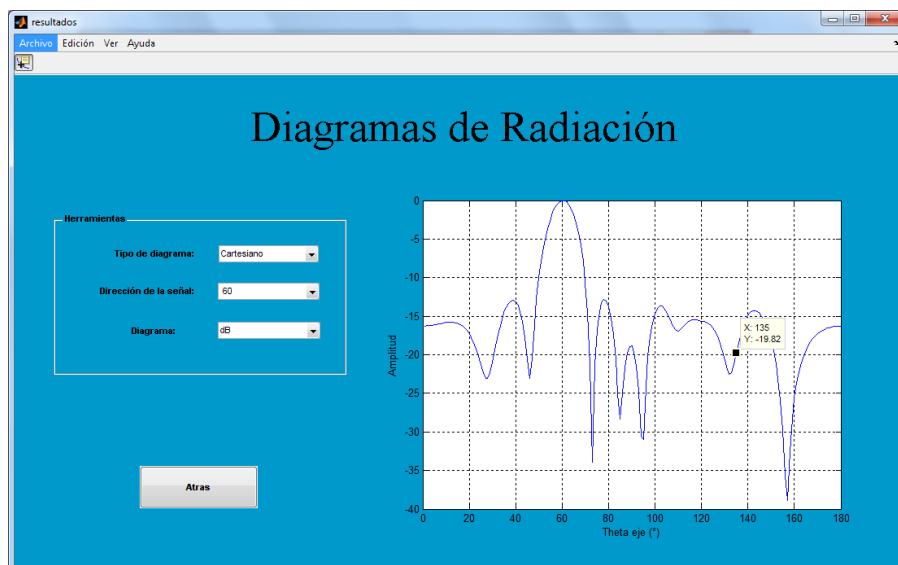


Figura 4.79: Diagrama de radiación a  $60^\circ$  con nivel de interferencia a  $135^\circ$ .

De las figuras 4.78 y 4.79 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 90°s	-18 dB	-18.88 dB
Nivel en dirección 135°o	-18 dB	-19.82 dB

Tabla 4.28: Nivel de las señales interferencias a la Señal 1.

**Señal 2:**

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 2.

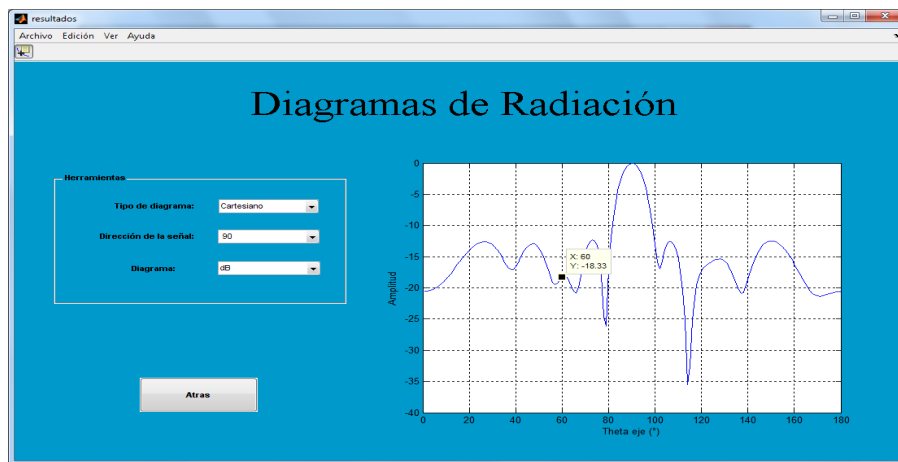


Figura 4.80: Diagrama de radiación a 90° con nivel de interferencia a 60°.

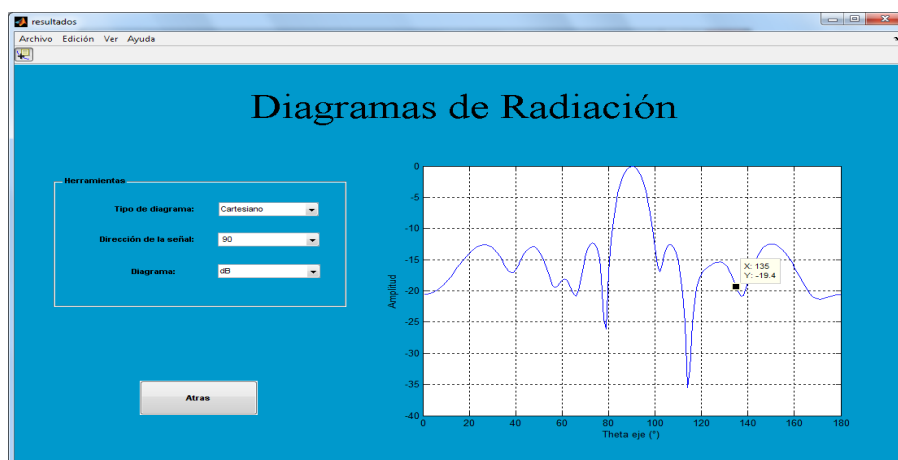


Figura 4.81: Diagrama de radiación a 90° con nivel de interferencia a 135°.

De las figuras 4.80 y 4.81 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección 60°	-18 dB	-18.33 dB
Nivel en dirección 135°	-18 dB	-19.4 dB

Tabla 4.29: Nivel de las señales interferencias a la Señal 2.

### Señal 3:

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de radiación obtenidos en dirección de la Señal 3.

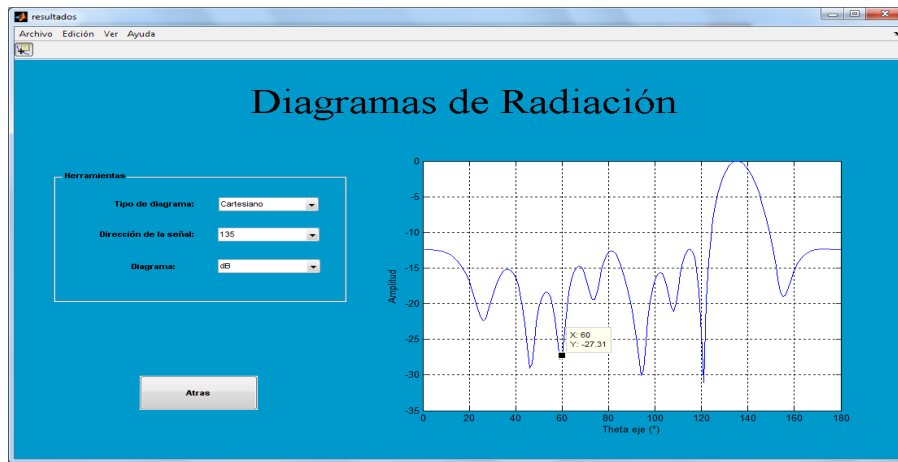


Figura 4.82: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 60°.

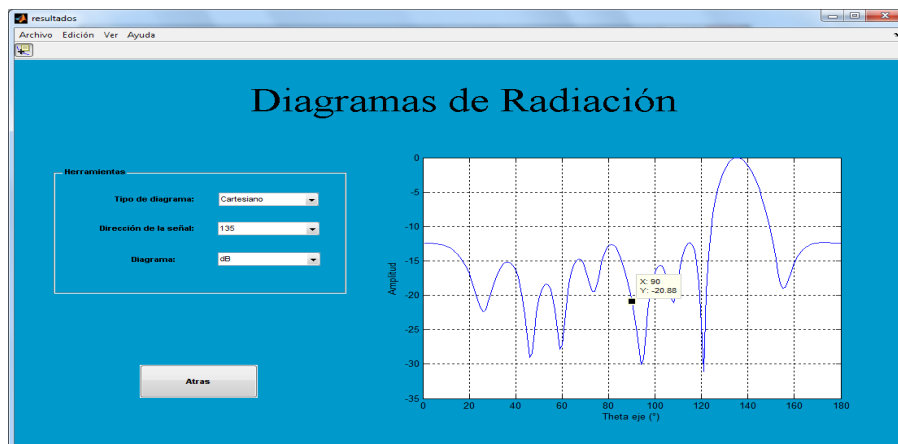


Figura 4.83: Diagrama de radiación a 135° con nivel de interferencia a 90°.



De las figuras 4.82 y 4.83 se obtiene:

Dirección Interferente	Valor Esperado	Valor Obtenido
Nivel en dirección $60^\circ$	-18 dB	-27.31 dB
Nivel en dirección $90^\circ$	-18 dB	-20.88 dB

**Tabla 4.30:** Nivel de las señales interferencias a la Señal 3.

En la tabla 4.28 se observa que los niveles obtenidos tanto de lóbulos laterales como de nulos son óptimos ya que los mismos cumplen con los valores esperados, por otro lado en las figuras 4.78 y 4.79 se aprecia que los nulos de radiación no se ubican en la dirección de las señales interferentes sin embargo en dichas direcciones se ubican lóbulos laterales a niveles bajos lo cual disminuye la interferencia de las señales.

Los resultados obtenidos en la tabla 4.29 reflejan que en dirección de las señales interferentes los niveles cumplen con lo establecido, sin embargo a pesar de que en la figura 4.76 se observa que las partículas convergen, observando las figuras 4.80 y 4.81 el resultado obtenido no es del todo óptimo debido a que los niveles de los lóbulos laterales y los nulos son más altos que los niveles establecidos en el sistema, por lo cual cualquier otra señal interferente podría entrar por estos lóbulos laterales afectando a la señal de interés para el sistema que en este caso se ubica a  $90^\circ$ .

En el caso de la señal 3, la tabla 4.30 refleja que los niveles obtenidos fueron bastante aceptables ubicándose a la par de los niveles establecidos, y en la figura 4.82 se observa que las señales interferentes ubicadas a  $60^\circ$  y  $90^\circ$  entran dentro de un nulo de radiación y de un lóbulo lateral de bajo nivel respectivamente. Por otro lado el haz principal de radiación no queda ubicado a  $135^\circ$  sin embargo su ubicación es bastante cercana a la señal de interés, por lo cual la misma entrara por el lóbulo principal dentro de un nivel de potencia alto.

#### 4.4. Evaluación en el programa EZNEC.

En esta sección se realizara un estudio, en la cual se utilizara el programa EZNEC como herramienta de evaluación de los resultados obtenidos en el programa. EZNEC permite evaluar un arreglo de antenas pudiendo estudiar su comportamiento de acuerdo a la alimentación que se le suministre a los elementos del arreglo establecido, entre las bondades que permite este programa se pueden estudiar tanto el diagrama de radiación, como las impedancias de entradas de los elementos del arreglo, por lo cual se tomaran los resultados obtenidos del programa desarrollado en este trabajo de grado y dichos resultados se evaluaran en EZNEC. Los resultados presentados serán los pesos de los elementos de antenas del arreglo, dichos pesos se utilizaran como variables de entrada al programa EZNEC.

En la figura 4.84 se puede observar la configuración del arreglo de antenas utilizada para la prueba.

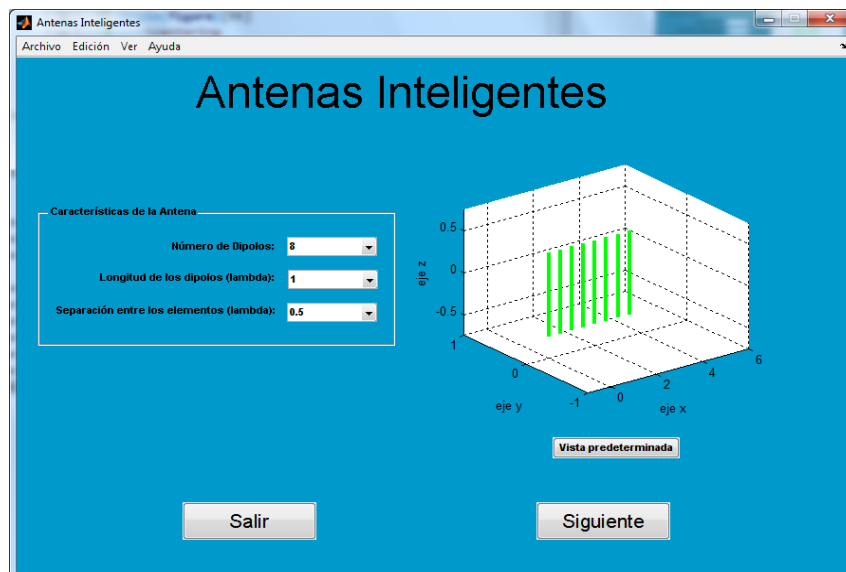


Figura 4.84: Configuración del arreglo de antenas.

Para el estudio se tomo la siguiente configuración para la etapa de detección DoA.

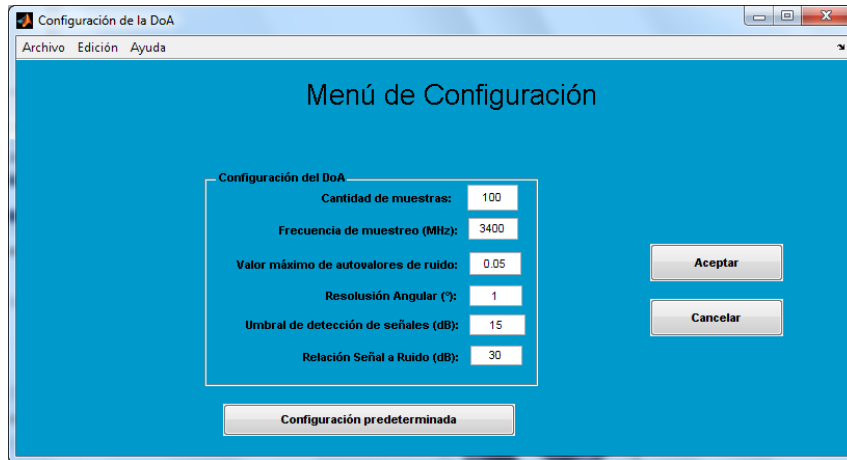


Figura 4.85: Configuración de la Etapa DoA.

En las figuras 4.86 y 4.87 se presentan las señales utilizadas para el estudio, una modulada a 8-QAM y otra en modulación 16-QAM.

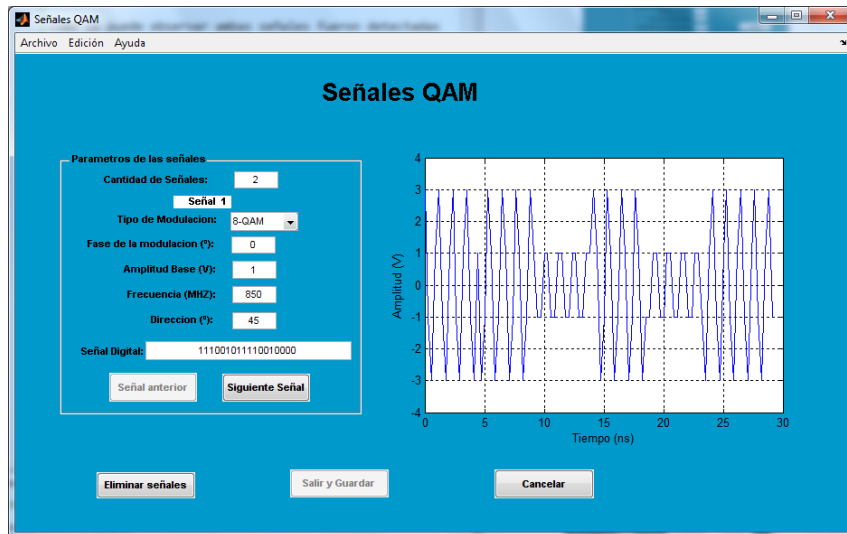


Figura 4.86: Señal 1 en el plano XY a 45° del eje del arreglo.

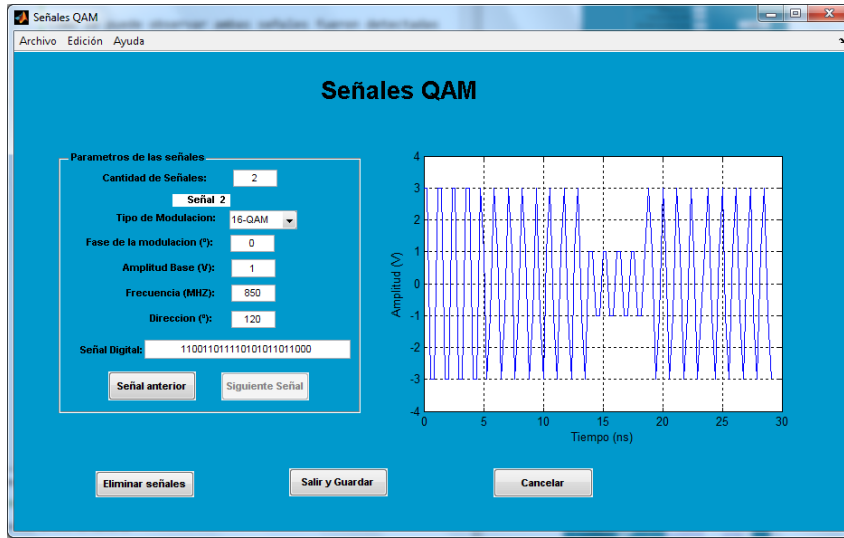


Figura 4.87: Señal 2 en el plano XY a  $120^\circ$  del eje del arreglo.

Los resultados obtenidos de la etapa DoA se pueden observar en la imagen 4.88.

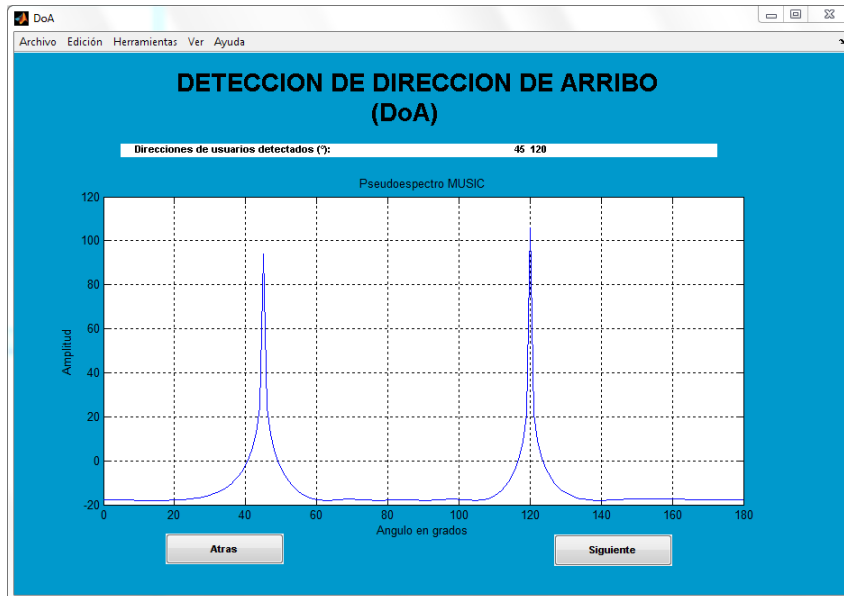


Figura 4.88: Señal 2 en el plano XY a  $120^\circ$  del eje del arreglo.

Como se puede observar ambas señales fueron detectadas en su posición angular con exactitud.

Para la etapa se utilizó la siguiente configuración del algoritmo:



The image shows a software window titled "Configuración del PSO" with a menu bar containing "Archivo", "Edición", and "Ayuda". The main area is titled "Menú de Configuración" and contains several parameter groups:

- Configuración del PSO**
  - Parámetros Básicos**
    - Número de iteraciones: 80
    - Número de partículas: 40
    - Atracción Individual (C1): 1
    - Atracción Social (C2): 1
    - Inercia (w): 0.8
  - Rango de posiciones de las partículas**
    - Alpha máximo: 1
    - Alpha mínimo: 0
    - Beta (°) máximo: 180
    - Beta (°) mínimo: -180
  - Función Costo**
    - Nivel de Lóbulos Laterales (dB): -13
    - Nivel de Nulos (dB): -20
    - Costo del Lóbulo Principal: 30
    - Costo de los Lóbulos Laterales: 20
    - Costo de los Nulos: 10
  - Velocidad máxima de las partículas**
    - Alpha máximo: 0.075
    - Beta (°) máximo: 60

At the bottom of the window are three buttons: "Configuración predeterminada", "Cancelar", and "Aceptar".

Figura 4.89: Configuración del algoritmo PSO.

De acuerdo a la configuración presentada en la figura 4.89, las partículas se centraron en la búsqueda de los pesos de tal forma de que estos cumplan con los requerimientos del sistema, donde se busca ubicar el haz principal del patrón de radiación en dirección de la señal de interés, y a su vez se busca lograr niveles de lóbulos laterales ubicados en alrededor de los -13 dB y nulos de radiación en dirección de las señales interferentes.

En las figuras 4.90 y 4.91 se observa la evolución de las partículas después de concluidas las 80 iteraciones.

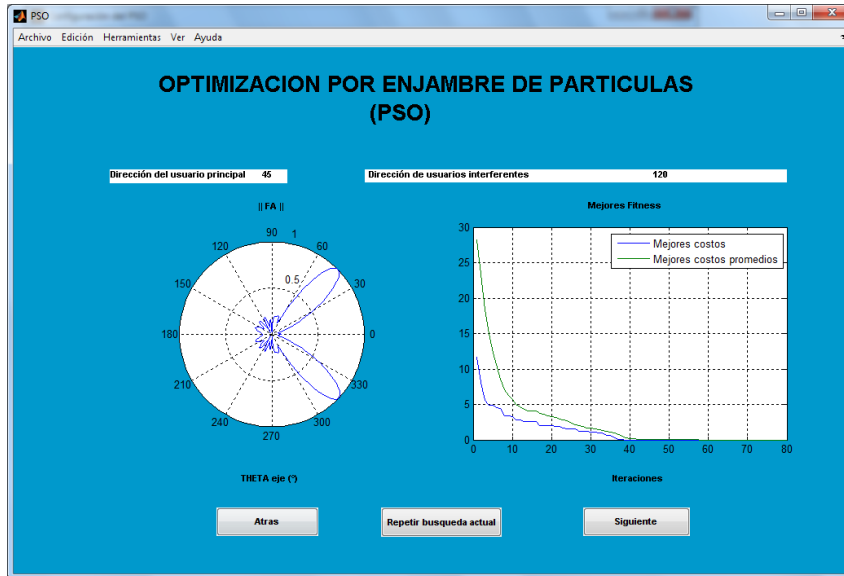


Figura 4.90: Evolución de las partículas en dirección a 45°.

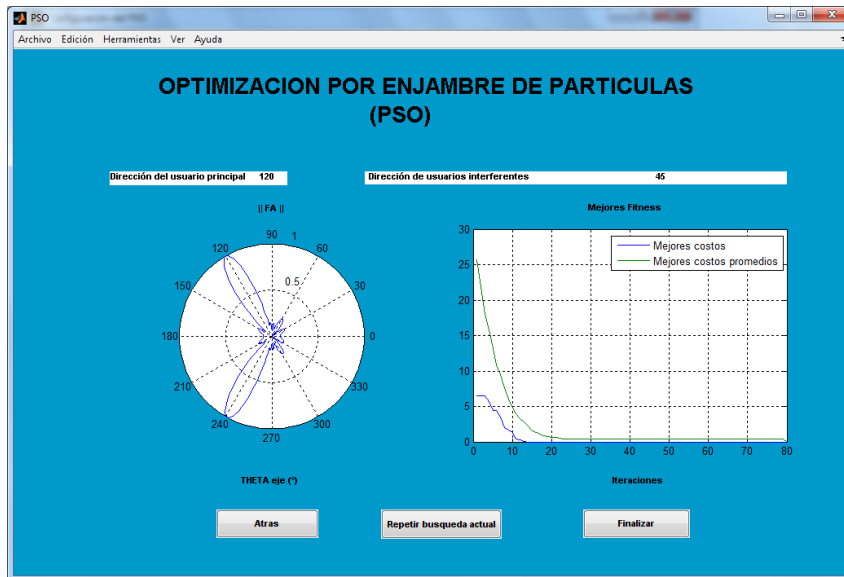


Figura 4.91: Evolución de las partículas en dirección a 120°.

Observando las figuras 4.90 y 4.91 se observa que las partículas convergen en su totalidad, lo que indica que alcanzaron el resultado mas optimo posible.

### 4.4.1. Pesos del Sistema.

En las siguientes figuras se presentan los pesos que alimentan cada uno de los elementos de antenas, obtenidos mediante el algoritmo PSO en dirección a  $45^\circ$  del eje del arreglo.

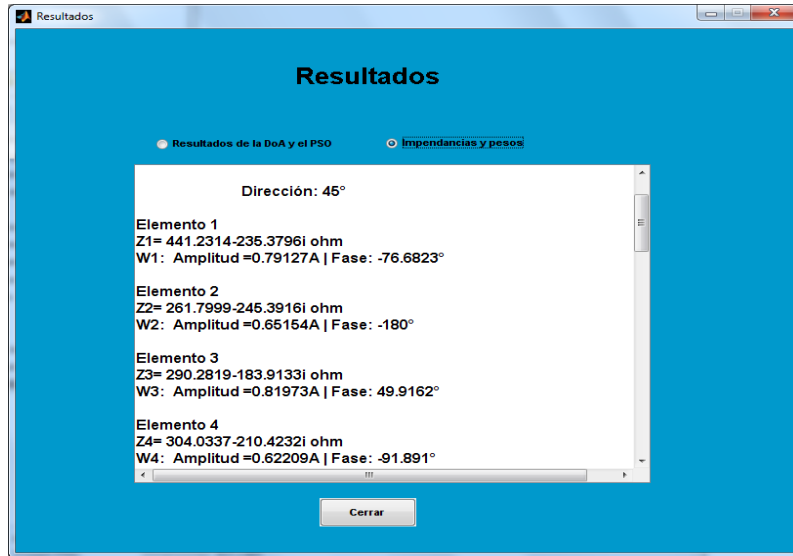


Figura 4.92: Pesos de los elementos de antena en dirección a  $45^\circ$ .

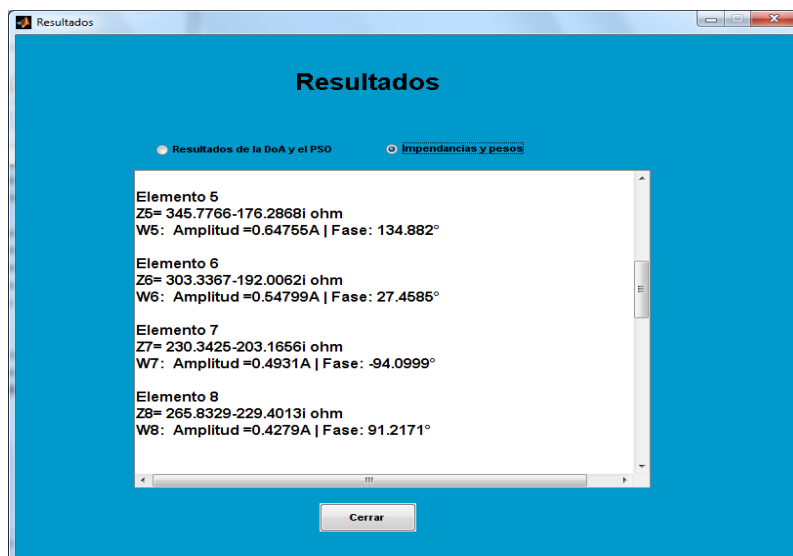


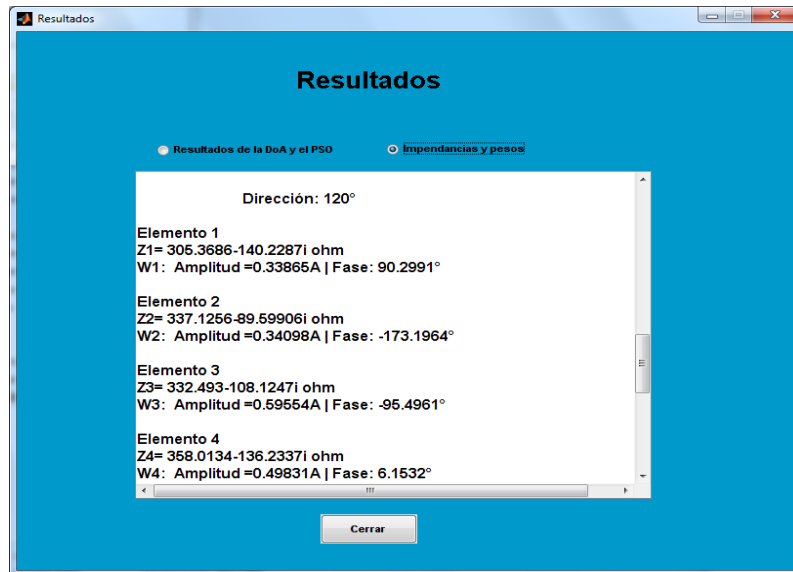
Figura 4.93: Pesos de los elementos de antena en dirección a  $45^\circ$ .

En la tabla 4.31 se presentan los pesos obtenidos para el diagrama de radiación en dirección a  $45^\circ$ .

Elemento	Modulo (A)	Fase ( $^\circ$ )
Elemento 1	0.79127	-76.6823
Elemento 2	0.65154	-180
Elemento 3	0.81973	49.9162
Elemento 4	0.62209	-91.891
Elemento 5	0.64755	134.882
Elemento 6	0.54799	27.4585
Elemento 7	0.4931	-94.0999
Elemento 8	0.4279	91.2171

**Tabla 4.31:** Modulos y Fases de los pesos de los elementos de antena en dirección a  $45^\circ$ .

En las siguientes figuras se presentan los pesos que alimentan cada uno de los elementos de antenas, obtenidos mediante el algoritmo PSO en dirección a  $120^\circ$  del eje del arreglo.



**Figura 4.94:** Pesos de los elementos de antena en dirección a  $120^\circ$ .



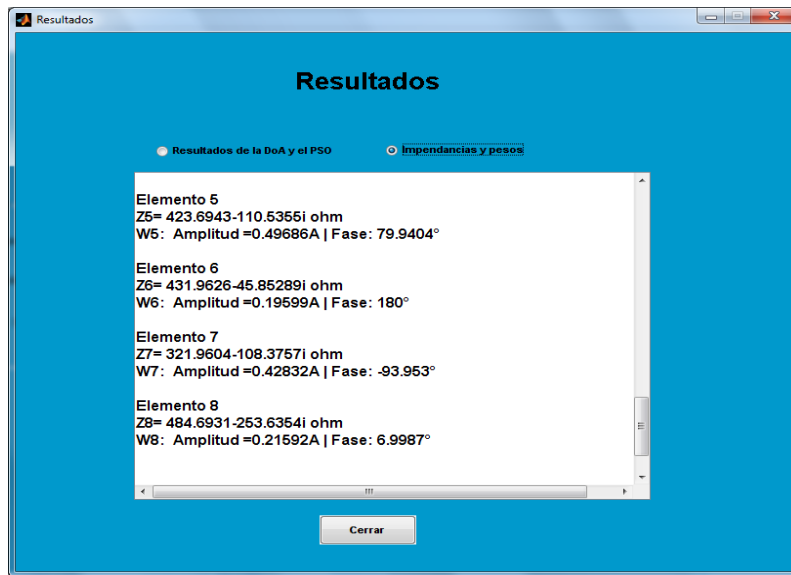


Figura 4.95: Pesos de los elementos de antena en dirección a 120°.

En la tabla 4.32 se presentan los pesos obtenidos para el diagrama de radiación en dirección a 120°.

Elemento	Modulo (A)	Fase (°)
Elemento 1	0.33865	90.2991
Elemento 2	0.34098	-173.1964
Elemento 3	0.59554	-95.4961
Elemento 4	0.49831	6.1532
Elemento 5	0.49686	79.9404
Elemento 6	0.19599	180
Elemento 7	0.42832	-93.953
Elemento 8	0.21592	6.9987

Tabla 4.32: Módulos y Fases de los pesos de los elementos de antena en dirección a 120°.

#### 4.4.2. Diagramas de Radiación.

En las figuras se muestran los diagramas de radiación obtenidos por el sistema.

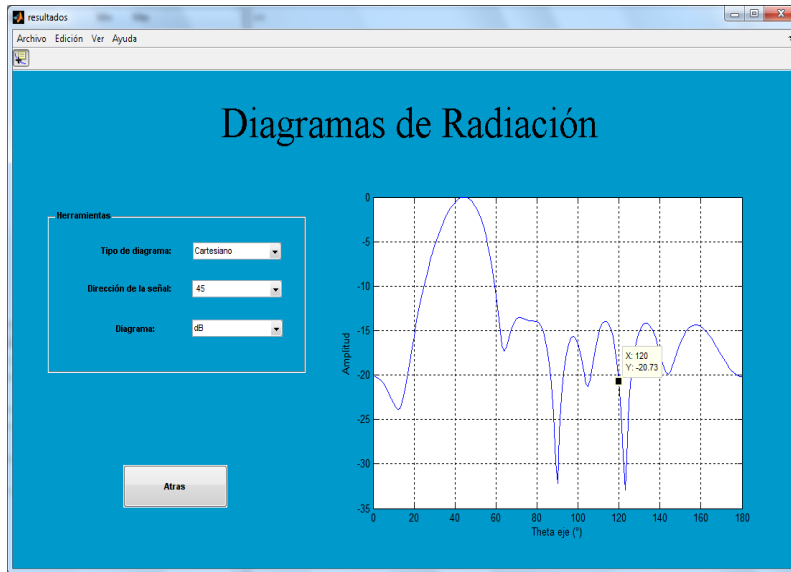


Figura 4.96: Pesos de los elementos de antena para máxima radiación a  $45^\circ$ .

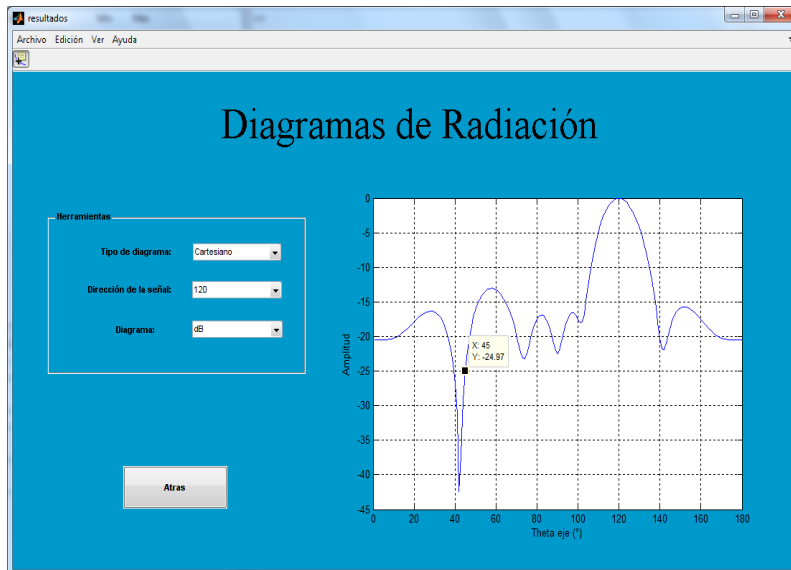


Figura 4.97: Pesos de los elementos de antena para máxima radiación a  $120^\circ$ .

Dirección	Nivel (dB)
120°	-20.73
45°	-24.97

**Tabla 4.33:** Nivel de las señales Interferentes.

Observando las figuras 4.96 y 4.97 se observa que en ambos casos el haz de radiación principal del patrón apunta en dirección de la señal de interés a 45° y 120° respectivamente, sin embargo las señales interferentes no se encuentran en nulos de radiación. Por otro lado en la tabla 4.33 se presentan los niveles en los cuales se encuentran las señales interferentes dentro de los patrones de radiación, como se ve en dirección a 45° la señal interferente ubicada a 120° se ubica a -20,73dB y para el caso de la dirección a 120° la señal interferente a 45° se ubica en -24,97dB, como se aprecia ambas señales se encuentran a niveles mas bajos que el nivel de referencia establecido en el sistema el cual para los nulos se ubica a -20dB.

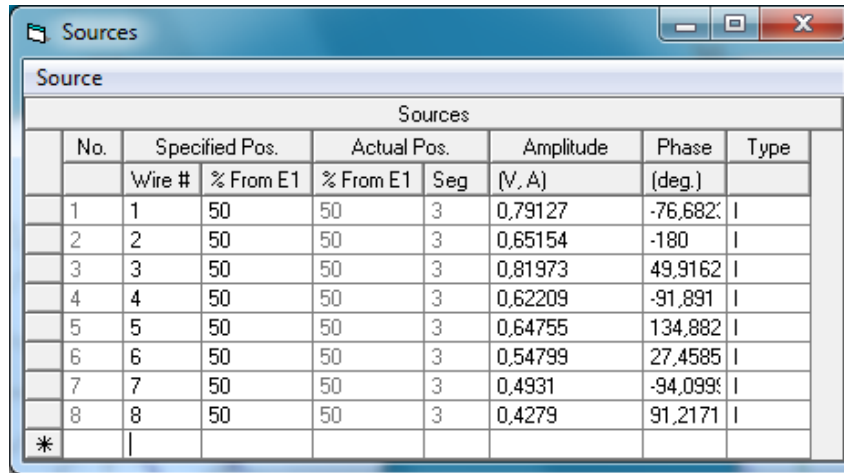
#### 4.4.3. Comprobación de resultados obtenidos en EZNEC.

Para realizar las pruebas en Eznec se utilizó la misma configuración para el arreglo de antenas como se observa en la figura 4.98.

Wires											
No.	End 1				End 2				Diameter [wl]	Segs	
	X (wl)	Y (wl)	Z (wl)	Conn	X (wl)	Y (wl)	Z (wl)	Conn			
1	0	0	-0.5		0	0	0.5		0.05	5	
2	0.5	0	-0.5		0.5	0	0.5		0.05	5	
3	1	0	-0.5		1	0	0.5		0.05	5	
4	1.5	0	-0.5		1.5	0	0.5		0.05	5	
5	2	0	-0.5		2	0	0.5		0.05	5	
6	2.5	0	-0.5		2.5	0	0.5		0.05	5	
7	3	0	-0.5		3	0	0.5		0.05	5	
8	3.5	0	-0.5		3.5	0	0.5		0.05	5	
*											

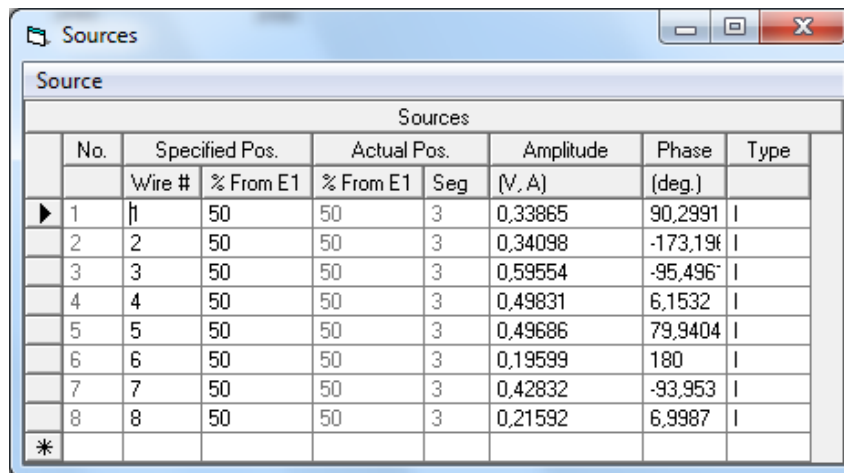
**Figura 4.98:** Configuración del Arreglo de Antenas.

Para realizar las simulaciones se alimentaron los elementos de antena utilizando las alimentaciones obtenidas en las tablas 4.31 y 4.32. En las figuras podemos ver las alimentaciones de los elementos para la configuración de radiación a  $45^\circ$  y  $120^\circ$  respectivamente.



Sources							
No.	Specified Pos.		Actual Pos.		Amplitude (V, A)	Phase (deg.)	Type
	Wire #	% From E1	% From E1	Seg			
1	1	50	50	3	0,79127	-76,682	I
2	2	50	50	3	0,65154	-180	I
3	3	50	50	3	0,81973	49,9162	I
4	4	50	50	3	0,62209	-91,891	I
5	5	50	50	3	0,64755	134,882	I
6	6	50	50	3	0,54799	27,4585	I
7	7	50	50	3	0,4931	-94,099	I
8	8	50	50	3	0,4279	91,2171	I
*							

**Figura 4.99:** Alimentación de los elementos de antenas con maxima radiación a  $45^\circ$ .



Sources							
No.	Specified Pos.		Actual Pos.		Amplitude (V, A)	Phase (deg.)	Type
	Wire #	% From E1	% From E1	Seg			
1	1	50	50	3	0,33865	90,2991	I
2	2	50	50	3	0,34098	-173,19	I
3	3	50	50	3	0,59554	-95,496	I
4	4	50	50	3	0,49831	6,1532	I
5	5	50	50	3	0,49686	79,9404	I
6	6	50	50	3	0,19599	180	I
7	7	50	50	3	0,42832	-93,953	I
8	8	50	50	3	0,21592	6,9987	I
*							

**Figura 4.100:** Alimentación de los elementos de antenas con maxima radiación a  $120^\circ$ .

### 4.4.3.1. Diagramas de Radiación

Diagrama a 45°.

En las figuras 4.101 y 4.102 se observan los patrones de radiación correspondientes al patrón de radiación en dirección 45°.

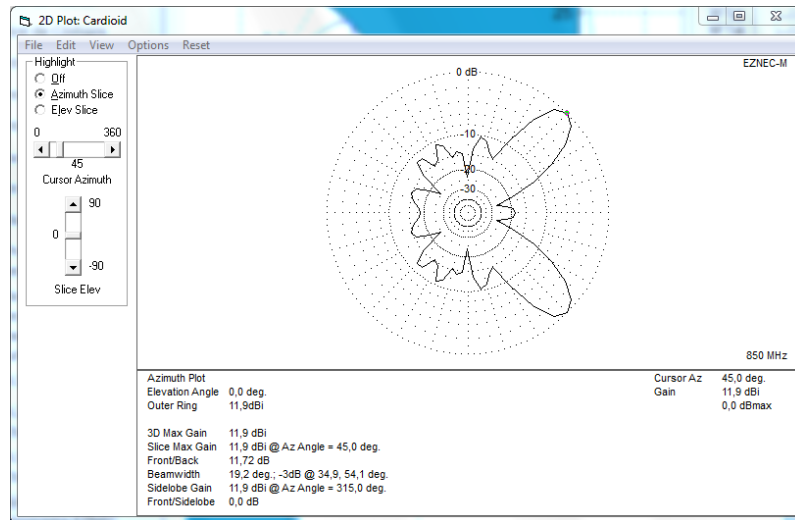


Figura 4.101: Ganancia del Haz Principal en dirección de máxima radiación a 45°.

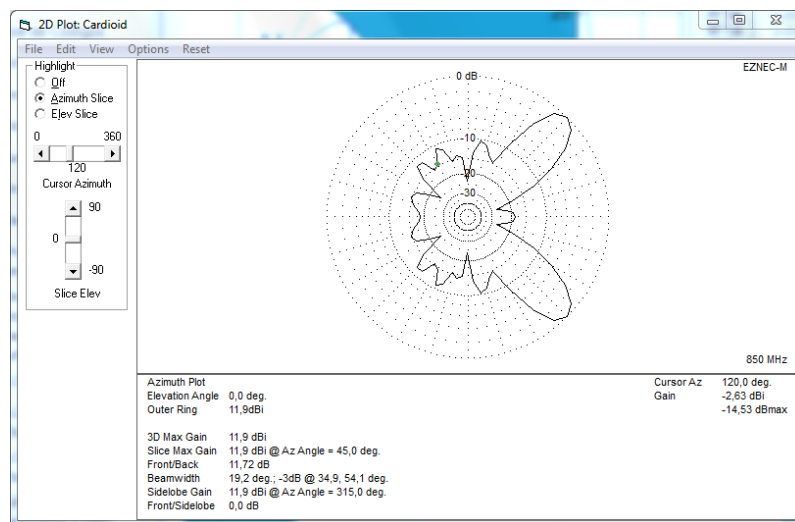
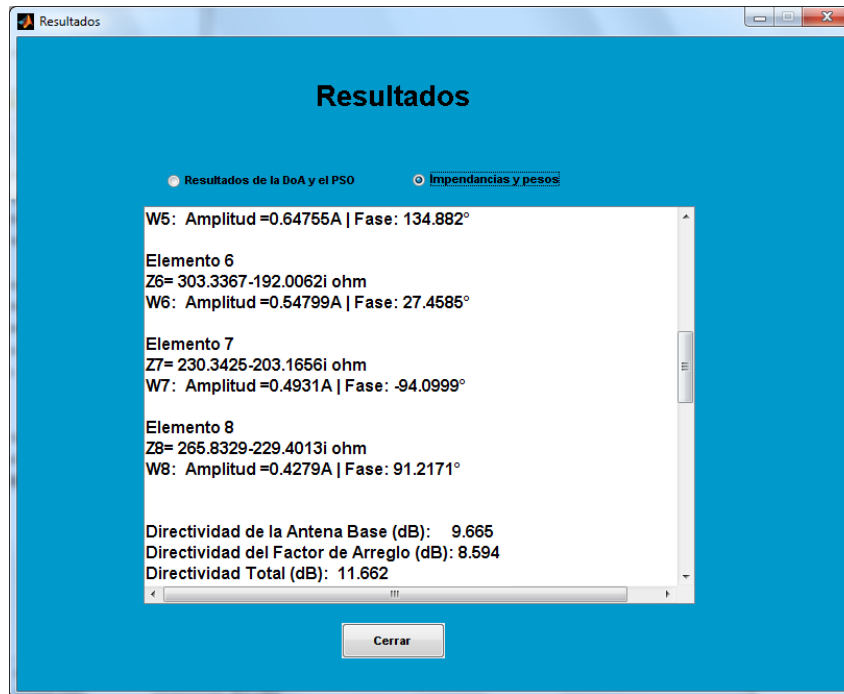


Figura 4.102: Nivel de la señal interferente a 120°, en dirección de máxima radiación a 45°.

En la figura 4.103 se observa la directividad obtenida en el sistema para dirección de máxima radiación a  $45^\circ$ .



**Figura 4.103:** Nivel de la señal interferente a  $120^\circ$ , en dirección de máxima radiación a  $45^\circ$ .

Dirección	Directividad Obtenida	Ganancia EZNEC
Haz Principal ( $45^\circ$ )	11.662 dB	11.9 dB
Señal Interferente ( $120^\circ$ )	-20.73 dB	-14.53 dB

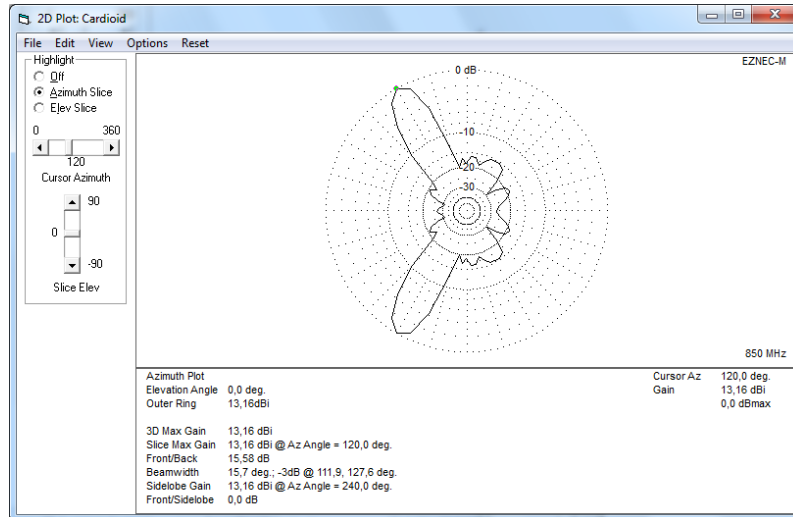
**Tabla 4.34:** Nivel de las señales Interferentes.

De los resultados de la tabla 4.34 se observa que el nivel en (dB) obtenido del haz principal en este caso en dirección a  $45^\circ$  comparado con los resultados del diagrama de EZNEC y observando la forma de los mismos, indica que el patrón de radiación obtenido mediante los pesos hallados por el algoritmo PSO cumple con los requisitos, logrando un haz de radiación ajustado en dirección de la señal de interés y un nivel de radiación aceptable. Por otro lado comparado el nivel obtenido en dirección de la señal interferente en este caso a  $120^\circ$ , se observa que ambos

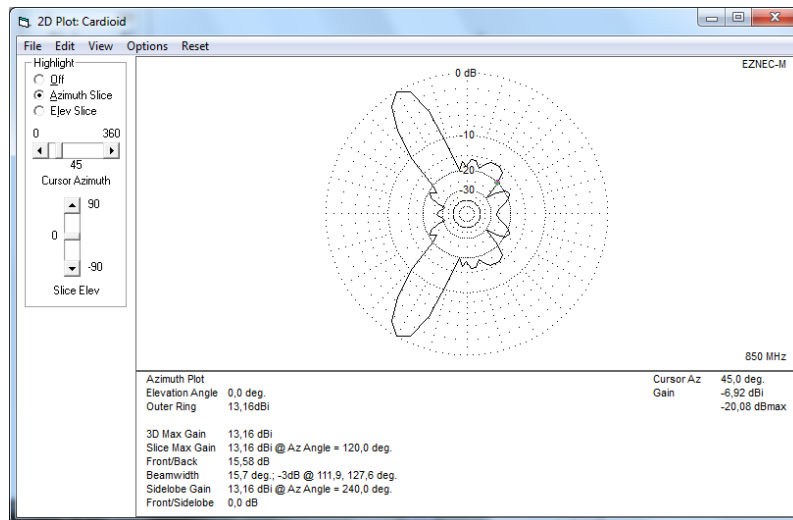
difieren, lo cual ocurre debido entre otras cosas a la resolución de ambos diagramas ya que los diagramas de EZNEC poseen una resolución de  $5^\circ$  y los diagramas obtenidos del PSO tienen una resolución de  $1^\circ$ , sin embargo en ambos casos los niveles de radiación son muy bajos lo cual cumple con los requisitos de suprimir las señales interferentes. Observando las figuras [4.101](#) y [4.102](#) también se pudo notar que los niveles de los lóbulos laterales se encontraban a niveles bajos, lo que ratifica la calidad del diagrama obtenido por el algoritmo PSO.

### Diagrama a $120^\circ$ .

En las figuras 4.104 y 4.105 se observan los patrones de radiación correspondientes al patrón de radiación en dirección  $120^\circ$ .



**Figura 4.104:** Ganancia del Haz Principal en dirección de máxima radiación a  $120^\circ$ .



**Figura 4.105:** Nivel de la señal interferente a  $45^\circ$ , en dirección de máxima radiación a  $120^\circ$ .



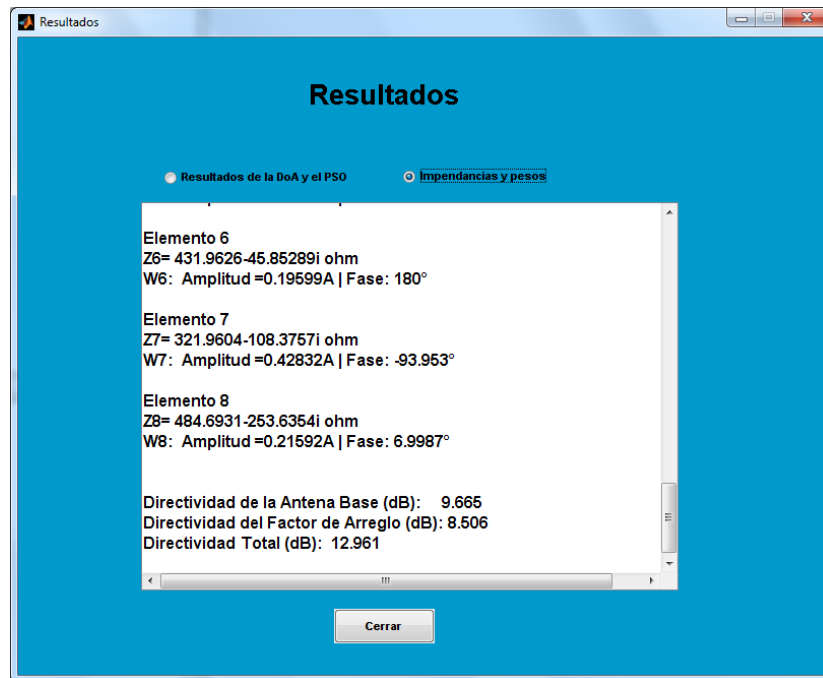


Figura 4.106: Nivel de la señal interferente a 45°, en dirección de máxima radiación a 120°.

Dirección	Directividad Obtenida	Ganancia EZNEC
Haz Principal (120°)	12.961 dB	13.16 dB
Señal Interferente (45°)	-24.97 dB	-20.08 dB

Tabla 4.35: Nivel de las señales Interferentes.

Observando la tabla 4.35 se observa que al igual que para el diagrama de 45° al comparar el nivel de radiación obtenido por el diagrama del algoritmo PSO con el nivel del diagrama de EZNEC y además observando los niveles de los lóbulos laterales del diagrama de EZNEC en las figuras 4.104 y 4.105, se demuestra la eficiencia del algoritmo PSO ya que el mismo resuelve unos pesos para los elementos de antenas tales que estos si cumplen con lo establecido, generando un patrón de radiación con dirección de máxima a 120° y niveles de lóbulos aceptables para anular señales interferentes. Como se aprecia en la tabla 4.35 el nivel en (dB) en dirección de la señal interferente a 45° difiere un poco sin embargo como ya se menciono esta variación se debe a la resolución de los diagramas.

#### 4.4.3.2. Impedancias del sistema.

En las tablas 4.36 y 4.37 se presentan las impedancias calculadas en el programa utilizando los pesos obtenidos por el algoritmo PSO, así como también las calculadas por EZNEC.

Elemento	Impedancias Obtenidas	Impedancias EZNEC
Elemento	441.2314 - j235.3796	442.4 - j236.9
Elemento	261.7999 - j245.3916	262.7 - j242.6
Elemento	290.2819 - j183.9133	293.3 - j186.2
Elemento	304.0337 - j210.4232	305.1 - j218.9
Elemento	345.7766 - j176.2868	338.5 - j176.4
Elemento	303.3367 - j192.0062	301.3 - j189.9
Elemento	230.3425 - j203.1656	227.5 - j204.4
Elemento	265.8329 - j229.4013	256.4 - j239

**Tabla 4.36:** Impedancias de los elementos cuando hay máxima radiación a 45°.

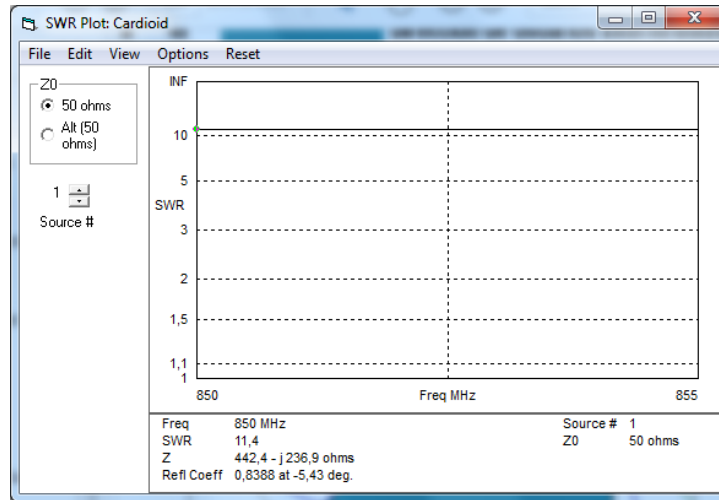
Elemento	Impedancias Obtenidas	Impedancias EZNEC
Elemento	305.3686 - j140.2287	307.6 - j137.6
Elemento	337.1256 - j89.59906	334.5 - j91.54
Elemento	332.493 - j108.1247	336.4 - j108.3
Elemento	358.0134 - j136.2337	358.4 - j132.1
Elemento	423.6943 - j110.5355	423.3 - j118.4
Elemento	431.9626 - j45.85289	432.2 - j56.37
Elemento	321.9604 - j108.3757	321.9 - j115.9
Elemento	484.6931 - j253.6354	476.4 - j254.7

**Tabla 4.37:** Impedancias de los elementos cuando hay máxima radiación a 120°.

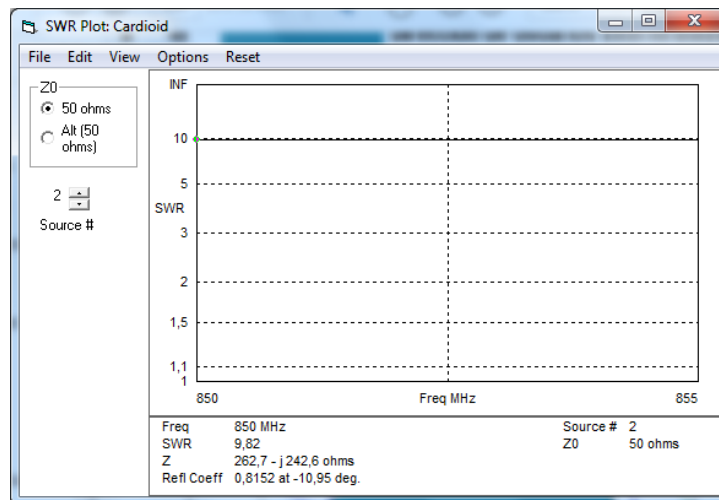
Al observar las tablas 4.36 y 4.37 y compara las impedancias calculadas en el programa con las impedancias calculadas en EZNEC, se puede notar que el valor de estas es casi el mismo lo que deja ver que las impedancias calculadas por el programa son bastante exactas. Estas pequeñas diferencias que se presentan entre unas impedancias y otras, se debe a que para realizar el calculo de las impedancias se realizo un estudio de la matriz  $Z$ , donde se estudiaron los valores de las impedancias mutuas y propias de ciertos arreglos de antenas con  $N$  elementos, y se determino que para calcular todas las impedancias mutuas y propias se pudo realizar una interpolación entre ciertos valores. Luego utilizando los pesos obtenidos por el algoritmo PSO se lograron determinar las impedancias de entrada. Por lo cual este

ligero error en los valores de las impedancias se debe a que la interpolación es un método matemático con cierto grado de error en su estimación. Sin embargo los resultados reflejan que los valores de impedancias calculados son bastante próximos a los valores esperados.

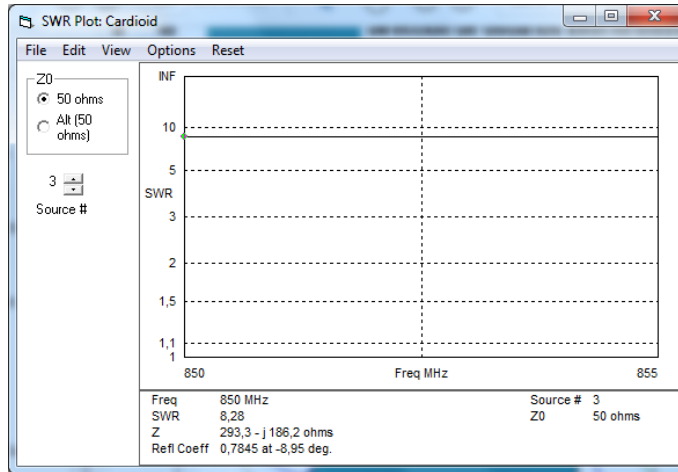
En las siguientes figuras se muestran los valores de impedancias obtenidos en EZNEC.



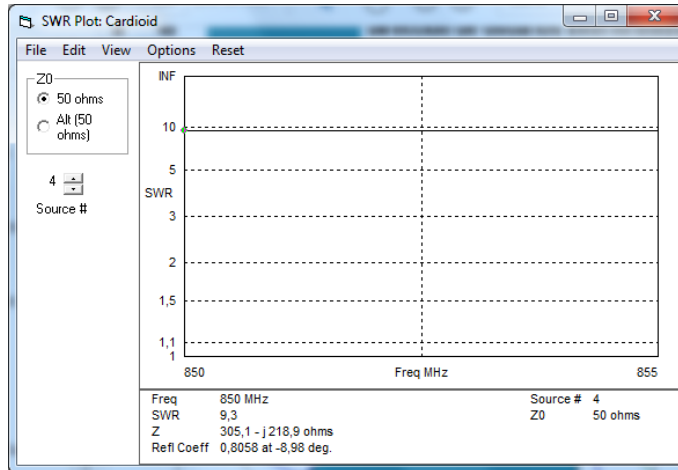
**Figura 4.107:** Impedancia de entrada del elemento 1 en dirección de máxima radiación a 45°.



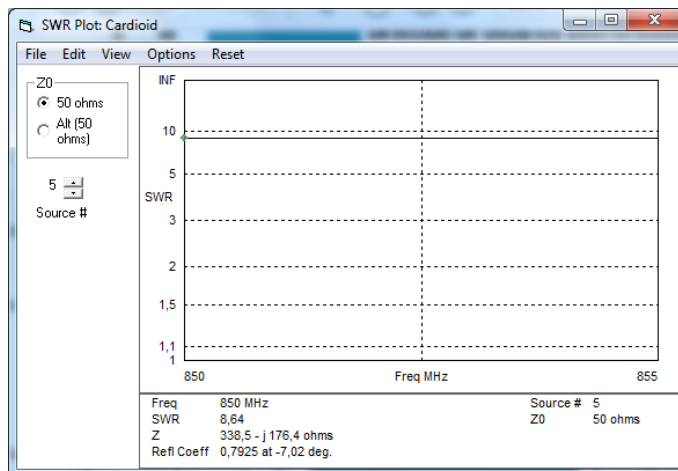
**Figura 4.108:** Impedancia de entrada del elemento 1 en dirección de máxima radiación a 45°.



(a) Elemento 3

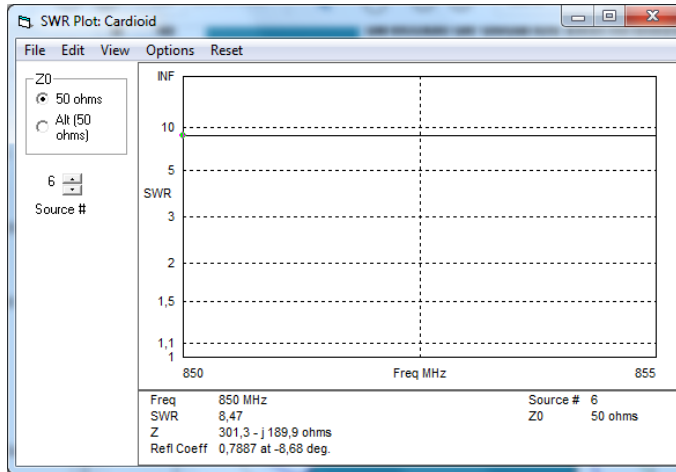


(b) Elemento 4

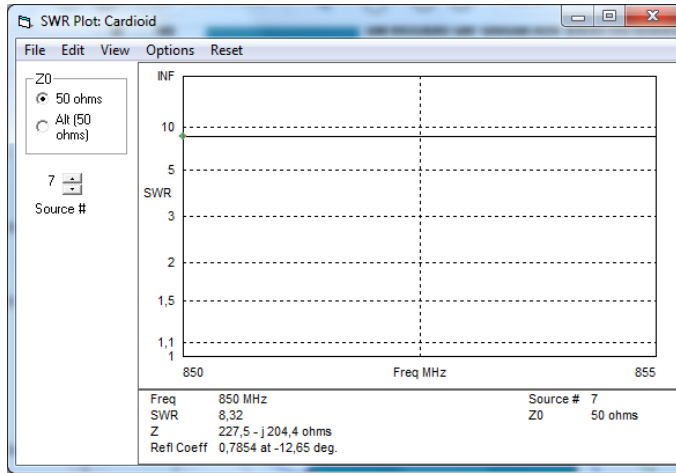


(c) Elemento 5

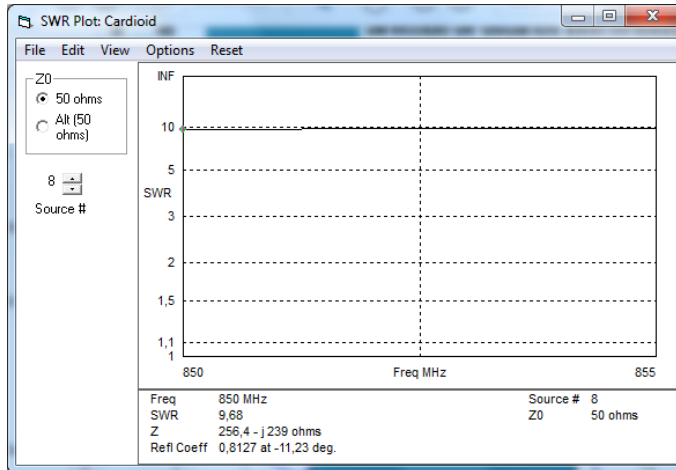
**Figura 4.109:** Impedancias de entrada de los elementos 3,4 y 5 en dirección de máxima radiación a  $45^\circ$ .



(a) Elemento 6

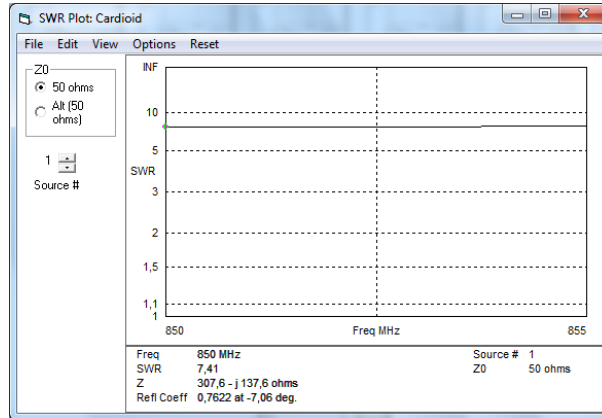


(b) Elemento 7

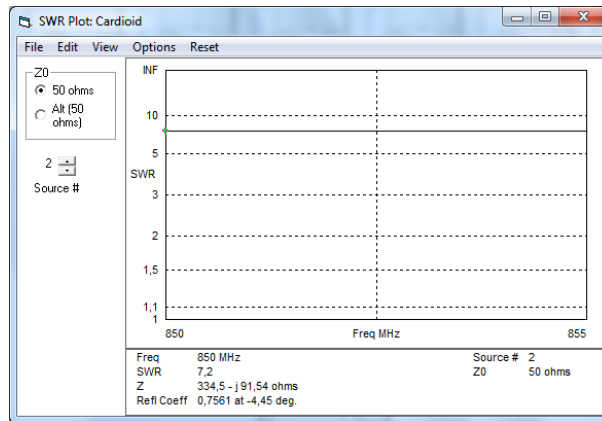


(c) Elemento 8

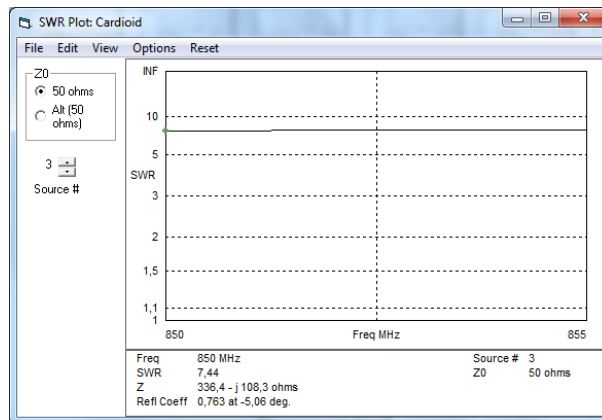
Figura 4.110: Impedancias de entrada de los elementos 6,7 y 8 en dirección de máxima radiación a  $45^\circ$ .



(a) Elemento 1

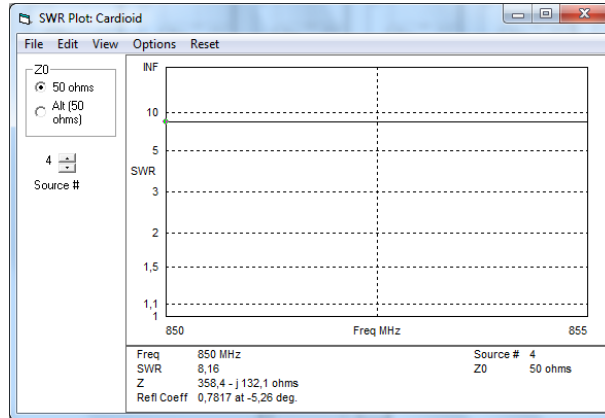


(b) Elemento 2

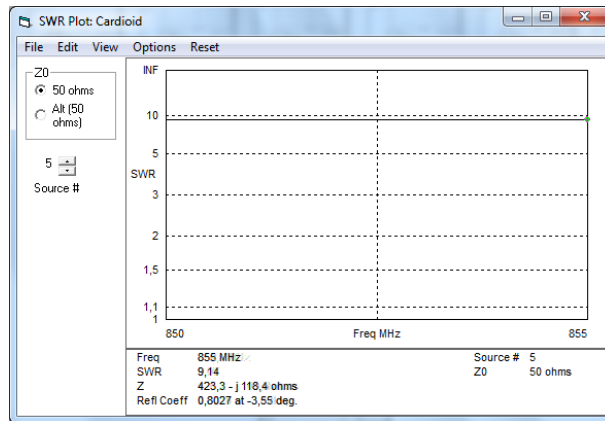


(c) Elemento 3

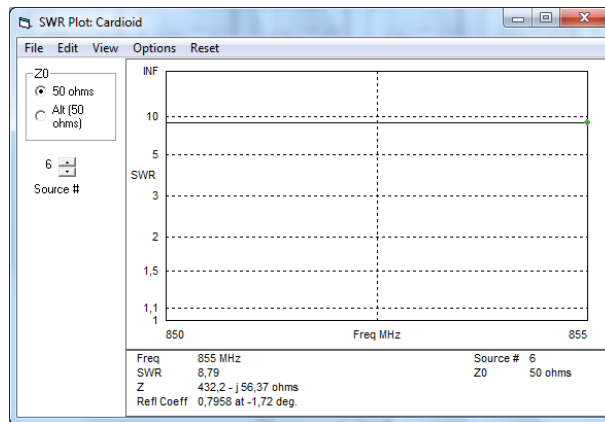
**Figura 4.111:** Impedancias de entrada de los elementos 1,2 y 3 en dirección de máxima radiación a  $120^\circ$ .



(a) Elemento 4

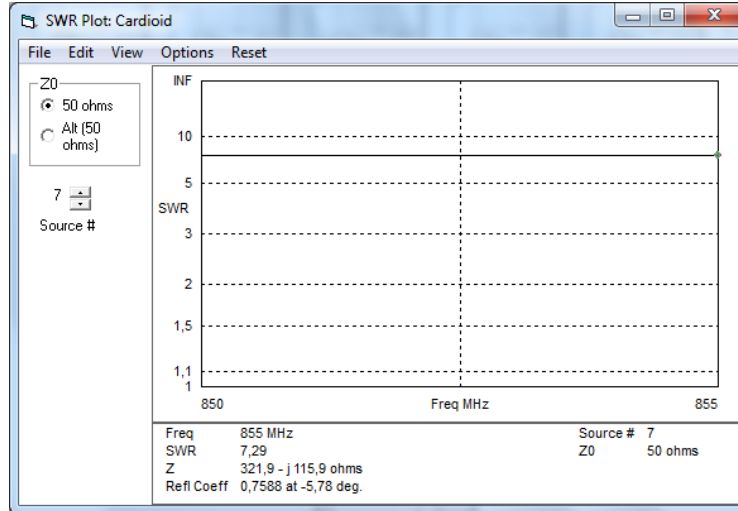


(b) Elemento 5

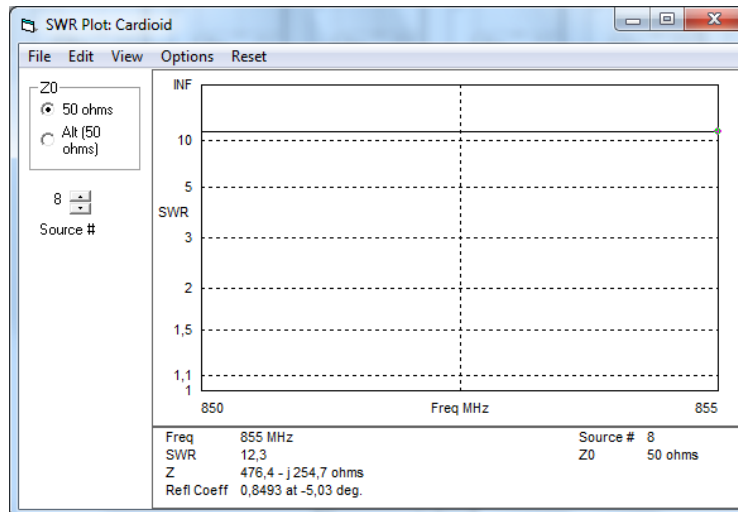


(c) Elemento 6

Figura 4.112: Impedancias de entrada de los elementos 4,5 y 6 en dirección de máxima radiación a 120°.



**Figura 4.113:** Impedancia de entrada del elemento 7 en dirección de máxima radiación a  $120^\circ$ .



**Figura 4.114:** Impedancia de entrada del elemento 8 en dirección de máxima radiación a  $120^\circ$ .



## Capítulo V

# Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Debido a la aparición de nuevas tecnologías que permiten un mayor tráfico de voz y datos dentro de la red, el colapso por el aumento del volumen de tráfico y de usuarios se hace evidente, por lo cual el implementar sistemas que permitan manejar estos altos volúmenes de transmisión se hace necesario. La sectorización evidentemente es uno de los métodos que permiten sectorizar a los usuarios por zonas denominadas celdas, permitiendo así que estos sean atendidos de acuerdo a su ubicación geográfica por la estación base mas cercana, sin embargo hoy en día debido a los servicios que presta la red la cantidad de usuarios presentes dentro de una celda podrían colapsar las misma, por lo cual implementar la tecnología SDMA o en otras palabras implementar antenas inteligentes dentro de las celdas permite a los usuarios compartir un mismo canal de transmisión, aumentando así la capacidad del sistema y la red, y a su vez disminuyendo la interferencia entre usuarios.

Un sistema de antenas inteligentes por definirlo en pocas palabras, es simplemente una arreglo de antenas controlado por un procesador DSP en el cual ciertos algoritmos definen el comportamiento del sistema. Los sistemas de antenas inteligentes podrían dividirse en dos etapas fundamentales, la estimación de las di-

recciones de arribo (DoA) y la etapa de conformación de haz (Beamforming) . El desarrollo de este trabajo de grado se centro principalmente en el estudio de la implementación del algoritmo PSO (Optimización por Enjambre de Partículas) como cerebro de la etapa de conformación de haz, y como algoritmo DoA se seleccionó el algoritmo MUSIC debido a su fácil implementación y a su capacidad de estimación.

El sistema se diseño utilizando un arreglo de antenas lineales (ULA), cuyo eje del arreglo se ubico en el eje X del sistema de coordenadas cartesianas y sus elementos de antenas (dipolos) orientados en dirección  $a_z$ . Las señales utilizadas para el estudio fueron señales contenidas dentro del plano del eje del arreglo que en este caso fue el plano XY.

Para realizar las simulaciones del sistema se utilizo MATLAB, y por medio del apartado GUI de MATLAB se diseño una interfaz gráfica que permite estudiar ambas etapas, pudiendo diseñar los arreglos de antenas y realizar pruebas sobre la etapa DoA y la etapa Beamforming. Es importante destacar que en el diseño de los arreglos de antenas se tomó en cuenta el efecto de aliasing, por lo cual para garantizar un buen funcionamiento de la etapa de detección de arribo, todos los arreglos se diseñaron con una distancia de separación entre elementos de  $0,5\lambda$  y a una frecuencia de operación de 850MHz.

Evaluando el desempeño del algoritmo MUSIC, se pudo constatar que su precisión es alta, sin embargo bajo ciertas circunstancias sus estimaciones no son tan precisas. Se pudo ver que para una relación señal a ruido muy baja el algoritmo pierde precisión y esto es debido a que el ruido perturba la señal por lo cual se pierde la información espacial recordando que el algoritmo MUSIC es un algoritmo que se basa en subespacios. La frecuencia es otro aspecto importante que según los resultados obtenidos en el estudio, esta afecta las estimaciones del algoritmo, por lo cual si se utiliza un sistema de acceso como FDMA, se debe de tomar en cuenta que las frecuencias de trabajo no deben de alejarse de la frecuencia de operación del sistema y a su vez no deben de ser frecuencias cercanas. Por ultimo se pudo observar que si las señales que arriban al arreglo, tienen direcciones muy próximas entre sí, esto afecta la estimación del algoritmo, de acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas se pudo observar que el nivel de resolución del algoritmo es de alrededor

de 4°, ya que a este nivel de resolución todavía se obtienen estimaciones aceptables para el sistema.

El algoritmo PSO fue utilizado como algoritmo central para la conformación de haces y debido a que su naturaleza es iterativa, el mismo optimiza su respuesta con cada iteración. Las pruebas realizadas se dividieron en dos, donde una parte de ellas se destino a estudiar el comportamiento del enjambre bajo ciertos parámetros que rigen al mismo, y la otra parte al estudio de la función costo, la cual definió los parámetros del sistema para la conformación de haz. Debido a que las partículas se mueven dentro de un espacio de búsqueda, se pudo observar que el resultado de su búsqueda depende de su coeficiente de confianza tanto individual como grupal, las pruebas llevadas a cabo reflejaron que el sistema pudo generar patrones de radiación que cumplieran con los estándares establecidos en la función costo, los cuales eran generar máxima radiación en dirección de las señales de interés, establecer niveles de lóbulos laterales bajos en el orden de  $-12\text{dB}$  y a su vez suprimir señales interferentes con nulos de radiación ubicados a  $-18\text{dB}$ , sin embargo cuando se suprimió el coeficiente de confianza en el grupo, las partículas no lograron converger por lo cual el resultado obtenido no fue óptimo ya que los niveles de radiación de los nulos fueron altos y no se logro suprimir las señales interferentes a niveles bajos.

Cuando se realizaron las pruebas y se tomo el coeficiente individual como nulo, las partículas lograron converger logrando anular las señales interferentes y obteniendo lóbulos laterales bajos, a pesar de esto el algoritmo PSO no solo basa su resultado en una buena estimación, sino que su velocidad de respuesta influye en su capacidad, por lo cual cuando se tomaron en cuenta ambos coeficientes de confianza tanto el grupal como el individual, los resultados obtenidos fueron óptimos y la velocidad de convergencia de las partículas fue mucho mayor requiriendo una menor cantidad de iteraciones para hallar la solución lo cual mejora la eficiencia del algoritmo.

La evaluación de la función costo se baso en el estudio de los parámetros del sistema, donde se realizo una prueba en la cual se dio mas importancia a la búsqueda de nulos de radiación en dirección de las señales interferentes para lograr suprimirlas, los resultados reflejaron que las partículas no lograron su convergencia sin

embargo el resultado fue aceptable ya que a pesar de que en estas direcciones no se lograron los nulos deseados, si se logro suprimir las señales interferentes ya que en dirección a estas se obtuvieron lóbulos laterales con niveles de radiación muy por debajo de los  $-18\text{dB}$ , esto indica que con una cantidad de iteraciones mayor o una mayor cantidad de partículas lograrían optimizar el sistema. Por otro lado cuando la búsqueda se enfoco en encontrar lóbulos laterales con niveles por debajo de los  $-12\text{dB}$  los resultados reflejaron el mismo comportamiento que cuando la búsqueda se enfoco en los nulos de radiación.

La ultima prueba llevada a cabo en la función costo se enfoco en darle la misma importancia a la búsqueda de lóbulos laterales y nulos de radiación, y al mismo tiempo buscar máxima radiación en dirección de la señal de interés. Los resultados obtenidos reflejaron que en dirección de las señales interferentes los niveles de radiación estuvieron por debajo de los  $-18\text{dB}$ , sin embargo los niveles de los lóbulos laterales fueron altos y al mismo tiempo el haz principal perdió precisión en dirección de la señal de interés, por lo cual se pudo ver que el darle la misma importancia a cada una de las búsquedas genera patrones no deseados ya que los niveles de los mismos tienden a hacer altos ocasionando que señales no deseadas perturben al sistema.

La optimización por enjambre de partículas (PSO) demostró ser un algoritmo robusto para su implementación en la optimización de sistemas de antenas inteligentes, ya que a pesar de que se necesita lograr la convergencia total de las partículas para obtener un resultado optimo, no es necesario alcanzar dicha convergencia en su totalidad para garantiza patrones de radiación que logren dar máxima radiación en dirección a las señales de interés y al mismo tiempo anular las señales no deseadas, lo cual genera una respuesta mas rapida del sistema y al mismo tiempo eficiente.

Por ultimo, la factibilidad de este sistema de antenas inteligentes basado en PSO para su implementación en sistemas sectorizados bajo SDMA es posible tomando en cuenta que se debe dividir el espacio en cuatro sectores de cobertura de  $90^\circ$  o 3 sectores de  $120^\circ$ , ya que la debilidad del sistema se presenta cuando las señales arriban en ángulos menores a  $30^\circ$  y mayores  $180^\circ$ , debido a que en estas direcciones

por la misma geometría de los arreglos de antenas no es posible generar patrones de radiación con haces de cobertura directivos. Por lo cual para garantizar haces directivos que den cobertura a los usuarios es necesario que el sistema trabaje dentro del rango de operación que le permita su óptimo funcionamiento.

## 5.2. Recomendaciones

Con el fin de ampliar la investigación y el estudio de este tipo de sistemas se hacen algunas recomendaciones que a futuro complementarían este trabajo de grado.

- Ampliar el estudio utilizando otros tipos de arreglos de antenas, como arreglos planares y arreglos volumétricos.
- Ampliar el estudio de la detección de arribo DoA a un espacio de tres dimensiones, recordando que en este trabajo la detección de arribo DoA se limita a señales contenidas en plano contenedor del eje del arreglo, que en este caso fue el plano XY.
- Estudiar la factibilidad de la implementación de otros algoritmos DoA que permitan una mayor eficiencia.
- Investigar y estudiar otras funciones costo para el algoritmo PSO que permitan haces más óptimos para el sistema, como es el caso de optimizar los haces utilizando una máscara sobre los diagramas de radiación.
- Mejorar el programa diseñado para permitir estudios de diagramas de radiación en tres dimensiones.
- Investigar, desarrollar e implementar el estudio hecho en este trabajo de grado. Traduciendo el código .m y así estudiar su implementación en distintas plataformas DSP como es el caso del dispositivo MOTOROLA MSC8101.



## Apéndice A

# Comparación del Algoritmo PSO con los Algoritmos GAs

Los algoritmos genéticos (GAs) surgen al igual que la optimización por enjambre de partículas (PSO), del estudio de la teoría de Darwin de la evolución y en el estudio del sincronismo de los bancos de peces y las bandadas de aves en la naturaleza. Por lo cual surgió la necesidad de comparar ambos algoritmos para estudiar su rendimiento.

Debido a esto se realizó una investigación prestando especial atención a los siguientes trabajos que se enfocaron específicamente en comparar el rendimiento de ambos algoritmos en un sistema de antenas:

- [21] En esta investigación dos sistemas de antenas inteligentes fueron investigados, con el propósito de determinar la configuración apropiada para cada elemento del arreglo, donde los patrones direccionales de los arreglos de antenas variaron así como la geometría correspondiente. Se utilizaron dos tipos de arreglos, un arreglo lineal compuesto de 16 elementos y un arreglo planar uniformemente circular compuesto de 18 elementos. Los algoritmos GAs y PSO fueron utilizados para optimizar el rendimiento de los patrones de radiación de los arreglos aplicados a las antenas inteligentes. La eficiencia de los algoritmos fue medida evaluando su convergencia para encontrar una solución

óptima al problema correspondiente y la velocidad con la que los mismos encontraron dicha solución.

- [16] En este artículo se efectuó una comparación entre ambos métodos de optimización con el objetivo de comprobar si podrían aplicarse eficientemente a problemas de síntesis de alimentaciones de agrupaciones lineales de antenas. Esta síntesis se redujo básicamente a estimar los fasores o pesos de la distribución de corriente de cada uno de los elementos que conformaron la agrupación, de forma que estos cumplieran con unas condiciones de radiación sujetas a unas especificaciones de partida en forma de máscara. De este modo se dispuso de un método válido para cubrir, con una cierta agrupación, una zona geográfica determinada.

Observando los resultados obtenidos en las investigaciones, [21] y [16] coinciden en el hecho de que ambos tanto los algoritmos genéticos GAs como el algoritmo PSO están en la capacidad de converger una solución óptima en particular que se aplica al problema presentado, que en este caso fue la síntesis de las alimentaciones en agrupaciones de antenas. Sin embargo ambas investigaciones hacen especial énfasis en que el algoritmo PSO está en la capacidad de obtener una solución óptima con una rapidez de convergencia y una exigencia mucho menor que los algoritmos genéticos GAs, por lo cual el algoritmo PSO prima en rendimiento a los algoritmos GAs.



## Apéndice B

# Estudio de Impedancias

Para un sistema de  $n$  antenas de acuerdo al principio de superposición los voltajes y corrientes en los terminales de cada una de ellas vendrán dados:

$$\begin{cases} V_1 = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2 + \cdots + Z_{1n} \cdot I_n \\ V_2 = Z_{12} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 + \cdots + Z_{2n} \cdot I_n \\ \vdots \\ V_n = Z_{n1} \cdot I_1 + Z_{n2} \cdot I_2 + \cdots + Z_{nn} \cdot I_n \end{cases} \quad (2.1)$$

A partir de la ecuación 2.1 se obtiene la impedancia de entrada de cada dipolo de la antena con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} Z_1 = Z_{11} + Z_{12} \cdot \frac{I_2}{I_1} + \cdots + Z_{1n} \cdot \frac{I_n}{I_1} \\ Z_2 = Z_{12} \cdot \frac{I_1}{I_2} + Z_{22} + \cdots + Z_{2n} \cdot \frac{I_n}{I_2} \\ \vdots \\ Z_n = Z_{n1} \cdot \frac{I_1}{I_n} + Z_{n2} \cdot \frac{I_2}{I_n} + \cdots + Z_{nn} \end{cases} \quad (2.2)$$

A partir de la ecuación 2.2, para calcular la impedancia propia de cada dipolo

de la antena en EZNEC se obtuvieron con la siguiente fórmula:

$$Z_{nn} = Z_{e_n} |_{I_m=0 \forall m \neq n} \quad (2.3)$$

Mientras que las impedancias mutuas entre dos o más elementos se calcularon con la siguiente fórmula:

$$Z_{nm} = (Z_{e_n} - Z_{nn}) |_{I_l=0 \forall l \neq n \text{ y } m, y I_n=I_m} \quad (2.4)$$

Donde  $Z_{nn}$  y  $Z_{e_n}$  son la impedancia propia y la impedancia de entrada, respectivamente del dipolo  $n$ , mientras que  $Z_{nm}$  es la impedancia mutua entre el dipolo  $n$  y  $m$ .

Ahora bien, para obtener todas impedancias propias y mutuas desde 5 a 12 elementos, se realizó un estudio comparativo de impedancias como se puede observar en la tabla 2.1, en la cual se puede observar que el comportamiento de las impedancias respecto a la cantidad de dipolos tiende a ser lineal, razón por la cual se realizó una interpolación lineal para el calculo de las impedancias propias y mutuas comprendidas entre 5 y 12 elementos, con la siguiente fórmula:

$$Z_{l,m} = \frac{Z_{f_{l,m}} - Z_{o_{l,m}} 12 - N_o}{n} - Z_{f_{l,m}} \quad (2.5)$$

Cantidad de elementos	$Z_{11}$	$Z_{33}$	$Z_{13}$
5	124+35.5i	130.9+33.89i	29.60 +19.57i
6	124.7+35.4i	132.6+33.47i	31.50 +19.24i
7	125.3+35.28i	133.8+33.09i	32.30 +19.03i
8	125.7+35.15i	134.6+32.74i	33.00 +18.82i
9	126.1+35.03i	135.3+32.42i	33.40 +18.61i
10	126.4+34.89i	135.8+32.12i	33.90 +18.42i
11	126.7+34.76i	136.3+31.83i	34.20 +18.22i
12	126.9+34.63i	136.6+31.56i	34.50 +18.03i

**Tabla 2.1:** Impedancias propias  $Z_{11}$ ,  $Z_{33}$  y mutuas  $Z_{13}$  obtenidas con  $d=0.5$  y  $l=0.5$

Donde  $l$  y  $m$  es son las coordenadas de la impedancia de la matriz  $z$  que se desea obtener,  $Z_f$  representa el valor de la misma cuando existen 12 elementos,  $Z_0$  y  $N_0$  es el valor que tiene la impedancia cuando se requiere por primera vez y su cantidad de elementos respectivamente, para lo cual se consideraron los siguientes propiedades:

$$Z(m, n) = Z(m, n) \quad (2.6)$$

Y debido a que los elementos tienen las mismas características (radio y longitud) y a están agrupadas en un arreglo lineal uniforme se cumple la siguiente propiedad:

$$Z(N + 1 - m, N + 1 - n) = Z(m, n) \quad (2.7)$$

Siendo  $N$ , la cantidad de elementos del arreglo. Estas dos propiedades junto con la interpolación permitieron reducir las mediciones obtenidas en EZNEC a las siguientes impedancias:

$$\begin{cases} Z(l, m) & \text{si } l + m \leq 6 \text{ y } l \leq 3 \forall l, m \in \mathbb{N}, N = 5 \text{ elementos} \\ Z(l, m) & \text{si } l + m = N + 1 \text{ y } l \leq N \forall l, m \in \mathbb{N}, N \neq 5, 12 \text{ elementos} \\ Z(l, m) & \text{si } l + m \leq 13 \text{ y } l \leq 12 \forall l, m \in \mathbb{N}, \text{ con } N = 12 \text{ elementos} \end{cases} \quad (2.8)$$

Por ejemplo, al determinar las impedancias  $Z(2, 5)$  con 5 dipolos de acuerdo con las propiedades 2.6 y 2.7 y 2.8 dicha impedancia será igual a la medición  $Z(1, 4)$  con 5 dipolos, mientras que para obtener  $Z(2, 5)$  con 9 dipolos es necesario interpolar dicho valor con los mismos valores obtenidos con 6 y 12 dipolos respectivamente.

Un vez interpolado las impedancias propias y mutuas, y se forma la matriz de impedancias  $Z$ , se calculan las impedancias de entrada de cada dipolo usando las ecuaciones mostradas en 2.2, junto con los pesos encontrados en el PSO.



## Apéndice C

# Códigos .m de los Algoritmos MUSIC, PSO y Función Costo

A continuación se presentan los códigos desarrollados en este trabajo de grado, los cuales fueron utilizados dentro de la interfaz gráfica diseñada.

### 3.1. Código .m Algoritmo MUSIC

```
function [PMUSIC,loc,theta]= music(ant,ASK,P_ASK,FSK,P_FSK,QAM,P_QAM,conf)
%Algoritmo MUSIC utlizado para detectar la dirección señales recibidas

%*****
%***** Formación de señales incidentes *****
%*****
%-----
% Variables de Entrada
% ASK: Estructura que contiene las características las señales con
% Modulación ASK
% P_ASK: Cantidad de señales con modulación ASK
```

```

% FSK: Estructura que contiene las características las señales con modulación FSK
% P_FSK: Cantidad de señales con modulación FSK
% QAM: Estructura que contiene las características las señales con modulación QAM
% P_QAM: Cantidad de señales con modulación QAM
% conf: Estructura que contiene la configuración de la DoA y el PSO

N=conf.DoA.N; %Cantidad de muestras de las señales
ss=0; %Contador de señales recibidas
P= P_ASK+P_FSK+P_QAM; %Cantidad de señales Recibidas
S=zeros(P,N); %Matriz de Señales Recibidas P señales Recibidas y N cantidad
%de muestras
fc= zeros(1,P); %Vector que contiene la frecuencia (MHz) de cada señal recibida
angdeg=zeros(1,P); %Vector que contiene los angulos de incidencia en ° de cada
%señal recibida
%Formación de Señales ASK
if P_ASK>0
for ss1=1:P_ASK
ss=ss+1;
clear y t_total
[y,t_total]=signal_ASK(ASK,ss1,conf); %Función paa obtener las señales ASK
S(ss,:)=y;
fc(1,ss)=ASK(ss1).frecuencia;
angdeg(1,ss)=ASK(ss1).direccion;
end
end
%Formación de Señales FSK
if P_FSK>0
for ss2=1:P_FSK
ss=ss+1;
clear y t_total
[y,t_total]=signal_FSK(FSK,ss2,conf); %Función paa obtener las señales FSK
S(ss,:)=y;

```

```

fc(1,ss)=max(FSK(ss2).frecuencia0,FSK(ss2).frecuencial);
angdeg(1,ss)=FSK(ss2).direccion;
end
end
%Formación de Señales QAM
if P_QAM>0
for ss3=1:P_QAM
ss=ss+1;
clear y t_total
[y,t_total]=signal_QAM(QAM,ss3,conf); %Función paa obtener las señales QAM
S(ss,:)=y;
fc(1,ss)=QAM(ss3).frecuencia;
angdeg(1,ss)=QAM(ss3).direccion;
end
end

%Variables de Salida
% N: Cantidad de muestras de las señales
% P: Cantidad de señales Recibidas
% S: Matriz de Señales Recibidas P señales Recibidas y N cantidad de muestras
% fc: Vector que contiene la frecuencia (MHz) de cada señal recibida
% angdeg: Vector que contiene los angulos de incidencia en ° de cada señal
%recibida
%-
-----

%*****
%***** Vector respuesta del arreglo *****
%*****
%-
-----

% Variables de Entrada
% ant: Estructura que contiene las características del arreglo
% angdeg: Vector que contiene los angulos de incidencia en ° de cada señal

```

```

% recibida
% fc: Vector que contiene la frecuencia (MHz) de cada señal recibida
% P: Cantidad de señales Recibidas

L= ant.L; %Numero de elementos del arreglo
d= ant.d; %Separación de los elementos del arreglo [lambda]
fd= ant.fd; %Frecuencia de operación del dipolo [MHz]
angrad= angdeg*pi/180; %Vector que contiene los angulos de incidencia en
%radianes de cada señal recibida
ph= zeros(L,P); %Fase del vector respuesta del arreglo
for ns=1:P
ph(:,ns)= 2*pi*(fc(ns)/fd)*d*[0:L-1]*cos(angrad(ns));
end
A= exp(1j*ph); %Vector Respuesta del arreglo

% Variables de Salida
% L: Numero de elementos del arreglo
% d: Separación de los elementos del arreglo [lambda]
% A: %Vector respuesta del arreglo
% angdeg: Vector que contiene los angulos de incidencia en ° de cada señal
% recibida
%-----

%*****
%***** Calculo de timeslots a utilizar *****
%*****
%-----

%Variables de Entrada
% ant: Estructura que contiene las características del arreglo
% P: Cantidad de señales recibidas
% L: Numero de elementos del arreglo
dec= P/(L-1);

```



```

coc= fix(dec);
dec= P-coc*(L-1);
t= coc; %Cantidad de timeslots requeridos para detectar todas las señales
if dec~=0
t= t+1;
end

%Variables de Salida
% t: Cantidad de timeslots requeridos para detectar todas las señales
%-----

%*****
%***** Algoritmo MUSIC *****
%*****
%-----

% Variables de Entrada
% conf: Estructura que contiene la configuración de la DoA y el PSO
% t: Cantidad de timeslots requeridos para detectar todas las señales
% A: Vector respuesta del arreglo
% P: Cantidad de señales recibidas
% L: Numero de elementos del arreglo
% N: Cantidad de muestras de las señales
% L: Numero de elementos del arreglo
% d: Separación de los elementos del arreglo [lambda]

avaln=conf.DoA.avaln; %Máximo valor de autovalores asociados al ruido
res= conf.DoA.res; %Resolución angular del pseudoespectro MUSIC
SNR= conf.DoA.SNR; %Relación Señal a Ruido [dB]
PMUSIC=zeros(1,length(-res:res:180)); %Acumulador del pseudoespectro MUSIC
PM=PMUSIC; %Pseudoespectro MUSIC
for ts=1:t %Ejecución del MUSIC en cada timeslot
si=(ts-1)*(L-1)+1; %Señal inicial en el timeslot

```

```

%sf: Señal final en el timeslot
if ts==t && dec~=0
sf=(ts-1)*(L-1)+dec;
else
sf=(ts)*(L-1);
end
X= awgn(A(:,si:sf)*S(si:sf,:),SNR); %Señales recibidas con ruido gaussiano
Rxx= (X*X')/N; %Matriz de autocorrelación
[avect, aval]=eig(Rxx); %Descomposición de la matriz de autocorrelación en
%autovectores y autovalores
z=0; %Autovectores asociados al ruido
for e=1:L; %Ciclo para determinar la cantidad de autovalores del ruido
if(aval(e,e)<avaln);
z=z+1;
end
end
Un= avect(:,1:z); %Autovectores asociados al ruido
Pn= Un*Un'; %Potencia de los autovectores del ruido
h=0; %Contador de iteraciones del siguiente ciclo
for theta=-res:res:180; %Barrido angular
thetarad= theta*pi/180; %Ángulo en radianes
atheta= exp(1i*2*pi*d*(0:L-1)'.*cos(thetarad)); %Respuesta del arreglo en
%cada ángulo
h=h+1;
PM(1,h)= -20*log10(abs(atheta'*Pn*atheta)); %Pseudoespectro MUSIC en dB
end
PM= PM-min(PM); %Ajuste del nivel de referencia del pseudoespectro a 0dB
PMUSIC=PM+PMUSIC; %Acumulación del pseudoespectro MUSIC
end

% Variables de Salida
% res: Resolución angular del pseudoespectro MUSIC

```

```

% PMUSIC: Acumulador del pseudoespectro MUSIC
%-----

%*****
%***** Picos detectados en el pseudoespectro MUSIC *****
%*****
%-----

%Variables de Entrada
% conf: Estructura que contiene la configuración de la DoA y el PSO
% PMUSIC: Acumulador del pseudoespectro MUSIC
% res: Resolución angular del pseudoespectro MUSIC

udp= conf.DoA.udp; %Umbral de detección de señales (dB)
[pks, loc] = findpeaks(PMUSIC,'minpeakheight',udp); %Detección de picos en
%el pseudo espectro
theta= 0:res:180; %Vector que contiene los angulos de 0 a 180°
loc= loc-1; %Posición en el vector theta de las señales detectadas

% Variables de Salida
% theta: Vector que contiene los angulos de 0 a 180°
% loc: Posición en el vector theta de las señales detectadas
%-----

```

### 3.2. Código .m Algoritmo PSO

```

function [Gbest]= part_swarm_opt(handles,ant,conf,theta,loc,Gbest_old)
% Algoritmo PSO usado para optimizar los pesos asociados a cada elemento del
% arreglo
% Variables de entrada

```

```

% handles: Arreglo asociado a la interfaz del PSO
% ant: Estructura que contiene las características del arreglo
% conf: Estructura que contiene la configuración de la DoA y el PSO
% theta: Vector que contiene los ángulos de 0 a 180°
% loc: loc: Posición en la variable theta de las señales detectadas
% Gbest_old: Variable que indica el mejor global inicial
% Variables de salidas
% Gbest: Mejor global de las partículas

%*****
%***** Parámetros del PSO *****
%*****
%-----
%*****
%***** Parámetros básicos *****
%*****
L=ant.L; %Cantidad de Dipolos
d=ant.d; %Separación entre los elementos del arreglo
Ni = conf.pso.Ni; % Número de iteraciones
Ndims = 2*L; % Cantidad de variables optimizar
Np = conf.pso.Np; %Número de partículas
C1 = conf.pso.C1; %Atracción individual
C2 = conf.pso.C2; %Atracción social
w = conf.pso.w; % Inercia
%*****
%*****
%***** Rango de posiciones de partículas *****
%*****
betamax= conf.pso.betamax; % Máxima fase de los pesos de los dipolos
betamin= conf.pso.betamin; % Mínima fase de los pesos de los dipolos
alphamax=conf.pso.alphamax; % Máxima magnitud de los pesos de los dipolos

```



```

%*****
%***** Inicialización de Variables *****
%*****
%-----
%
%% Inicialización del costo de los mejores locales y el mejor global %%
%
Pbestf = zeros(1, Np); % Costo de los mejores locales
Gbestf = 0; % Costo del mejor global
%
%
%Inicialización de las posiciones de los mejores locales y el mejor global%
%
Pbest = zeros(Np, Ndims); % Posición de los mejores locales
Gbest = zeros(1, Ndims); % Posición de los mejores globales
%
%
%% Inicialización de los mejores costos promedios y globales %%
%
meanfits = zeros(1, Ni+1); % Mejores costos promedios
bests = zeros(1, Ni+1); % Mejores costos globales
t = 0:Ni; % Variable asociada a la cantidad de iteración realizadas
%
%-----
%*****
%***** Velocidades y posiciones iniciales *****
%*****
%-----
% Posiciones iniciales de las partículas

```

```

X = ones(Np,1)*Xmin + (ones(Np,1)*(Xmax - Xmin)).* rand(Np, Ndims);
% Velocidades iniciales de las partículas
V = ones(Np,1)*Vmin + (ones(Np,1)*(Vmax - Vmin)).* rand(Np, Ndims);
%-----

%*****
%***** Actualización del mejor local y global *****
%*****
%-----

for l=1:Np % Mejores fitness locales iniciales en cada partícula
% Costo de las posiciones las partículas
Pbestf(l)=costo(X(l,:),d,L,loc,theta,cml,csl,csll,cnull,nsll,nnull);
end
Pbest= X; % Mejores posiciones locales iniciales
[Gbestf, minfitidx] = min(Pbestf); % Mejor costo global
Gbest = X(minfitidx, :); % Mejor posición global
if nargin>5 % Si se dispone de una mejor posición antigua
% Costo del global antiguo
Gbestf_old= costo(Gbest_old,d,L,loc,theta,cml,csl,csll,cnull,nsll,nnull);
if Gbestf_old<Gbestf
Gbestf=Gbestf_old; % Mejor costo global
Gbest=Gbest_old; % Mejor posición global
end
end
%-----

%*****
%***** Actualización del diagrama de radiación *****
%*****
%-----

% Diagrama de radiación obtenido con el mejor global
y = diagrama(Gbest,d,L,theta);

```

```

% Gráficos en la interfaz asociados al diagrama de radiación
axes(handles.axes1)
% Gráfico del diagrama de radiación
h=polar(pi*[theta(2:length(theta)),180+theta(2:length(theta))]/180,...
[y(2:length(theta)),y(length(theta):-1:2)]);
refreshdata(h,'caller')
drawnow
%-----

%*****
%***** Actualización de gráficos de mejor costo global y promedio *****
%*****
%-----

bests(1) = Gbestf; %Mejor costo inicial
meanfits(1) = mean(Pbestf); % Promedio de costo inicial
% Gráfico en la interfaz asociados a los mejores globales y promedios
axes(handles.axes2)
g=plot(t,bests,'b'); % Grafico de los mejores globales
hold on
plot(t,meanfits,'r');% Gráficos de los mejores promedios
grid
refreshdata(g,'caller')
drawnow
hold off
%-----

for it = 1:Ni %Deplazamiento de las partículas en cada iteración

%*****
%***** Actualización de las velocidades y posiciones *****
%*****
%-----

```



```

for l = 1:Np % Desplazamiento de las partículas
for m = 1:Ndims % Movimiento de las partículas en cada dimensión
% Velocidades de la partícula
V(l, m) = min(max((w * V(l, m) + rand * C1 * (Pbest(l, m) - X(l, m))...
+ rand * C2 * (Gbest(m) - X(l, m))), Vmin(1,m)), Vmax(1,m));
% Posicion de la partícula
X(l, m) = min(max((X(l, m) + V(l, m)), Xmin(1,m)), Xmax(1,m));
end
%-----

%*****
%***** Actualización del mejor local y global *****
%*****
%-----

% Costo de las posiciones las partículas
fitnesses= costo(X(l,:),d,L,loc,theta,cml,csl,cnll,nsl,nnll);
if(fitnesses < Pbestf(l)) % Actualizazición del locales
Pbestf(l) = fitnesses; % Actualización del mejor costo local
Pbest(l, :) = X(l, :); %Actualización la mejor posición local
if (fitnesses < Gbestf) % Actualizazición del mejor global
Gbestf = fitnesses; % Actualización del mejor costo global
Gbest = X(l, :); % Actualización la mejor posición global
%-----

%*****
%***** Actualización del diagrama de radiación *****
%*****
%-----

y = diagrama(Gbest,d,L,theta); % Diagrama de radiación obtenido
% con el mejor global
% Gráficos en la interfaz asociados al diagrama de radiación
axes(handles.axes1)

```

```

% Gráfico del diagrama de radiación
h=polar(pi*[theta(2:length(theta)),180+theta(2:length(theta))]/180,...
[y(2:length(theta)),y(length(theta):-1:2)]);
refreshdata(h,'caller')
drawnow
%-----
end
end
end

%*****
%***** Actualización de gráficos de mejor costo global y promedio *****
%*****
%-----

bests(it+1) = Gbestf; % Mejor costo en cada iteración
meanfits(it+1) = mean(Pbestf); % Promedio de costo en cada iteración
% Gráfico en la interfaz asociados a los mejores globales y promedios
axes(handles.axes2)
g=plot(t,bests,'b'); % Grafico de los mejores globales
hold on
plot(t,meanfits,'r'); % Gráficos de los mejores promedios
grid
refreshdata(g,'caller')
drawnow
hold off
%-----
end
% Gráfico en la interfaz asociados a los mejores globales y promedios
axes(handles.axes2)
legend('Mejores costos','Mejores costos promedios')

```

### 3.3. Código .m de la Función Costo

```

function [out] = costo(x,d,L,loc,theta,cml,csll,cnull,nsll,nnull)
% Función costo utilizado en el PSO
% Variables de Entrada
% x: Posición de la partícula
% d: separación entre los elementos
% L: Cantidad de dipolos del arreglo
% loc: Posición en la variable theta de las señales detectadas
% theta: Vector que contiene los angulos de  $\theta$  a  $180^\circ$ 
% cml: Costo del lóbulo principal
% csll: Costo de los lóbulos laterales
% cnull: Costo de los nulos de radiación
% nsll: Nivel permitido de los lobulos de los lóbulos laterales
% nnull: Nivel permitido de los nulos de radiación
% Variables de Salida
% out: Costo total de la posición de la patícula

% Diagrama de radiación obtenido con la posición del dipolo
y= diagrama(x,d,L,theta);
[pk ls]=findpeaks(y,'sortstr','descend'); % Picos del diagrama de radiación

%*****
%***** Costo del lóbulo principal *****
%*****
%-----
ml=1-y(loc(1)); % Costo obtenido por la dirección principal
%-----

%*****
%***** Costo de los lóbulos laterales *****

```

```

%*****
%-----
if length(ls)>1
sll= max(y(ls(2))-nsll,0); % Costo obtenido por los lóbulos laterales
else
sll=0; % Costo obtenido por los lóbulos laterales
end
%-----

%*****
%***** Costo de los nullos *****
%*****
%-----
if length(loc)>1
%Costo obtenido por los nullos de radiación
null= sum(max(y(loc(2:length(loc)))-nnull,0))/(length(loc)-1);
else
null=0; %Costo obtenido por los nullos de radiación
end
%-----

%*****
%***** Costo total *****
%*****
%-----
out= cml*ml+csll*sll+cnull*null; % Costo total de la posición de la patícula
%-----

```

## Referencias Bibliográficas

- [1] May MM Wagih y Hassan M Elkamchouchi. «Application of particle swarm optimization algorithm in smart antenna array systems». En: *Progress in Electromagnetics Research* (2009), pág. 461.
- [2] Jose Franco. «Un Algoritmo Basado en Optimización por Enjambre de Partículas para el Problema de Asignación Axial 3-Dimensional.» En: (2011).
- [3] A. Castillo y E. Rodríguez. «Simulación y Estudio Comparativo de los Algoritmos de Detección de Dirección de Arribo (DoA) Usados en Antenas Inteligentes». En: *Universidad de Carabobo, Valencia* (2005).
- [4] Rafael Albornoz. «Antenas inteligentes». En: *Universidad de Carabobo, Valencia* (2004).
- [5] O Jiménez, Ignacio Javier Franco Martín y José Luis Miranda Sierra. «Introducción a la tecnología de Antenas Inteligentes. Aplicación a UMTS». En: *Teléfono Móviles España* (2001).
- [6] Miguel Gabal Lanaul. «Agrupaciones de antenas adaptativas y Algoritmo Genético». En: (2005).
- [7] David Rangel y José. Maduro. «Simulación y Evaluación de Algoritmos de Dirección de Arribo (DOA) en Disitintos Procesadores Digitales de Señales (DSP'S) Usados en Antenas Inteligentes». En: *Univeridad de Carabobo*. (2015).
- [8] Ivica Stevanovic, Anja Skrivervik y Juan R Mosig. *Smart antenna systems for mobile communications*. Inf. téc. 2003.
- [9] Mario Caicedo y Plácido Mora. *Temas de Propagación de Ondas*. Universidad simón Bolívar, 2004.

- [10] Hamid Krim y Mats Viberg. «Two decades of array signal processing research: the parametric approach». En: *Signal Processing Magazine, IEEE* 13.4 (1996), págs. 67-94.
- [11] Rias Muhamed. «Direction of arrival estimation using antenna arrays». En: (1996).
- [12] Anthony J Weiss y Benjamin Friedlander. «DOA and steering vector estimation using a partially calibrated array». En: *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* 32.3 (1996), págs. 1047-1057.
- [13] Revati Joshi y Ashwinikumar Dhande. «Direction of Arrival Estimation Using Music Algorithm». En: *signal* 1.1 (2014), pág. 3.
- [14] Honghao Tang. «DOA estimation based on MUSIC algorithm». En: (2014).
- [15] Miguel Ángel García Yáñez. «Estimación de la dirección de arribo de señales a arreglos de antenas de fase». Tesis doct. 2013.
- [16] Marcos Antonio Correa Sanz, Javier Villanueva Baró, Jesús Ramón Pérez López, José Basterrechea Verdeja y col. «Aplicación de PSO y GAs a la síntesis de agrupaciones lineales de antenas». En: (2005).
- [17] Chao-Hsing Hsu. «Optimizing MIMO-SDMA smart antennas by using linear array phase perturbations based on particle swarm optimization». En: *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 7.3 (2011), págs. 1331-1340.
- [18] Ahmed Magdy, KR Mahmoud y S Sayed. «Cooperative Communications Based on Smart Antenna Systems Using PSO Algorithm». En: *Session 2A10 SC4: Antenna-channel Interactions and Multipath Wireless Channels* (2013), pág. 568.
- [19] Wing-Suen Au. «Performance analysis of SDMA systems for wireless communications». En: (1999).
- [20] Alberto Hernández. «Análisis Comparativo de Algoritmos de Dirección de Llegada Basados en Subespacios para Antenas Inteligentes Music y Spirit, Orientados a Redes Móviles 3G.» En: *Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil Electrónica*. (2010).

- 
- [21] Konstantinos A Papadopoulos, Chrysoula A Papagianni, CA Papas, Dimitra I Kaklamani y Iakovos S Venieris. «Beam array optimization for smart antenna systems using stochastic algorithms». En: *Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on*. IEEE. 2009, págs. 1345-1349.





**Anexo A**

**Beam Array Optimization for  
Smart Antenna Systems Using  
Stochastic Algorithms**



## **Anexo B**

# **Aplicación de PSO y GAs a la síntesis de agrupaciones lineales de antenas**

