

# **Diseño de un driver de control de un esquema SDMA para una red inalámbrica**

Autor:

**WALTER EMILIO RODRIGUEZ**

**Maestría en automatización y control**

Director:

**ALEXANDER ARIAS**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**



Medellín

2013

# RESUMEN

---

El auge de la movilidad en los sistemas de telecomunicaciones, hace imperante el estudio de esquemas de multiplexación que garanticen el buen uso de los recursos espectrales y del ancho de banda, garantizándole al usuario un excelente servicio con alta capacidad y disponibilidad. Por eso en la actualidad se usan diferentes técnicas para el reuso del ancho de banda en un rango espectral específico dentro de una celda de red inalámbrica. Pero todas estas imponen restricciones como compartir el ancho de banda, transmisiones por ráfagas de tiempo o uso de códigos que dificultan el procesamiento y aumentan el ruido del sistema. Por las razones anteriormente expuestas se están desarrollando en el mundo esquemas de acceso en redes inalámbricas, que permitan aumentar la capacidad de los usuarios sacrificando en forma mínima parámetros como ancho de banda, relación señal a ruido etc. Uno de estos esquemas es SDMA, que requiere el uso de tecnologías de control adaptativo, radio propagación y arreglo de antenas para poder ser implementado adecuadamente. Pero para lograr esto se están desarrollando redes inalámbricas de alta capacidad con SDMA usando antenas inteligentes, lo cual requiere herramientas de diseño y algoritmos de control veloces. Por eso nos pusimos como objetivo de esta tesis de grado el diseño conceptual, de una arquitectura de control de un esquema SDMA para una red inalámbrica, usando antena inteligente con una o varias técnicas de control y con dos arquitecturas de arreglo de elementos radiantes que permitan obtener parámetros adecuados de acuerdo a los requerimientos de capacidad necesaria por cada usuario, para lo cual se abordaron tres frentes; el primero de ellos fue encontrar la arquitectura más adecuada para el arreglo antenas, de tal forma que responda a las necesidades del esquema SDMA , el segundo fue determinar las técnicas de control adaptativo más apropiado que garantice el buen desempeño de la celda WIFI y el tercero fue evaluar el desempeño de cada técnica bajo el análisis de estadística descriptiva, dando como resultado una identificación de la técnica de control fuzzy como la más adecuada, para un arreglo lineal de antenas, tanto para una radio base como para un usuario final.

*Palabras clave:* ADALINE, Algoritmos evolutivos, Antena, difuso, FUZZY, Patrón de radiación, SDMA, WIFI.

# RECONOCIMIENTOS

---

Gracias a toda mi familia por la paciencia y apoyo durante todo este proceso de formación.

Un agradecimiento muy especial a todos mis profesores y compañeros de maestría por los diferentes aportes que de alguna manera permitieron la culminación de este trabajo de investigación.

También a Alexander Arias mi asesor de trabajo de grado, por su gran apoyo y aporte en diferentes temáticas que requerí para este trabajo de investigación.

# ACRÓNIMOS

---

**ADALINE:** ADAptive LINear Element

**AP:** Access Point

**CDMA:** Code Division Multiple Access

**DOA:** Direction Of Arrival

**DSP:** digital signal processor

**FA:** Factor de Agrupación

**FDD:** Frequency Division Duplexing

**FPGA:** Field Programmable Gate Array

**GPS:** Global Positioning System

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**LMS:** Least Mean Squares

**MAC:** Media Access Control

**MADALINE:** Multiple ADAptive LINear Element

**MIMO:** Multiple-input Multiple-output

**RLS:** Recursive Least. Squares

**SDMA:** Space Division Multiplexing Access

**SIMO:** Single Input Multiple Output

**TDM:** Time Division Multiplexing

**UCA:** uniform Circular array

**ULA:** Uniform Linear Array

**URA:** Uniform Retangle Array

**WiMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access



# TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>Descripción del proyecto</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1</b>	<b>Antecedentes y justificación</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Desarrollo de los algoritmos</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Implementación de arreglos experimentales</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1.3</b>	<b>Pruebas pilotos con arreglos de diferentes configuraciones MIMO-SIMO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1.4</b>	<b>Análisis de estructuras físicas de arreglo para antenas inteligentes</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Descripción del problema</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Síntesis del problema</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4</b>	<b>Hipótesis</b> .....	<b>16</b>
<b>1.5</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
<b>1.5.1</b>	<b>Objetivo General</b> .....	<b>17</b>
<b>1.5.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>1.6</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>17</b>
<b>1.7</b>	<b>Organización y contribución de la tesis</b> .....	<b>18</b>
	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>Arreglo de antenas</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelo matemático</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Polinomios de agrupación</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Distribución de corrientes típicas</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Uniforme</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Triangular</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Binómica</b> .....	<b>27</b>
<b>2.5</b>	<b>Tipos de agrupaciones</b> .....	<b>29</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Arreglo Circular</b> .....	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>Técnicas de control inteligente</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Redes Neuronales ADALINE</b> .....	<b>32</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Introducción Biológica</b> .....	<b>32</b>

3.2.2	Estructura de un sistema neuronal artificial.....	32
3.2.3	Modelo de neurona artificial.....	32
3.2.4	Arquitecturas de redes neuronales.....	33
3.2.5	Modos de operación.....	35
3.2.6	El perceptron simple.....	36
3.2.7	Algoritmo de aprendizaje del perceptron.....	37
3.2.8	Neurona Lineal ADALINE.....	38
3.2.9	Regla LMS o regla Delta.....	39
3.3	Lógica Difusa.....	40
3.3.1	Introducción.....	40
3.3.2	Conjuntos Difusos.....	40
3.3.3	Funciones de inclusión o de pertenecia de conjuntos difusos.....	41
3.3.4	Variables lingüísticas.....	42
3.3.5	Medidas Difusas.....	43
3.3.6	Operaciones Difusas.....	45
3.3.7	Reglas Difusas.....	45
3.3.8	Máquina de interferencia.....	46
3.3.9	Fuzzyficador.....	47
3.3.10	Desfuzzyficador.....	48
3.4	Algoritmos evolutivos.....	49
3.4.1	Introducción.....	49
3.4.2	Métodos de selección.....	49
3.4.3	Operador evolutivo.....	52
	METODOLOGÍA.....	57
4	Aplicación de control de arreglo de antenas con técnica ADALINE.....	58
4.1	Para un usuario con técnica ADALINE.....	59
4.1.1	Entorno de aplicación para un usuario final con técnica ADALINE.....	59
4.1.2	Resultados ADALINE con arreglo para un usuario final.....	60
4.1.3	Análisis de resultados usuario final con técnica ADALINE.....	69
4.2	Para una radio base AP con técnica ADALINE.....	70
4.2.1	Entorno de aplicación ara una radio base AP con técnica ADALINE.....	70
4.2.2	Resultados con arreglo para una radio base AP con técnica ADALINE.....	71

4.2.3	Análisis de resultados para radio base o AP con ADALINE.....	80
<b>5</b>	<b>Aplicación de control de arreglo de antenas con lógica Difusa .....</b>	<b>81</b>
5.1	Para un usuario con lógica difusa .....	88
5.1.1	Entorno de aplicación para un usuario con lógica difusa .....	88
5.1.2	Resultados con arreglo para un usuario con lógica difusa.....	89
5.1.3	Análisis de resultados con lógica difusa para un usuario final.....	98
5.2	Para un radio base o AP con lógica difusa.....	99
5.2.1	Entorno de aplicación para una radio base o AP con lógica difusa.....	99
5.2.2	Resultados con arreglo para una radio base o AP con lógica difusa.....	100
5.2.3	Análisis de resultados para una radio base o AP con lógica difusa .....	109
<b>6</b>	<b>Aplicación de control de arreglo de antenas con algoritmos evolutivos .....</b>	<b>110</b>
6.1	Para un usuario con algoritmos evolutivos .....	112
6.1.1	Entorno de aplicación para un usuario con algoritmos evolutivos.....	112
6.1.2	Resultados con arreglo lineal con algoritmos evolutivos mutación para un usuario final. 113	
6.1.3	Análisis de resultados para un usuario final con algoritmos evolutivos-mutación	122
6.1.4	Resultados con arreglo lineal para un usuario con algoritmos evolutivos cruce ...	123
6.1.5	Análisis de resultados para un usuario con algoritmos evolutivos-cruce.....	133
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	136
<b>7</b>	<b>Comparación de técnicas de control.....</b>	<b>136</b>
7.1	Comparación de técnicas de control para el usuario final. ....	137
7.2	Comparación de técnicas de control para una radio base o AP .....	139
<b>8</b>	<b>Diseño del controlador .....</b>	<b>140</b>
8.1	Diseño del controlador para usuario final.....	140
8.2	Diseño del controlador para una radio base o AP .....	142
	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	144
<b>9</b>	<b>Resultados y conclusiones del trabajo de investigación .....</b>	<b>144</b>
<b>10</b>	<b>Nuevas líneas de investigación .....</b>	<b>145</b>
	REFERENCIAS .....	146
	APÉNDICE.....	151



# Índice de tablas

<b>Tabla 1: Cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control de arreglo de antenas de los artículos más relevantes.....</b>	<b>10</b>
Tabla 2 Parámetros del análisis con técnica de control ADALINE para un usuario final .....	60
Tabla 3 Resultados de la simulación con red ADALINE para un usuario final.....	65
Tabla 4 Estadística descriptiva para ADALINE para la variable Número de iteraciones para un usuario final	68
Tabla 5 Estadística descriptiva para ADALINE para la variable Error para un usuario final.....	68
Tabla 6 Análisis por cuadrante de las iteraciones con ADALINE para un usuario final .....	69
Tabla 7 Análisis por cuadrante del error con ADALINE para un usuario final.....	69
Tabla 8 Parámetros del análisis con técnica de control ADALINE para radio base o AP .....	71
Tabla 9 Resultados de la simulación con red ADALINE para una radio base o AP .....	76
Tabla 10 Estadística descriptiva para ADALINE para la variable Número de iteraciones para una radio base o AP .....	79
Tabla 11 Estadística descriptiva para ADALINE para la variable Error para una radio base o AP .....	79
Tabla 12 Análisis por cuadrante de las iteraciones con ADALINE para una radio base o AP .....	80
Tabla 13 Análisis por cuadrante del error con ADALINE para una radio base o AP .....	80
Tabla 14 Descripción de la variable ruido control difuso.....	84
Tabla 15 descripción de la variable error para control difuso .....	84
Tabla 16 Descripción de la variable de salida de fase para control difuso .....	85
Tabla 17 Reglas difusa para el control del patrón de radiación .....	86
Tabla 18 Reglas difusa para el control del patrón de radiación para el ejemplo .....	87
Tabla 19 Parámetros del análisis con técnica de control difuso .....	88
Tabla 20 Resultados de la simulación con control difuso para un usuario final .....	94
Tabla 21 Estadística descriptiva para control difuso para la variable Número de iteraciones para un usuario final.....	97
Tabla 22 Estadística descriptiva para control difuso para el error para un usuario final .....	97
Tabla 23 Análisis de iteraciones por cuadrante con control difuso para un usuario final .....	98
Tabla 24 Análisis de error por cuadrante con control difuso para un usuario final.....	98
Tabla 25 Parámetros del análisis con técnica de control difuso para una radio base o AP.....	100
Tabla 26 Resultados de la simulación con control difuso para una radio base o AP.....	105
Tabla 27 Estadística descriptiva para control difuso para la variable Número de iteraciones para una radio base o AP .....	108
Tabla 28 Estadística descriptiva para control difuso para la variable error para una radio base o AP.....	108
Tabla 29 Análisis de iteraciones por cuadrante con control difuso para una radio base o AP.....	109
Tabla 30 Análisis de error por cuadrante con control difuso para una radio base o AP.....	109
Tabla 31 Parámetros del análisis con técnica de control con algoritmos evolutivos .....	112
Tabla 32 Resultados de la simulación con control con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario final .....	118
Tabla 33 Estadística descriptiva para control con algoritmos evolutivos-mutación para la variable Número de iteraciones para un usuario final.....	121
Tabla 34 Estadística descriptiva para control con algoritmos evolutivos-mutacio para la variable error para un usuario final.....	121

<i>Tabla 35 Análisis de iteraciones por cuadrante con control con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario final.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 36 Análisis de error por cuadrante con control con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario final.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 37 Resultados de la simulación con control con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario final....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 38 Estadística descriptiva para control con algoritmos evolutivos-cruce para la variable Número de iteraciones para un usuario final .....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 39 Estadística descriptiva para control con algoritmos evolutivos-cruce para la variable error para un usuario final.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 40 Análisis de iteraciones por cuadrante con control con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario final.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 41 Análisis de error por cuadrante con control con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario final .....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 42 cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control para el arreglo de antenas lineal para un usuario final.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 43 cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control elegidas para el arreglo de antenas lineal para un usuario final .....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 44 cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control para el arreglo de antenas circular para una radio base o AP.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 45 cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control elegidas para el arreglo de antenas circular para una radio base o AP.....</i>	<i>140</i>

# Índice de figuras

Figura 1 Comparación de sistema MIMO con diferentes números de antenas. Tomada de (García & Rubio, 2006).....	2
Figura 2 Comparación de sistema MIMO con diferentes números de antenas. Tomada de (García & Rubio, 2006).....	3
Figura 3 Comparación de un sistema SISO contra un sistema MISO de $2 \times 1$ . Tomada de (Chun, 2004).....	3
Figura 4 Comparación de un sistema MISO $5 \times 1$ contra un sistema MISO de $2 \times 1$ . Tomada de (Chun, 2004) ....	4
Figura 5 Comparación de un sistema SISO contra un sistema MISO de $5 \times 1$ . Tomada de (Chun, 2004).....	4
Figura 6 Respuesta de un sistema MIMO de $2 \times 2$ arreglo de antenas. Tomada de (Chun, 2004).....	5
Figura 7 Arreglo de N Fuentes isotrópicas radiando a un punto P dado. (Fuente: Autor).....	21
Figura 8 Arreglo lineal de antenas para campo lejano. (Fuente: Autor) .....	22
Figura 9 Diagrama cartesiano de un arreglo lineal uniforme de 4 elementos (Fuente: Autor) .....	25
Figura 10 Diagrama Polar de un arreglo lineal uniforme de 4 elementos (Fuente: Autor) .....	25
Figura 11 Diagrama cartesiano de un arreglo lineal triangular de 5 elementos (Fuente: Autor) .....	26
Figura 12 Diagrama Polar de un arreglo lineal triangular de 5 elementos (Fuente: Autor).....	27
Figura 13 Triangulo de tartaglia.....	28
Figura 14 Diagrama cartesiano de un arreglo lineal binomial de 4 elementos (Fuente: Autor) .....	29
Figura 15 Diagrama Polar de un arreglo lineal binomial de 4 elementos (Fuente: Autor).....	29
Figura 16 Arreglo circular de antenas de N elementos. (Fuente: Autor) .....	31
Figura 17 Modelo de una Neurona artificial. (Fuente: Autor) .....	33
Figura 18 Modelo de una Neurona estándar (Fuente: Autor) .....	34
Figura 19 Modelo de una Red Neuronal multicapa (Fuente: Autor).....	35
Figura 20 Modelo de una Red Neuronal monocapa realimentada (Fuente: Autor) .....	35
Figura 21 Perceptrón simple. (Fuente: Autor) .....	36
Figura 22 Algoritmo de aprendizaje del Perceptrón simple. (Fuente: Autor) .....	38
Figura 23 Función de pertenencia triangular (Fuente: Autor) .....	42
Figura 24 Componentes de un sistema borroso (Fuente: Autor).....	48
Figura 25 Distribución por el método de selección de la ruleta (Fuente: Autor).....	50
Figura 26 cruce en un punto (Fuente: Autor).....	52
Figura 27 cruce en dos puntos (Fuente: Autor).....	53
Figura 28 cruce uniforme (Fuente: Autor) .....	53
Figura 29 cruce uniforme con mascara para codificación (Fuente: Autor).....	54
Figura 30 Mutación en algoritmos evolutivos (Fuente: Autor).....	54
Figura 31 Diagrama de flujo de algoritmos evolutivo (Fuente: Autor).....	55
Figura 32 Modelo de control de fase con técnica de control ADALINE (Fuente: Autor) .....	59
Figura 33 Diagrama en coordenadas polares del patrón de radiación lineal uniforme ADALINE a treinta grados (Fuente: Autor) .....	61
Figura 34 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal uniforme ADALINE a treinta grados (Fuente: Autor) .....	61
Figura 35 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal uniforme ADALINE a treinta grados (Fuente: Autor) .....	61
Figura 36 Figura polar del patrón de radiación lineal triangular ADALINE a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	62

Figura 37 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal triangular ADALINE a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	62
Figura 38 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal triangular ADALINE a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	63
Figura 39 Figura polar del patrón de radiación lineal binomial ADALINE a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	63
Figura 40 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal binomial ADALINE a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	64
Figura 41 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal binomial ADALINE a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	64
Figura 42 Figura polar del patrón de radiación circular uniforme ADALINE para radio base o AP a treinta grados (Fuente: Autor) .....	72
Figura 43 Figura cartesiana del patrón de radiación circular uniforme ADALINE para radio base o AP a treinta grados (Fuente: Autor).....	72
Figura 44 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular uniforme ADALINE para radio base o AP a treinta grados (Fuente: Autor).....	72
Figura 45 Figura polar del patrón de radiación circular triangular ADALINE para radio base o AP a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	73
Figura 46 Figura cartesiana del patrón de radiación circular triangular ADALINE para radio base o AP a doscientos diez grados. (Fuente: Autor) .....	73
Figura 47 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular triangular ADALINE para radio base o AP a doscientos diez grados. (Fuente: Autor) .....	74
Figura 48 Figura polar del patrón de radiación circular binomial ADALINE para radio base o AP a trescientos treinta grados (Fuente: Autor).....	74
Figura 49 Figura cartesiana del patrón de radiación circular binomial ADALINE para radio base o AP a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	75
Figura 50 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular binomial ADALINE para radio base o AP a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	75
Figura 51 Modelo de control de fase con técnica de control difuso (Fuente: Autor).....	82
Figura 52 Conjuntos difuso para el ruido (Fuente: Autor) .....	83
Figura 53 Conjuntos difuso para el error (Fuente: Autor).....	83
Figura 54 Conjuntos difuso para la fase (Fuente: Autor).....	85
Figura 55 Resultado del máximo para el error para ejemplo de control difuso (Fuente: Autor).....	86
Figura 56 Resultado del máximo para el ruido para ejemplo del control borroso (Fuente: Autor).....	87
Figura 57 Resultado SOM para la fase para el ejemplo del control borroso. (Fuente: Autor).....	88
Figura 58 Figura polar del patrón de radiación lineal uniforme difuso para un usuario final a treinta grados (Fuente: Autor) .....	89
Figura 59 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal uniforme difuso para un usuario final a treinta grados (Fuente: Autor) .....	90
Figura 60 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal uniforme difuso para un usuario final a treinta grados (Fuente: Autor).....	90
Figura 61 Figura polar del patrón de radiación lineal triangular difuso para un usuario final a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	91
Figura 62 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal triangular difuso para un usuario final a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	91

Figura 63 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal triangular borroso para un usuario final a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	92
Figura 64 Figura polar del patrón de radiación lineal binomial difuso para un usuario final a trescientos treinta grados (Fuente: Autor).....	92
Figura 65 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal binomial difuso para un usuario final a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	93
Figura 66 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal binomial difuso para un usuario final a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	93
Figura 67 Figura polar del patrón de radiación circular uniforme difuso para una radio base o AP a treinta grados (Fuente: Autor) .....	101
Figura 68 Figura cartesiana del patrón de radiación circular uniforme difuso para una radio base o AP a treinta grados (Fuente: Autor).....	101
Figura 69 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular uniforme difuso para una radio base o AP a treinta grados .....	102
Figura 70 Figura polar del patrón de radiación circular triangular difuso para una radio base o AP a doscientos diez grados (Fuente: Autor).....	102
Figura 71 Figura cartesiana del patrón de radiación circular triangular difuso para una radio base o AP a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	103
Figura 72 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular triangular difuso para una radio base o AP a doscientos diez grados (Fuente: Autor).....	103
Figura 73 Figura polar del patrón de radiación circular binomial difuso para una radio base o AP a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	103
Figura 74 Figura cartesiana del patrón de radiación circular binomial difuso para una radio base o AP a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	104
Figura 75 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular binomial difuso para una radio base o AP a trescientos treinta grados (Fuente: Autor).....	104
Figura 76 Figura polar del patrón de radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a treinta grados (Fuente: Autor).....	113
Figura 77 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a treinta grados (Fuente: Autor).....	114
Figura 78 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a treinta grados (Fuente: Autor).....	114
Figura 79 Figura polar del patrón de radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a doscientos diez grados (Fuente: Autor).....	115
Figura 80 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....	115
Figura 81 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a doscientos diez grados (Fuente: Autor).....	116
Figura 82 Figura polar del patrón de radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....	116
Figura 83 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a trescientos treinta grados (Fuente: Autor).....	117
Figura 84 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a trescientos treinta grados (Fuente: Autor).....	117
Figura 85 Figura polar del patrón de radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a treinta grados (Fuente: Autor) .....	124

<i>Figura 86 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a treinta grados (Fuente: Autor) .....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 87 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a treinta grados (Fuente: Autor).....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 88 Figura polar del patrón de radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a doscientos diez grados (Fuente: Autor).....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 89 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a doscientos diez grados (Fuente: Autor).....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 90 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a doscientos diez grados (Fuente: Autor) .....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 91 Figura polar del patrón de radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a trescientos treinta grados (Fuente: Autor).....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 92 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a trescientos treinta grados (Fuente: Autor).....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 93 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a trescientos treinta grados (Fuente: Autor) .....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 94 Arquitectura y diseño de un controlador para un usuario final con tecnica difusa (Fuente: Autor) .....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 95 Arquitectura y diseño de un controlador para para una radio base o AP con tecnica difusa (Fuente: Autor) .....</i>	<i>143</i>

Parte 1  
Problemática, estado del arte y  
planteamiento del problema

# INTRODUCCIÓN

## 1 Descripción del proyecto

### 1.1 Antecedentes y justificación

Durante el proceso de formación profesional y laboral se ha observado las diferentes dificultades que se presentan en redes inalámbricas en aspectos como ancho de banda, capacidad, interferencia, uso de potencia etc., que afectan el desempeño y la buena prestación del servicio en este tipo de tecnología.

Dentro del estudio realizado por otros investigadores relacionados con el tema de redes inalámbricas se observa que muchos de ellos, manifiestan inquietudes similares; inclusive algunos han desarrollado trabajos con sistemas MIMO con arreglo de antenas con el fin de mejorar el desempeño de dichas redes.

En estos trabajos se puede observar que el uso de la técnica de multiplexación de espacio SDMA optimiza el ancho de banda, mejora la eficiencia espectral y el desempeño del sistema. Esto lo podemos comprobar en las figuras 1 y 2, donde se presentan diferentes simulaciones de celdas

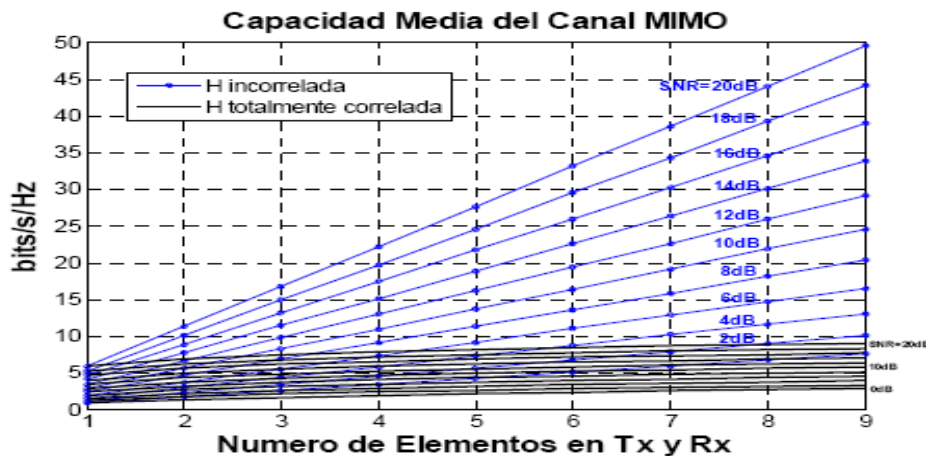


Figura 1. Comparación de sistema MIMO con diferentes números de antenas.

Fuente: Tomada de García & Rubio, 2006.

De la Fig. 1 se puede observar que a medida que se tiene mayores elementos del sistema MIMO (el arreglo de antenas) se obtiene una mayor eficiencia del espectro radioeléctrico.



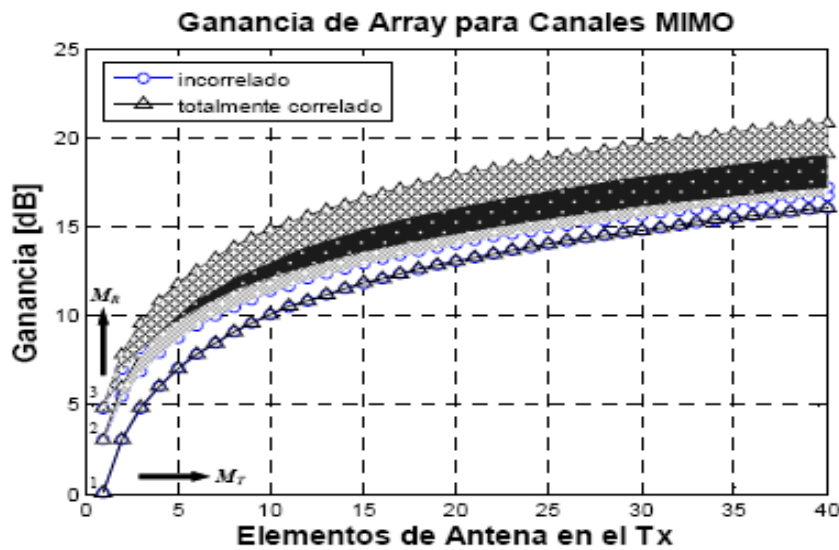


Figura 2. Comparación de sistema MIMO con diferentes números de antenas.

Fuente: Tomada de García & Rubio, 2006.

De acuerdo a las Figuras 2, 3, 4, 5 Y 6 se observa que a medida que aumenta el número de elementos de un sistema MIMO de arreglo de antenas se incrementa la ganancia del sistema, lo cual optimiza el uso de potencia de los dispositivos que lo conforman.

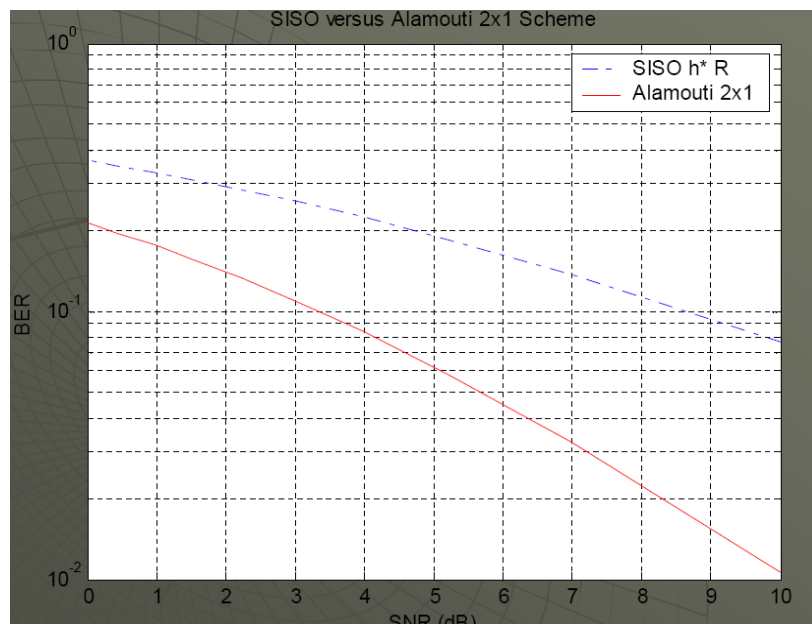


Figura 3. Comparación de un sistema SISO contra un sistema MISO de 2\*1.

Fuente: Tomada de Chun, 2004.

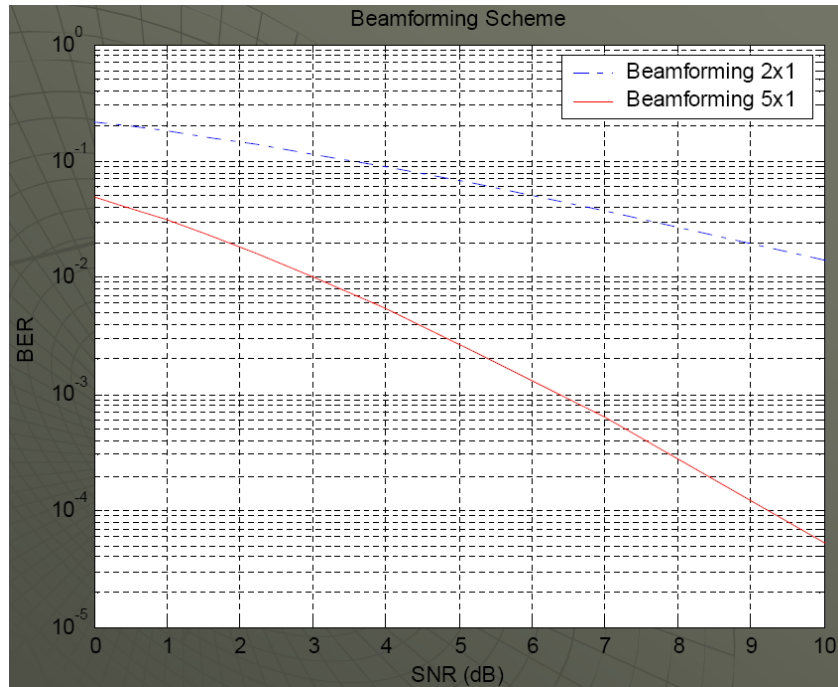


Figura 4 Comparación de un sistema MISO 5\*1 contra un sistema MISO de 2\*1.

Fuente: Tomada de (Chun, 2004).

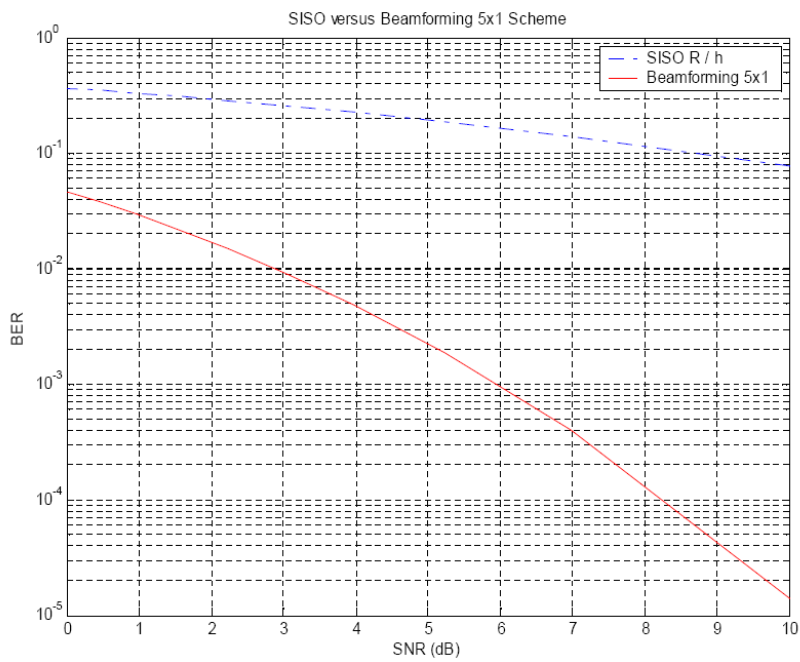
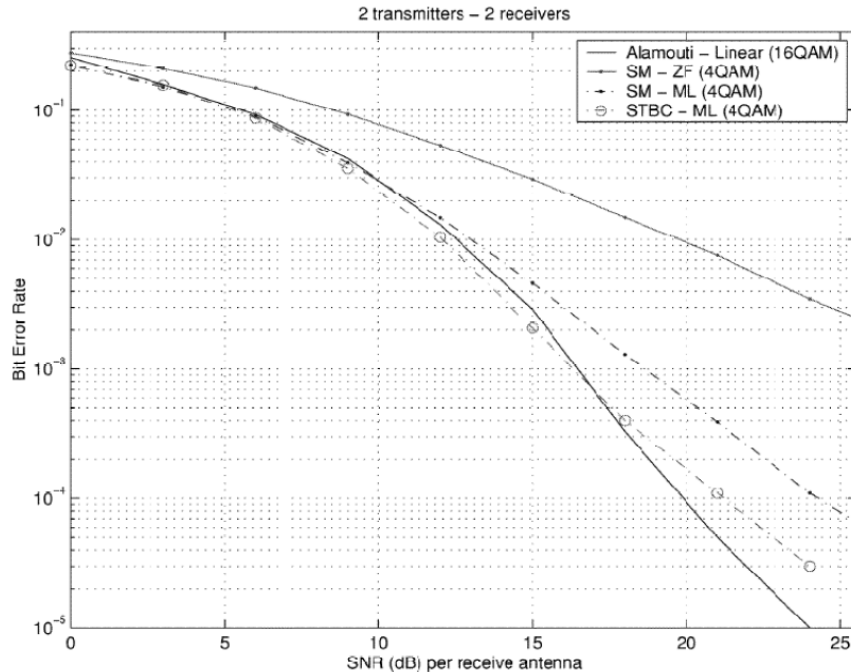


Figura 5. Comparación de un sistema SISO contra un sistema MISO de 5\*1.

Fuente: Tomada de Chun, 2004.



**Figura 6. Respuesta de un sistema MIMO de 2\*2 arreglo de antenas.**

Fuente: Tomada de Chun, 2004.

De las gráficas 3, 4, 5 y 6 se puede concluir que:

- A mayor número de antenas del arreglo se tiene mayor complejidad, aunque esto mejora sustancialmente el BER (Bit Error Rate).
- Debido al incremento de la tecnología de sistemas inalámbricos se requieren sistemas que ofrezcan grandes capacidades. Se vislumbra que una solución con antenas inteligentes (Sistemas MIMO) tanto en la estaciones Base como en los equipos portátiles de los usuarios, logra este objetivo.
- Un aspecto importante que se incluye cuando se usa un esquema SDMA y que algunos autores lo entrevén, es la mejora de la seguridad informática, ya que debido a los haces de enlaces construidos por el arreglo de antenas tan estrechos y dirigidos, tanto desde la radio base como del usuario terminal, disminuye la probabilidad de interferencia del tráfico por usuarios no deseados que se encuentran alrededor.

De todo lo anterior y teniendo en cuenta que en la actualidad el uso de redes inalámbricas se está usando en forma masiva, debido factores como movilidad, facilidad de instalación

y expansión; SDMA se convierte en una técnica que permite atenuar los efectos de los cuales adolece y de esta manera mejorar el desempeño y poder garantizar su uso y permanencia en el tiempo.

Las compañías de telecomunicaciones y a todos aquellos que usan esta infraestructura inalámbrica como elemento integrador de servicios, pueden usar celdas de redes inalámbricas SDMA como alternativa.

Todas aquellas compañías del sector telecomunicaciones pueden usar SDMA y construir redes inalámbricas a la medida de sus necesidades. Esta tecnología puede estar en el alcance de grandes, medianas y pequeñas empresas

El desarrollo de este proyecto tiene como beneficio permitir a los diseñadores y usuarios de redes inalámbricas, una alternativa que garantice el mejor desempeño de las redes, donde se optimicen parámetros de potencia, ancho de banda entre otros. También identificar y comparar diferentes técnicas de control y de arreglo de antenas para diferentes arquitecturas de redes inalámbricas.

Dentro de la tecnología de antenas inteligentes se han encontrado diversas tesis de grados y niveles de implementación, dentro de las cuales debemos destacar los siguientes elementos:

- Desarrollo de algoritmos de control
- Implementación de arreglos experimentales
- Análisis de estructuras físicas de arreglo para antenas inteligentes

Para el primer caso tenemos las siguientes experiencias:

### **1.1.1 Desarrollo de los algoritmos**

La universidad de Zaragoza, junto con otras investigaciones han estudiado y diseñado agrupaciones de antenas inteligentes de haz adaptativo. Para ello se desarrollan un programas que control de la alimentación de cada una de las antenas que conforman la agrupación para que el diagrama de radiación de esta se adapte a las condiciones del entorno.

Se investigó varias agrupaciones con diferentes características: diversas geometrías, número de elementos y separación entre antenas. De este modo permite dar argumentos a tener en consideración a la hora de diseñar una agrupación real.

Se hizo el uso de métodos numéricos para la implementación de los algoritmos genéticos, como sistema de control, ya que se requiere alta velocidad en la respuesta del sistema.

Se plantea un orden creciente de complejidad en la manera cómo afronta el problema. Desde los sistemas de estación base más sencillos (antena simple omnidireccional) hasta los más sofisticados (agrupación de antenas inteligentes de haz adaptativo). También aporta la base teórica necesaria para el desarrollo de los cálculos en la simulación. Explican la estructura y los operadores necesarios en el uso de algoritmos genéticos. Y finalmente presenta los resultados que se han obtenido mediante las simulaciones y las conclusiones pertinentes.

Se presentan algunos algoritmos adaptativos como LMS y el RLS, que son sometidos a un análisis matemático para su posterior simulación vía MatLab. Éstos se escogen por su relación con un algoritmo híbrido desarrollado (LMS/RLS). Cada algoritmo es evaluado respecto a diferentes parámetros tales como convergencia, rapidez, estabilidad, etc.

Dentro de sus conclusiones en estos trabajos se ha mostrado las características y evolución de las estaciones base de comunicaciones inalámbricas, con un repaso general desde los sistemas más simples a los más sofisticados, todavía en fase de estudio en la actualidad, como son las agrupaciones adaptativas.

Se ha puesto de manifiesto la versatilidad de las agrupaciones bidimensionales de antenas, así como la eficiencia y rapidez en la respuesta si se controlan mediante el uso de algoritmos genéticos.

Se hicieron ensayos con diferentes geometrías bidimensionales y con diversos espaciados entre antenas. No se pudo encontrar una ventaja clara de ninguna de las geometrías ni de ninguno de los espaciados.

Muestran las diferencias entre geometrías, separación entre elementos y número de antenas, que ayuda al diseñador la elección adecuada de estos parámetros para la aplicación en un sistema real, valorando factores como la densidad interferente del entorno. Aunque no se ha tenido en cuenta en el trabajo, elementos como el precio de los componentes y la dificultad técnica de construcción.

Se hace un análisis de las ventajas de los diferentes algoritmos de implementación para el sistema de control de antenas inteligentes en una red inalámbrica, donde se llega a conclusiones como:

- El LMS es un algoritmo simple, de baja convergencia y estable. Tiene un buen comportamiento en ambientes invariables.

- El RLS es un algoritmo más complejo, de mayor convergencia que su par LMS. Esto se atribuye al cálculo directo del vector de peso óptimo, a través del uso de la inversión de matrices, lo cual hace al sistema más costoso y complejo. Este algoritmo es ideal en ambientes altamente dinámicos, ya que tiene una rápida respuesta frente a los cambios del medio.
- Se diseñó un algoritmo referido como RLS/LMS. Éste posee la simplicidad del LMS con una mayor convergencia, superior a la que puede entregar el LMS. Este utiliza las ponderaciones iniciales calculadas a través de inversión de matrices (RLS) y la adaptación es obtenida usando procedimiento iterativo LMS. Esta técnica es menos intensa computacionalmente, debido al uso de inversión de matriz sólo al comienzo del algoritmo. (Gabal, 2008; Espinosa & Villarroel, 2007).

En cuanto a las técnicas o modos de controlar la fase y la potencia de los diferentes arreglos se encontraron diversas investigaciones. Se muestran desde los más elaborados con técnicas avanzadas con dispositivos activos y circuitos integrados hasta los más simples ON-OFF.

Dentro del análisis se pueden agrupar en tres grandes grupos. Los análogos que controlan las condiciones del arreglo cambiando características del material o generando deformaciones sobre los elementos radiantes (Babich et. al, 2007; HUTU et. al, 2009; Arias et. Al, 2009; Azhar, 2010), los ON-OFF que lo que se ejerce es una inclusión o exclusión de los elementos del arreglo, (HUTU et. al, 2009; Liu et. al, 2010; Alshami & Aboulmour, 2009) , los que ejercen cambios de potencia y fase con una matriz de butler NXN (Mitra et. al, 2010; Manasson & Sadovnik, 1998) y los de control más avanzado y elaborados como controles adaptativos con algoritmos genéticos y usando FPGA en algunos casos (Bialkowski et. al, 2008 ;Abdolee et. al, 2009; Ammula et. at, 2010; Gabal, 2008; Espinosa & Villarroel, 2007; Martinez, 2006). Cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas. Los que usan modo de control ON-OFF son simples y fáciles de implementar aunque requieren muchos elementos radiantes para conseguir gran versatilidad para obtener patrones de radiación selectivos y diversos. Los adaptativos permiten generar diferentes patrones de radiación muy direccionales (con el uso de algoritmos de conformación de haz LMS, RLS y combinación de ellos) y con pocos elementos radiantes (Espinosa & Villarroel, 2007). Son complicados y lentos en respuesta debido a que usan algoritmos complejos. Los análogos también permiten obtener patrones de radiación adecuados con pocos elementos, son rápidos en respuesta aunque son muy complejos desde el punto de vista de radiofrecuencia ya que son muy sensibles a cambios de impedancia, por ende el acople de potencia cuando se ejerce modulación en la portadora de entrada de cada elemento del arreglo se dificulta.

Algunos autores presentan soluciones con arreglo de antenas cuyo control adaptativo se ejecuta con técnicas de enjambre de partículas optimizado.

### **1.1.2 Implementación de arreglos experimentales**

Algunas tesis y trabajos de investigación, describen el uso de un prototipo de una antena inteligente y explica y evalúa su funcionalidad. Los sistemas prototipo se compone de una matriz de dipolos con 8 elementos a la cual se le observa y analiza la conducta adaptativa que se obtiene modificando el conjunto de pesos de matriz con moduladores de vectores por medio de elementos electrónicos (Benedetti et. al, 2009; Harrold et. Al,2006; Jin et. al, 2008) .

Se analiza la reacción en tiempo real en diferentes escenarios de interferencia, usando controles desarrollados por módulos de software basado en la técnica de enjambre de partículas optimizado.

Se reprodujeron distintas interferencias del canal, se analizan y se documentan con el fin de mostrar en forma ordenada los resultados e identifica las dificultades de implementación de los algoritmos de control utilizado.

En estos trabajo, se realizó en forma experimental con una matriz totalmente adaptable de arreglo de antenas, que permitió caracterizar el comportamiento del algoritmo de control y se validan en forma práctica el control adaptativo

Se plantea la posibilidad de modelar estructuras más compactas, útil para la integración en dispositivos inalámbricos de pequeño tamaño (por ejemplo, las estaciones móviles y sensores inalámbricos).

Otros hablan de la integración de antenas inteligentes en la tecnología tercera de generación. En este, se analiza y se describe las implementaciones de algunos algoritmos compatibles con la formación de haz con CDMA, usando familias FPGAs Xilinx Virtex. Este estudio muestra la viabilidad de la aplicación, incluso de una manera computacional, de algoritmos basadas en tecnologías más poderosas como FPGA (Dikmese et. Al, 2007).

Las implementaciones se hacen con sistema de 16 y de 32 bits en coma flotante utilizando Virtex II y FPGAs Virtex IV.

Los resultados de la ejecución en términos de formación de haz, se presentan mostrando la exactitud, la utilización de recursos FPGA, el vector de pesos, el tiempo cómputo, y la estimación del error que se presentan en los vectores conformador peso en las DOA's

(Direction-of-arrivals). También muestran que para el algoritmo de LMS puede calcular en menos de 20  $\mu$ s en Virtex II FPGA y 10  $\mu$ s en FPGA Virtex IV.

Verifican además que FPGAs proporcionan, aproximadamente 500 veces mayor velocidad que en las implementaciones que usan DSPs. La evaluación del desempeño de los FPGA, se hace comparando los conformadores de CDMA2000 en términos de uso de recursos FPGA, el tiempo de computación del vector pesos, y la estimación del error DOA o la precisión formación de haz.

En cuanto al tipo de construcción algunos autores plantean el uso de microstrip y polímeros deformables para la construcción del arreglo (Mahanfar et. al, 2008; Gentner et. Al, 2010).

En el caso de microstrip el control del arreglo se ejecuta con dispositivos lógicos programables y en el caso de los polímeros deformables ofrecen la posibilidad de deformar el arreglo con un voltaje que se inyectan a cada elemento del al arreglo consiguiendo diferentes patrones radiación.

En la tabla 1 se muestra un resumen rápido de los tipos de arreglos implementados con algunas características encontradas en los artículos.

**Tabla 1:**

**Cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control de arreglo de antenas de los artículos más relevantes**

Tipo de arreglo	Técnica de construcción	Forma de control de radiación	Ventajas	Desventajas	Referencia
No especificado	Antena microstrip	Vector de modulación para modificar la fase	Fácil implementación. Usa elementos comerciales/diseño del prototipo se acerca al análisis teórico/para latas frecuencias	No analiza la técnica de control de acuerdo al tipo de arreglo/no menciona el número de antenas	(HUTU et. al, 2009)



Circular	Antena microstrip	Se varia la corriente de alimentación de cada elemento de acuerdo al modo de propagación/para el control de la fase se usa dos arreglos separados ortogonalmente que puedan ser suicheados de acuerdo a los requerimientos del patrón de radiación.	Fácil de implementación del arreglo/para altas frecuencias	No muestra claramente la técnica de control	(Piazza et. al, 2009)
No especificado	Antena microstrip con metamateriales	Control se logra variando la estructura del sustrato donde se construye el parche de la antena consiguiendo diferentes modos de propagación. Para esto se requiere adicionalmente dispositivos activos	Facilidad de control para conseguir diferentes patrones de radiación	Difícil de implementación ya que se usan materiales no muy comunes en el comercio	(Mitra et. al, 2010)
Circular/Lineal	Antena microstrip con metamateriales	El control se consigue usando diodos varactores que permiten que un elemento radiante microstrip participe o no dentro del arreglo circular/lineal	Fácil de implementación usa elementos comerciales/control On Off	Difícil de construir diferentes patrones /limitados para cambios de fase y potencia. Solamente cambia el número de elementos radiantes que participan en el arreglo	(Liu et. al, 2010)
Circular	Mono polo con plano a tierra de cobre	El control es una optimización de la antena .no es dinámico es fija /usa algoritmos genéticos	fácil de construcción /usa elementos comerciales	Control fijo no dinámico/difícil acople de reactancias /para bajas frecuencias.	(Alshami & Aboulnour 2009)
No especificado	Antena microstrip con múltiples capas	El control se realiza a través de una matriz de butler 4X4 y 8X8 para cambiar la fase y amplitud de cada elemento radiante	Medianamente compleja la implementación/para altas frecuencias	Limitada en el control para fase y potencia /puede ser compleja su construcción con el sistema de microstrip multi capa	(Bialkowski et. al, 2008)

Lineal	Mono polo con plano a tierra	Control con FPGA/DAC usando los coeficientes de dolph-cheyshevs para cambio de potencia de cada elemento radiante	fácil construcción/usa elementos comerciales /fácil control /para altas frecuencias	Costoso/control complejo	(Abdolee et. al, 2009)
Dual circular	Mono polo con plano a tierra	Control On Off cortocircuitando algunos elementos del arreglo(24 a lo largo de los dos anillos) cambiando la longitud y por ende de la fase (30 grados)	fácil construcción/usa elementos comerciales /fácil control /para altas frecuencias	Gran número de elementos radiantes	(Ammula et. at, 2010)
Circular	Antena microstrip	Control On Off de cada elemento radiante para generar diferentes patrones de radiación. Usa elementos pasivos y activos para ejercer cambios de potencia y fase	Para altas frecuencias	control complejo	(Azhar, 2010)
Triangular conformado por grupo de tres elementos	Antena microstrip	Control adaptativo. no menciona exactamente como se ejerce el control o bajo que técnica	es muy versátil para generar diferentes patrones de radiación/ su construcción es con elementos comunes del mercado/para altas frecuencias	control complejo/gran número de elementos radiantes	(Arias et. Al, 2009)
Dual circular	Mono polo con plano a tierra	Control adaptativo usando dispositivos activos y pasivos. Lo diseña en forma análoga y digital	es muy versátil para generar diferentes patrones de radiación/ su construcción es con elementos comunes del mercado/para altas frecuencias	No se clarifica como es el acople y la alimentación de cada elemento radiante	(Huang, 2007)
no especificado	dispositivo de estado sólido como guía de onda milimétrica/circuito integrado monolítico	Control óptico y haciendo suicheo con electrodos	fácil control/versátil/compacto	costoso/construcción compleja	(Manasson & Sadovnik, 1998)
circular/lineal	no especificado	no especificado/realiza una comparación entre los diferentes arreglos de antenas sus ventajas y desventajas	NA	NA	(Jin et. al, 2008)

no especificado	Polímero deformable	Se controla la forma del elemento radiante usando voltaje que se inyecta al polímero	versátil/control simple	No se puede construir con materiales de fácil consecución en el mercado	(Mahanfar et. al, 2008)
Diferentes arquitecturas	Antena microstrip	su control es con un Complex Programable Logic Device (CLPD)	versátil/control simple/altas frecuencias	Dispositivo de control complejo	(Gentner et. Al, 2010)
Planar	Mono polo con plano a tierra/Micro strip para la matriz de buttler	El control se realiza con una matriz de buttler 2X2 para cambiar la fase y amplitud de cada elemento radiante	Medianamente compleja la construcción/para altas frecuencias	Limitado en el control para fase y potencia/puede ser compleja su construcción	(Uthansakul & Uthansakul, 2008)

### 1.1.3 Pruebas pilotos con arreglos de diferentes configuraciones MIMO-SIMO

Hay estudios sobre la formación de haz usando un arreglo MIMO y analizado en tecnologías tales como IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.16e (WiMAX), IEEE 802.20, y las evoluciones de los sistemas 3G. Aunque se hace un especial análisis de los sistemas 3G y WiMAX, y en particular el uso de antenas inteligentes y MIMO en la técnica multiplexación de división de frecuencia duplex (FDD) (Honglin et. al, 2006).

Se analizan aspectos como:

- Operación de los sistemas celulares y de banda ancha.
- La complejidad del receptor (antenas del receptor, complejidad de cómputo).
- Aspectos del sistema (por ejemplo, la gestión de recursos de radio).
- Aplicaciones variando diferentes elementos y cómo estos problemas pueden afectar a la elección de una solución adecuada multi-antena o su viabilidad en la práctica de los sistemas inalámbricos.

También se plantea la manera de modelar y construir un sistema MIMO para los diferentes tipos de redes inalámbricas planteadas, teniendo en cuenta aspectos de normalización establecidos por la IEEE centrándose especialmente en IEEE 802.16e.

En estas tesis se han resumido la formación de haz usando técnicas de sistemas MIMO, relacionándolos con sistemas normalizados y aplicaciones de 3G y IEEE 802.

En sistemas de pequeña escala, tales como IEEE 802.11n o IEEE 802.16 (WiMAX) que tienen por objeto proporcionar servicio en las células de tipo hotspot, el modelado y control con sistemas MIMO es potencialmente más aplicables y atractivo.

Además se observa que es probable que en un principio la formación de haz sea mucho más sencilla para sistemas de multiplexado espacial SDMA compuestos por dos antenas de transmisión y recepción y que por esta razón serán utilizados en los productos MIMO al principio del desarrollo de la tecnología.

La mayoría de las aplicaciones MIMO discutidos en diferentes artículos están relacionadas con los servicios dedicados, aunque deja la base para hacer análisis en el futuro, para servicios broadcast o multicast de tal manera que se logre mejorar la eficiencia espectral a través de MIMO con antenas inteligentes.

#### **1.1.4 Análisis de estructuras físicas de arreglo para antenas inteligentes**

Dentro del estudio de antenas inteligentes para SDMA, se plantea usar estructuras bidimensionales especialmente las circulares uniformes ya que se considera que esta estructura posee simetría acimutal, que lo hace atractiva para ser usada en radio bases (Martinez, 2006; Babich et. al, 2007; Mitra et. al, 2010).

Se enfocan en la síntesis del factor de agrupación con arreglos circulares, mediante, La solución de sistemas de ecuaciones no lineales, y el uso de algoritmos genéticos como sistema de control.

Dentro de las conclusiones en general se manifiesta que la configuración de los arreglos circulares uniformes (UCA) resulta muy atractiva, sobre todo en estaciones base de sistemas de comunicación móvil debido a la simetría acimutal inherente. Que a pesar de que existen avances importantes, todavía no se han dominado al grado de que se utilicen ampliamente y que sirvan para sustituir las estructuras de arreglos lineales uniformes (ULA) acomodadas en estructuras triangulares o cuadradas.

En el caso de los algoritmos de control, se analiza la técnica genética aplicada a la síntesis de factores de arreglo circulares, que, como muchos métodos heurísticos, requiere de la intervención humana para afinar los diversos parámetros involucrados, sin embargo los resultados son alentadores y el método invita a seguir explorando en ese sentido.

El objetivo principal de algunas investigaciones, es la evaluar la influencia que tiene la configuración geométrica de la agrupación de antenas sobre el rendimiento de red y el retraso de paquetes. Análisis y simulaciones se realizan para estudiar la relación entre la geometría de la matriz de la antena y la topología de la red. En algunos casos logran mostrar, la degradación del rendimiento de los pequeños canales debido a la posición angular y la velocidad de los nodos móviles.

Algunos autores concluyen que una configuración periódica de los radiadores (ULA, URA) puede no ser la solución más eficaz. Sin embargo, los resultados muestran que la elección óptima para la geometría de la matriz de antenas es dependiente de la topología de la red.

Las simulaciones muestran que una mayor eficiencia del arreglo de antenas se puede obtener cuando la longitud de los nulos del diagrama de radiación que reciben se coloca precisamente hacia direcciones no deseadas.

En los trabajos se observa la posibilidad de que en el futuro se presente un modelo analítico capaz de tomar en cuenta todos los elementos que pueden influir en el desempeño de una red distribuida en el dominio espacial, de tal manera que se tomen todos los elementos como la geometría de matriz de antenas, la topología, el ángulo propagación, modelo de canal espacial y el protocolo MAC.

## **1.2 Descripción del problema.**

Según la información anterior con respecto al estado del arte se observan los siguientes aspectos relevantes a superar:

- Todavía no se han diseñados drivers, para equipos terminales que usen un arreglo de antenas inteligentes.
- No se ha encontrado herramientas de simulación que permitan a los ingenieros de telecomunicaciones construir escenarios para realizar diseños acordes a las necesidades. Por ejemplo zonas de coberturas específicas donde se encuentran los usuarios con patrones de múltiples lóbulos y cada lóbulo asociado a un usuario estático o móvil.
- Todavía se encuentran grandes dudas con respecto a cuáles son las arquitecturas de arreglos de antenas y técnicas de control que se adecuan mejor a cierto tipos de topologías de redes inalámbricas.
- La posibilidad de usar técnicas de control adaptativo diferente a redes neuronales ADALINE. Ninguno plantea opciones diferentes como redes neuronales con función de activación o control difuso o algoritmos evolutivos.

## **1.3 Síntesis del problema.**

De acuerdo a estos aspectos expuestos, se considera de gran importancia realizar una investigación alrededor de un controlador de red inalámbrica usando la técnica SDMA aplicando técnicas como ADALINE (con funciones de activación) o lógica Difusa.

La investigación se centrará en buscar un control para una red con una estación base AP y cuatro usuarios que utilicen un driver que controle un arreglo de elementos radiantes con una o varias técnicas de control, donde la movilidad no será analizada, los equipos terminales de usuario se consideran estáticos enganchados al AP por largo tiempo. En otras palabras obedece a tiempos largos para que el haz de seguimiento con respecto a la radio base se configure en forma definitiva.

#### **1.4 Hipótesis**

De acuerdo al entorno evaluado en los apartados anteriores con respecto a las diferentes técnicas de control y arreglos de antenas usados, se puede considerar que es posible usar algoritmos evolutivos, fuzzy y/o ADALINE para conformar un esquema de multiplexación SDMA para alcanzar cuatro usuarios simultáneamente a partir de una radio base.

Para corroborar la pertinencia de las diferentes técnicas, se elaborará un controlador para el usuario final y el AP para lo cual se deberá, realizar diversos análisis con respecto a las diferentes técnicas y tipos de arreglo de antenas (lineal o circular), con el fin de definir la manera de alimentar y controlar los parámetros como fase, potencia y espacio entre los elementos radiantes. Además se evaluarán cada técnica y así poder mostrar las ventajas y desventajas de cada una de ellas y hacer una comparación de su desempeño y verificar la posibilidad de usar estas en la práctica. Para esto:

- Se realizará un análisis y estudio de las diferentes tipos de arreglo de antenas, con el fin de poder ver si es posible definir la manera de alimentar y controlar los parámetros como fase potencia y espacio entre los elementos radiantes
- Se Estudiará las diferentes técnicas de control para el esquema SDMA usando arreglo de antenas y evaluar su aplicabilidad.
- Se realizará una comparación de cada arquitectura y técnica de control donde se demuestre las ventajas y desventajas de cada uno de ellos y la posibilidad de llevarlo a la práctica.
- Si las tres anteriores son posibles, se elaborará una arquitectura de control tanto para el AP como para el usuario final para un esquema SDMA de cuatro usuarios conectados a un nodo de red inalámbrica.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo General**

Diseñar un driver de control para un AP y usuario final de un esquema SDMA, de una red inalámbrica, usando para ello un arreglo de antenas inteligentes de cuatro o más elementos radiantes con varias técnicas de control como algoritmos genéticos, redes neuronales o fuzzy para usuarios estáticos en un ambiente indoor.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Realizar un análisis y estudio de las diferentes técnicas y síntesis de arreglo de antenas, con el fin de definir la manera de alimentar y controlar los parámetros como fase, potencia y espacio entre los elementos radiantes.
- Estudiar las diferentes técnicas de control para el esquema SDMA usando antenas inteligentes (sistemas MIMO-SIMO con técnicas de control como ADALINE o control Difuso), midiendo factores como velocidad de respuestas, forma de patrón de radiación.
- Hacer una evaluación del desempeño de las diferentes técnicas de control con análisis comparativo entre ellas.
- Diseñar un driver de control usando técnicas de control como ADALINE o control Difuso tanto para el AP como para el usuario final

## **1.6 Metodología**

Dentro de la diseño del controlador para la red SDMA, se deben de tener en cuenta, cuatro elementos fundamentales:

El primero corresponde a los dispositivos radiantes que con forman el arreglo de antenas. Se debe de diseñar y evaluar la estructura del arreglo, distancia de separación, y forma de control de fase y potencia de pendiendo de factores como ubicación física dentro de la red y si es el AP o un usuario final.

Para la determinación de la estructura del arreglo de antenas se deben de evaluar y caracterizar arreglos unidimensionales y bidimensionales.

En esta etapa se pueden presentar algunas dificultades asociadas a la definición de la frecuencia de trabajo, ya que de esta depende la facilidad de diseño de los dispositivos de hardware que se requieren para el manejo de potencia y fase del arreglo.

Es importante también tener en cuenta que se tiene definido unos rangos de frecuencia que se deben de respetar y que son estándares, con el fin de poder evaluar y construir el arreglo que se ajuste a las condiciones reales de redes inalámbricas.

El segundo elemento corresponde a evaluar de acuerdo a la estructura de arreglo de antenas cual es la técnica de control más adecuada (sistemas MIMO con técnicas de control como ADALINE o control Difuso). Determinar las ventajas y desventajas de cada método tanto para el AP como para el usuario final.

El tercer elemento es hacer una evaluación del desempeño de las diferentes técnicas de control con análisis comparativo entre ellos. Aquí es importante identificar los elementos que permitirán definir cuál técnica o técnicas de control son las más adecuadas.

El cuarto elemento es documentar, donde se plasme los resultados tanto del diseño de los controladores, y nuevas fases de investigación que se vislumbre.

### **1.7 Organización y contribución de la tesis.**

La Tesis se organiza en cuatro partes. La primera es una descripción de la problemática y de la razón por la cual es pertinente esta tesis de grado; la segunda de ellas se trata toda la teoría referente al arreglo de antenas y las técnicas de control; la tercera el desarrollo de las técnicas y sus resultados y la cuarta parte consta de un análisis de resultados y el diseño conceptual del control.

La parte uno consta del primer capítulo, donde se describe toda la problemática, estado del arte y el planteamiento del problema.

La parte dos se destaca toda la teoría referente a las técnicas de control ADALINE, control difuso y control con algoritmos evolutivos y la cual está dividida en cuatro capítulos.

- El capítulo dos (2) describe los conceptos básicos y matemáticos de arreglo de antenas los tipos de estructuras y formas de alimentación.
- En el Capítulo tres punto dos (3.2) se introduce los fundamentos de redes ADALINE, su arquitectura y modos de operación.
- En el capítulo tres punto tres (3.3) se describe la teoría de conjuntos difusos la arquitectura de control y los operadores que se usan en esta técnica.



- En el capítulo tres punto cuatro (3.4) se presenta la filosofía de los algoritmos evolutivos, con los diferentes métodos de selección de población y los operadores de evolución básicos y algunas variantes de los mismos planteados a lo largo de desarrollo de esta técnica.

En la tercera parte se presentan el uso de las diferentes técnicas de control mencionadas en los capítulos anteriores, el ámbito de aplicación, describe la toma de los datos y el análisis de los resultados por cada técnica. Esta está compuesta por tres capítulos:

- El capítulo cuatro (4) se describe la técnica de control ADALINE aplicada a al arreglo de antena.
- El capítulo cinco (5) presenta la técnica de control difuso, donde se describen los conjuntos difusos y la arquitectura de control.
- En el capítulo seis (6) enseña la forma y la técnica de algoritmo evolutivo que se definió para esta técnica y los operadores aplicados.

La cuarta parte se hace un análisis de los resultados obtenidos en los capítulos cuatro (4), cinco (5) y seis (6) para entrar a seleccionar la técnica de control más adecuado para el diseño teórico final del driver de control y se dan las conclusiones principales del trabajo de grado. Está compuesta por los siguientes capítulos:

- En el capítulo siete (7) se hace comparación de las diferentes técnicas de control tanto para un usuario como para una radio base o AP
- Capítulo ocho (8) se hace el diseño conceptual de los controladores tanto para el usuario final como para la radio base o AP.
- Y los capítulos (9) y diez (10) muestran un resumen de los resultados y nuevas líneas de investigación.

## Parte 2

Descripción teórica y matemática del  
arreglo de antenas y técnicas de  
control ADALINE, Difuso y Algoritmos  
Evolutivo

# MARCO TEÓRICO

## 2 Arreglo de antenas.

### 2.1 Introducción

Las antenas no proporcionan de por si directividad elevadas o diagramas de radiación deseados dependiendo de la aplicación, para esto se usan arreglos de antenas que permiten obtener diferentes patrones de acuerdo a los requerimientos.

Un arreglo de antenas es un conjunto de radiadores ordenados regularmente y alimentado con ciertas características de fase y de amplitud, por cada dipolo, para obtener diferentes patrones de radiación. Los elementos de radiación pueden ser simples dipolos (antenas omnidireccionales) o antenas con ciertas características de radiación direccional (Cardama et. Al, 2000; Godara, 2004; Gross, 2005).

El diagrama de radiación del arreglo se consigue con la suma de los campos radiados de cada una de los elementos que lo conforman, estos sucede tanto en transmisión como en recepción de acuerdo al principio de reciprocidad de las antenas, que define que el comportamiento de la antena opera igual en transmisión como en recepción.

### 2.2 Modelo matemático.

Si poseemos N antenas alineadas igualmente espaciadas a una distancia d situadas sobre el eje Z y alimentadas con una corriente tal como se muestra en la figura 7.

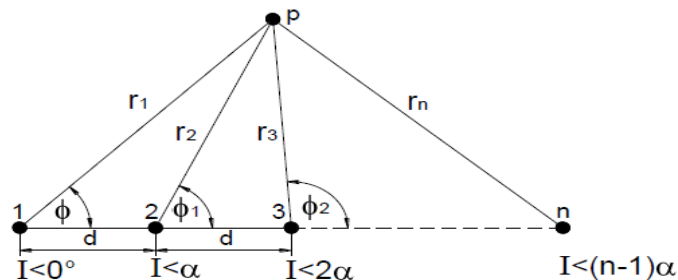
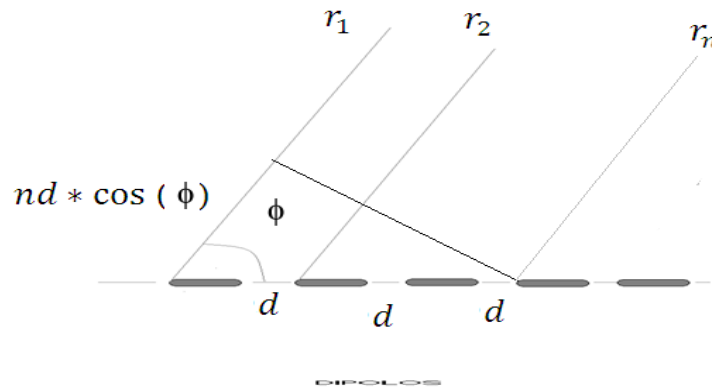


Figura 7. Arreglo de N Fuentes isotrópicas radiando a un punto P dado.

Fuente: Autor.

En este caso consideramos que el punto P es un punto lejano y por tal razón se puede considerar que las distancias son paralelas tal como se muestra en la figura 8.



**Figura 8. Arreglo lineal de antenas para campo lejano.**

Fuente: Autor.

Por tal razón la diferencia de caminos  $r_n$  está dada por la ecuación 1.

$$r_n = r_1 - (n - 1) * d * \cos(\phi) \quad (1)$$

Y el campo E en el punto P está dado por:

$$E_n = E_0 * e^{-j\beta r_n} * e^{-j*(n-1)*\alpha} \quad (2)$$

Donde  $\alpha$  es la fase progresiva y  $\beta$  es la constante de propagación.

Lo cual el campo total para los n dipolos está dada por:

$$E_t = E_0 * e^{-j\beta r_1} * (a_0 + a_1 * e^{-j*(\beta*d*\cos\phi+\alpha)} + \dots + a_n * e^{-j*(n-1)*(\beta*d*\cos\phi+\alpha)}) \quad (3)$$

Donde los  $a_n$  es la potencia del enésimo dipolo.

Si definimos:

$$\Psi = (\beta * d * \cos\phi + \alpha) \quad (4)$$

La ecuación nos queda como:

$$E_t = E_0 * \sum_{n=0}^{N-1} a_n * e^{j*n*\Psi} \quad (5)$$

Si hallamos la relación  $\frac{E_t}{E_0}$  obtenemos:

$$\frac{E_t}{E_0} = FA = \sum_{n=0}^{N-1} a_n * e^{j * n * \Psi} \quad (6)$$

La ecuación (6) describe el comportamiento del patrón de radiación del arreglo de antenas y es conocida como el factor de agrupación FA y este solo depende de la separación de los elementos de la agrupación, de la alimentación y de la frecuencia de trabajo.

En caso de que se tenga todos los  $a_n = 1$  podemos expresar la ecuación (5) y (6) así:

$$E_t = E_0 * e^{-j\beta r_1} * \left( \frac{e^{j * n * \Psi} - 1}{e^{j * \Psi} - 1} \right) \quad (7)$$

$$\left| \frac{E_t}{E_0} \right| = \left| e^{-j\beta r_1} * \left( \frac{e^{j * n * \Psi} - 1}{e^{j * \Psi} - 1} \right) \right| \quad (8)$$

Esta ecuación también se puede expresar:

$$\left| \frac{E_t}{E_0} \right| = FA = \left| e^{-j\beta r_1} * \left( \frac{\text{sen}(n * \frac{\Psi}{2})}{\text{sen}(\frac{\Psi}{2})} \right) \right| \quad (9)$$

La ecuación (9) describe el comportamiento de un patrón de radiación de un arreglo lineal con  $a_n = 1$  de N elementos con una fase progresiva  $\alpha$  y una separación d entre los dipolos.

En la figura (9) a (12) se presentan diferentes patrones de radiación teniendo en cuenta la separación de los elementos y la fase progresiva. Donde n es el enésimo elemento del arreglo y dz corresponde a la separación de cada elemento.

### 2.3 Polinomios de agrupación

El concepto de factor de agrupación también se interpreta como la transformada de Fourier de la secuencia de alimentaciones  $a_n$ . Análogamente se define el polinomio de agrupación P(z) como la transformada z de dicha secuencia.

$$P(z) = a_0 + a_1 * z + a_2 * z^2 \dots + a_{N-1} * z^{N-1} \quad (10)$$

$$P(z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n * z^n \quad (11)$$

Donde z es una variable compleja.

$$z = e^{j\psi} \quad (12)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (10), (11) y (12) podemos decir que le FA se puede expresar como una función del polinomio de la agrupación.

$$FA = P(z) \quad (13)$$

## 2.4 Distribución de corrientes típicas

En los análisis anteriores asumimos, por facilidad, que todos los elementos isotrópicos del arreglo de antenas eran alimentados con una señal de amplitud igual a la unidad, y esto nos permitía simplificar el FA. Aunque en la práctica pueden existir diferentes maneras de alimentar cada dipolo, las cuales entraremos a examinar a continuación las más comunes.

### 2.4.1 Uniforme

La distribución uniforme es aquella en cada uno de los dipolos del arreglo de antenas es alimentado con la misma amplitud. Debido a su sencillez es utilizado en forma continua en la práctica.

Su polinomio de agrupación está dada por:

$$P(z) = 1 + z + z^2 \dots + z^{N-1} = \frac{z^N - 1}{z - 1} \quad (14)$$

Como se puede observar el número de ceros del polinomio es N-1 y las raíces N-esimas se encuentran equiespaciadas y el ancho del lóbulo principal entre ceros está dado por:

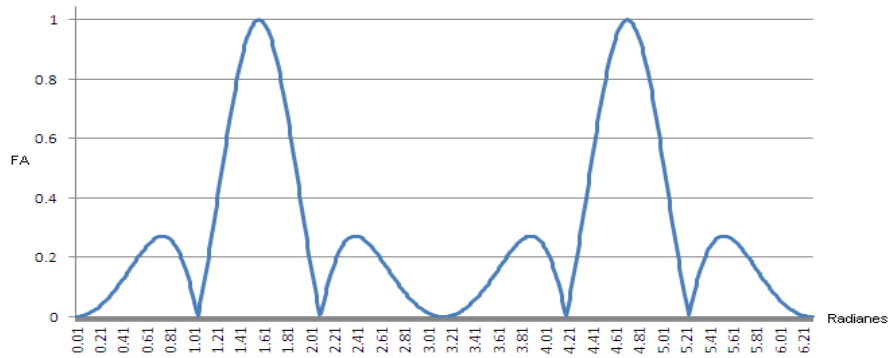
$$\Delta\psi = \frac{4\pi}{N} \quad (15)$$

De (15) podemos deducir que a mayor número de elementos asociados al arreglo de antenas el ancho del haz es mucho menor.

Si de (14) hallamos la magnitud del FA, se puede representar la ecuación:

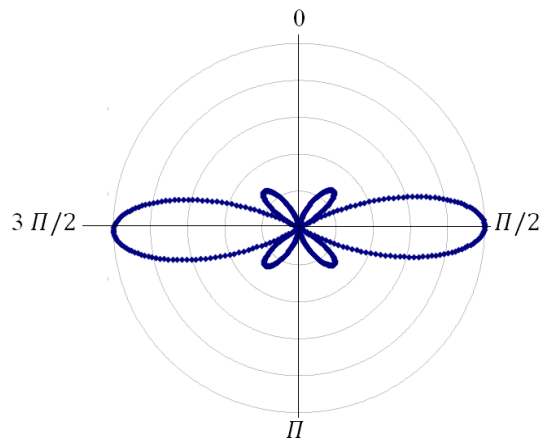
$$FA = \frac{|e^{jN\psi} - 1|}{|e^{j\psi} - 1|} = \frac{|\text{sen}(N \cdot \frac{\psi}{2})|}{|\text{sen}(\frac{\psi}{2})|} \quad (16)$$

En las siguientes figuras 9 y 10 se muestra el comportamiento de un arreglo lineal uniforme de 4 elementos.



**Figura 9. Diagrama cartesiano de un arreglo lineal uniforme de 4 elementos.**

Fuente: Autor.



**Figura 10. Diagrama Polar de un arreglo lineal uniforme de 4 elementos.**

Fuente: Autor.

### 2.4.2 Triangular

La distribución de corrientes triangular se define para un número impar de elementos del arreglo, de tal manera que se cumpla con la siguiente regla del valor de magnitud asociado a cada elemento del arreglo:

$$a_n = \begin{cases} n + 1 & \text{si } n < \frac{N}{2} \\ N - n & \text{si } N > \frac{N}{2} \end{cases} \quad (17)$$

Y su polinomio en variable z está dado por:

$$P(z) = 1 + 2 * z + 3 * z^2 \dots + 3 * z^{N-3} + 2 * z^{N-2} + z^{N-1} \quad (18)$$

Y su FA está dado por:

$$FA = \left[ \frac{z^{\frac{N+1}{2}} - 1}{z - 1} \right]^2 \quad (19)$$

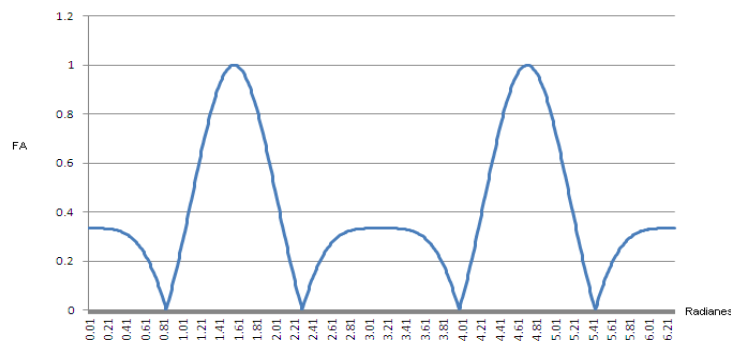
El ancho del lóbulo principal entre ceros está dado por :

$$\Delta\Psi = \frac{8*n}{N+1} \quad (20)$$

Si de (20) hallamos la magnitud del FA, se puede representar la ecuación:

$$FA = \frac{\left| \text{sen}\left(\frac{N+1}{4} * \Psi\right) \right|^2}{\left| \text{sen}\left(\frac{\Psi}{2}\right) \right|^2} \quad (21)$$

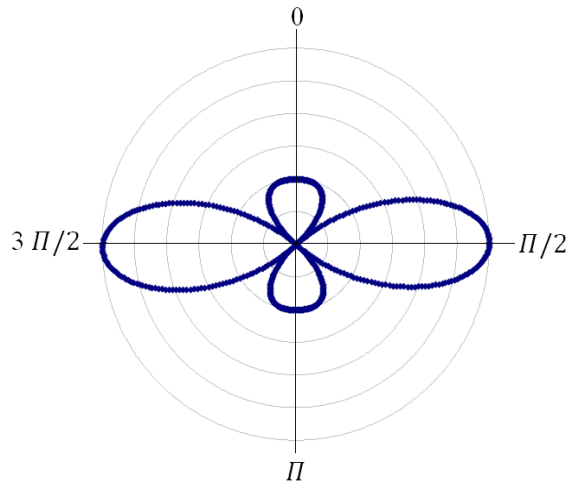
En las siguientes figuras 11 y 12 se muestra el comportamiento de un arreglo lineal triangular de 3 elementos.



**Figura 11. Diagrama cartesiano de un arreglo lineal triangular de 5 elementos.**

Fuente: Autor.





**Figura 12. Diagrama Polar de un arreglo lineal triangular de 5 elementos.**

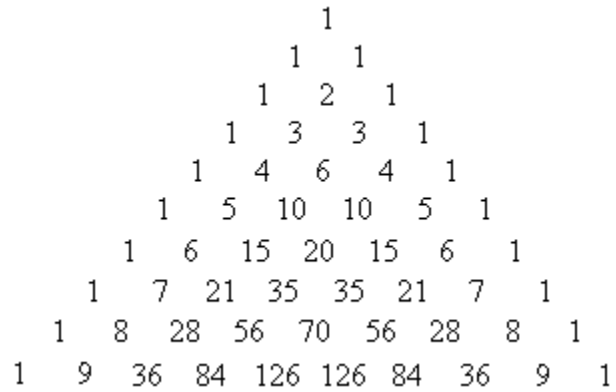
Fuente: Autor.

### 2.4.3 Binómica

La distribución binómica obedece su distribución de magnitud de la corriente según la fórmula de newton:

$$a_n = \binom{N-1}{n} = \frac{(N-1)!}{n!(N-1-n)!} \quad (22)$$

O también puede ser apoyado con la ayuda del triángulo de tartaglia (ver figura 13):



**Figura 13. Triangulo de tartaglia**

Fuente: Autor.

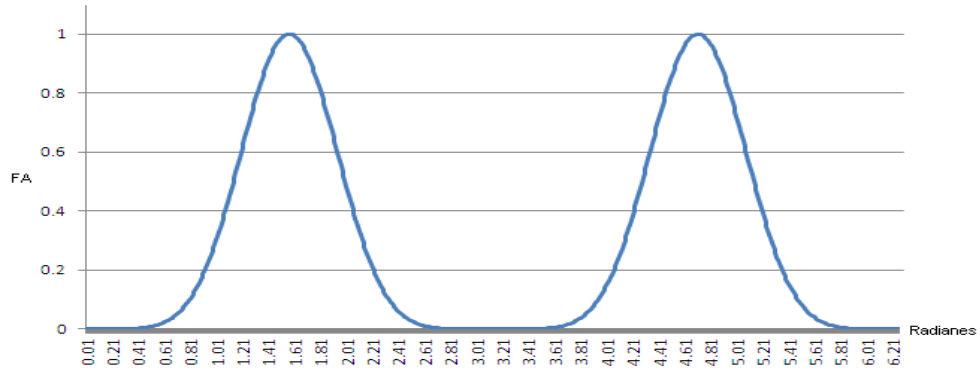
Y su polinomio en variable z está dada por:

$$P(z) = \binom{N-1}{0} + \binom{N-1}{1} * z + \binom{N-1}{2} * z^2 \dots + \binom{N-1}{N-1} * z^{N-1} \quad (23)$$

El factor de agrupación está dado por:

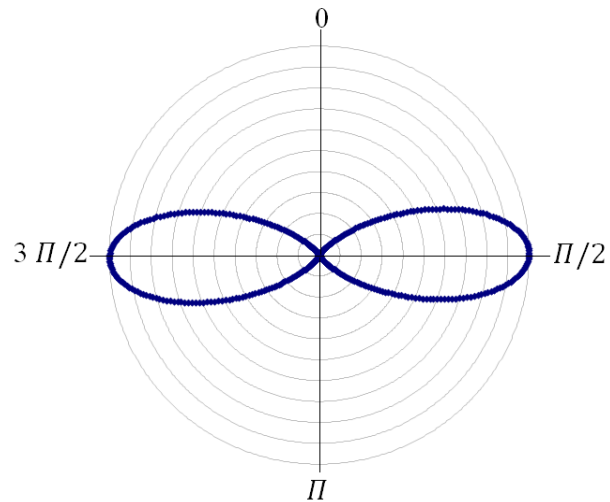
$$|FA| = |2 * \cos(\Psi/2)|^2 \quad (24)$$

En las siguientes figuras 14 y 15 se muestra el comportamiento de un arreglo lineal binomial de 4 elementos.



**Figura 14. Diagrama cartesiano de un arreglo lineal binomial de 4 elementos.**

Fuente: Autor.



**Figura 15. Diagrama Polar de un arreglo lineal binomial de 4 elementos.**

Fuente: Autor.

## 2.5 Tipos de agrupaciones

En los apartados anteriores nos hemos ocupado de los arreglos de antenas conocidos como lineales, cuya estructura es de dipolos ubicados en línea recta separados por una distancia  $d$ .

Pero también es factible tener arreglos conformados por arquitecturas bidimensionales y tridimensionales. Estos arreglos permiten obtener una variedad de patrones de radiación, al permitir dirigir el haz en las dos coordenadas.

Por interés de este trabajo nos centraremos en dos tipos de arreglos circular, ya que este es el más comunes y simple de implementar, además poseen características necesarias para este trabajo de investigación.

### 2.5.1 Arreglo Circular

Otro tipo de arreglo bidimensional es el arreglo circular, que se extienden los elementos del arreglo alrededor de un círculo de radio “a” con un ángulo  $\phi_n$  y cada elemento puede tener asociado una amplitud y fase progresiva diferente según lo requiera para el patrón de radiación deseado (Yaman & Yilmaz, 2011; Gross, 2005; Noordin et. al, 2011; Hou et. al, 2012).

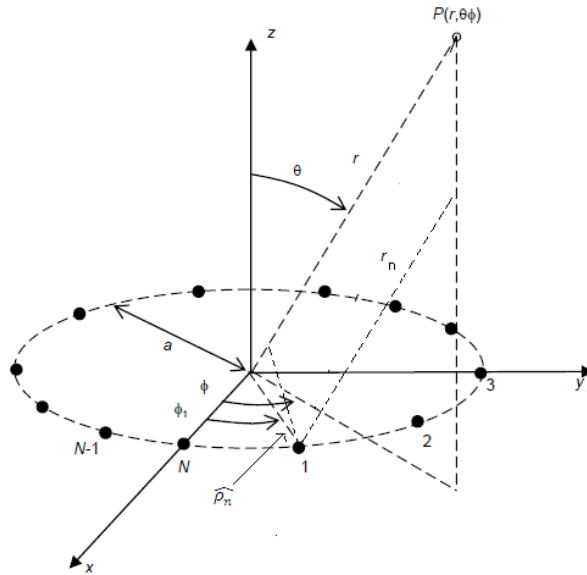
En este caso el arreglo de antenas se encuentra igualmente espaciados en el círculo de radio “a” y cuyo plano es x-y, donde el objetivo es determinar el campo radiado en un punto  $p(r, \theta, \phi)$ , en coordenadas esféricas.

Igual que en el caso de un arreglo lineal y rectangular en este caso también se asume que el análisis se hace para campo lejano y que el punto de observación está determinado por la posición del vector  $\vec{r}$  y paralelo a todo  $\vec{r}_n$  (Das & Mandal, 2011). Por lo tanto podemos definir el vector de dirección de cada dipolo del arreglo como:

$$\hat{\rho}_n = \cos \phi_n * \hat{x} + \text{sen} \phi_n * \hat{y} \quad (25)$$

Donde  $\phi_n$  determina el ángulo de azimut. También podemos definir el vector de dirección como:

$$\hat{r} = \text{sen} \theta * \cos \phi * \hat{x} + \text{sen} \theta * \text{sen} \phi * \hat{y} + \cos \theta * \text{sen} \theta * \cos \phi * \hat{z} \quad (26)$$



**Figura 16. Arreglo circular de antenas de N elementos.**

Fuente: Autor.

De la figura 17 podemos observar que la distancia  $r_n$  es menor que  $r$  y esta diferencia de caminos está dada por:

$$r_n = r - a * \widehat{\rho}_n * \hat{r} \quad (27)$$

Con

$$\widehat{\rho}_n * \hat{r} = \text{sen}\theta * \cos\phi * \cos\phi_n + \text{sen}\theta * \text{sen}\phi * \text{sen}\phi_n = \text{sen}\theta * \cos(\phi - \phi_n) \quad (28)$$

Luego el factor de agrupación se puede expresar como:

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n * e^{-j*(k*a*\text{sen}\theta*\cos(\phi-\phi_n)+\alpha)} \quad (29)$$

Donde  $\alpha$  es la fase eléctrica o progresiva y  $\phi_n = \frac{2*\pi}{N} * (n - 1)$ , que corresponde a la colocación angular de cada elemento del arreglo.

### **3 Técnicas de control inteligente**

#### **3.1 Introducción**

En este capítulo se describen las técnicas de control para el arreglo de antenas que se consideraron para el estudio y análisis de este trabajo de investigación. Se describe los fundamentos de cada técnica y los operadores usados y que aspectos se considerará.

#### **3.2 Redes Neuronales ADALINE**

##### **3.2.1 Introducción Biológica**

Una red ADALINE es la básica de las redes neuronales artificiales, que son sistemas de hardware o software, de procesamiento que copian esquemáticamente la estructural neuronal del cerebro para tratar de reproducir sus capacidades (del Brio & Sanz, 2007, pag.13).

La red ADALINE desde el punto de vista como procesador básico se puede asimilar su comportamiento funcional al de una neurona, como elemento de bioinspiración.

##### **3.2.2 Estructura de un sistema neuronal artificial**

Un sistema neuronal o conexionista, está compuesto por los siguientes elementos (del Brio & Sanz, 2007, pag.13; Kuschewski, 1993):

- Un conjunto de procesadores elementales o neuronas artificiales.
- Un patrón de conectividad o arquitectura.
- Una dinámica de activaciones.
- Una regla o dinámica de aprendizaje.
- El entorno donde opera.

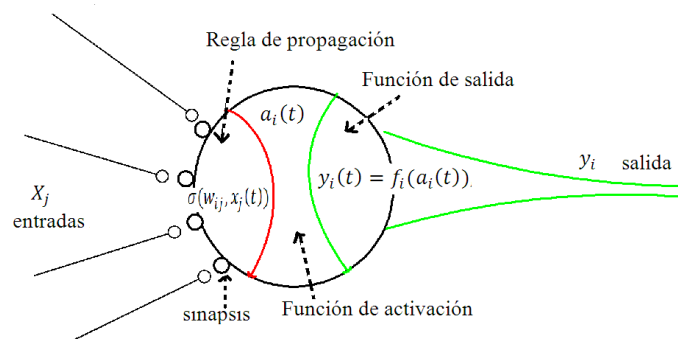
##### **3.2.3 Modelo de neurona artificial**

La neurona artificial básica o elemental procesador es un sistema que a partir de un conjunto de entradas que provienen del exterior o de otro grupo de neuronas artificiales genera una salida (Kabáth, 2010). Si tomamos como referencia la estructura planteada por

(del Brio & Sanz, 2007, pag.14) observamos que los elementos que plantea y que constituyen una neurona artificial son:

- Un vector de entradas  $X_j$
- Pesos sinápticos de la neurona  $i$ ,  $w_{ij}$  que representa la intensidad de interacción entre cada neurona pre sináptica  $j$  la neurona post sináptica  $i$
- Regla de propagación  $\sigma(w_{ij}, x_j(t))$ , que entrega el valor del potencial post sináptico  $h_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$ , de la neurona  $i$  en función de sus pesos y sus entradas.
- Función de activación  $f_i(a_i(t - 1), h_i(t))$ , que proporcionan el estado de activación actual  $a_i(t) = f_i(a_i(t - 1), h_i(t))$  de la neurona  $i$ , en función de su estado anterior  $a_i(t - 1)$  y de su potencial post sináptico actual.

En la figura 18 se muestra un esquema general de una neurona artificial donde se muestran todos los elementos mencionados anteriormente.



**Figura 17. Modelo de una Neurona artificial.**

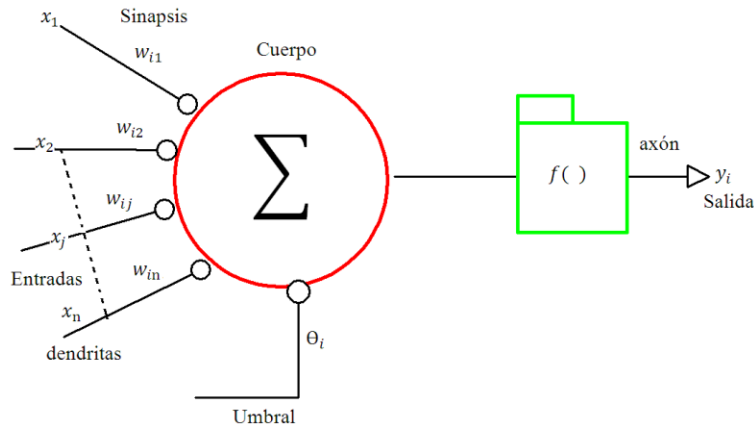
Fuente: Autor.

En general la función de salida de la neurona  $f_i(a_i(t))$ , que proporciona la salida actual  $y_i(t) = f_i(a_i(t))$ , de la neurona  $i$  depende de cómo es la función de activación  $a_i(t)$ .

### 3.2.4 Arquitecturas de redes neuronales

Tal como en los sistemas biológicos donde una neurona es el elemento básico del cerebro, en los sistemas artificiales también se cuenta con estructura básica conocida como ADALINE que desprende su nombre de las siglas en ingles ADActive LINEar Element. Es un dispositivo que está compuesto por una sola etapa, por lo cual no se puede considerar una red como tal. Aunque este es el elemento fundamental a partir del cual se

desprenden las redes complejas (Zhang, 2007). En la figura 25 está el modelo de una neurona básica o perceptron.



**Figura 18 Modelo de una Neurona estándar.**

Fuente: Autor.

El modelo matemático que la representa esta dado por:

$$y_i = f(\sum w_{ij} * x_{j-i}) \quad (30)$$

Donde  $\theta_i$  es un grado de libertad adicional para la neurona también conocido como umbral de disparo.

Cuando se hacen combinaciones y conexiones sinápticas de diferentes neuronas se conforma una estructura compleja conocida como una red neuronal de múltiples capas conocida como MADALINE, de las siglas en inglés Multiple ADaptive LINear Element.

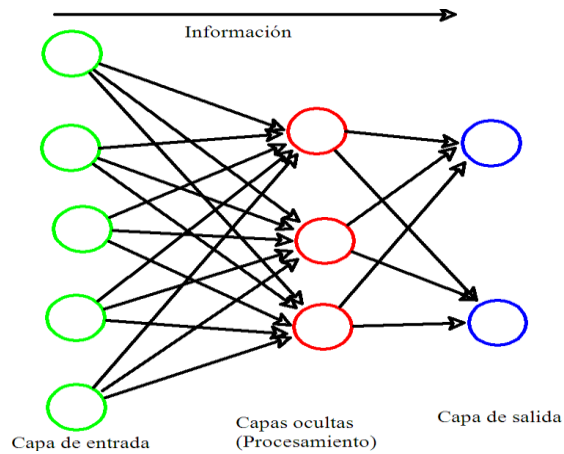
Tanto en las redes ADALINE como MADALINE la información se lleva por conexiones sinápticas y en forma unidireccional.

Dentro de las redes neuronales MADALINE se distinguen tres tipos de capas, una capa de entrada, una capa de salida y las capas ocultas. Esto se puede ver en la figura 19.

La capa de entrada es el sistema sensorial que se encarga de comunicarse y llevar las señales asociadas al entorno al interior de la red (sensores). La capa de salida se encarga de entregar la respuesta que se genera dentro de la red al entorno (actuadores). Las capas ocultas no tienen ningún contacto con el entorno y proporcionan grados de libertad, que le dan mayor capacidad de procesamiento al arreglo neuronal.

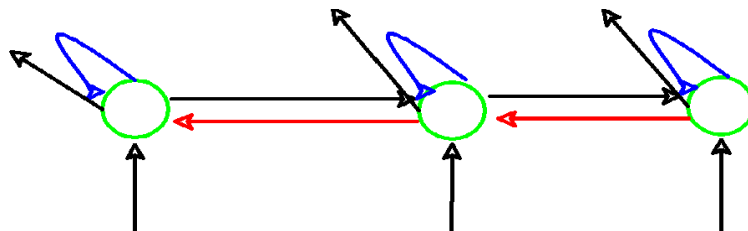


La información que se lleva a cabo dentro del arreglo neuronal se ejecuta a través de conexiones que dependiendo de que conecten y como se conectan reciben diferentes nombres. Por ejemplo si conexiones dentro de la misma capa se conocen como intra-capas. Si se dan entre capas se conocen como inter-capas y si las conexiones son en sentido contrario al de la entrada y salida se dicen que son realimentadas como se muestra en la figura 20.



**Figura 19 Modelo de una Red Neuronal multicapa.**

Fuente: Autor.



**Figura 20 Modelo de una Red Neuronal monocapa realimentada.**

Fuente: Autor.

### 3.2.5 Modos de operación

En las redes neuronales existen dos métodos fundamentales de modo operación: el modo de aprendizaje y el modo de recuerdo o ejecución. Siendo el primero el de mayor interés de este trabajo ya que se aplica para sistemas que deben tener la característica de ser ajustados o preparados para acomodarse al entorno de aplicación.

## El modo de aprendizaje

Es el modo por el cual el sistema ejecuta cambios para ajustarse a las condiciones del entorno en el cual se desenvuelve.

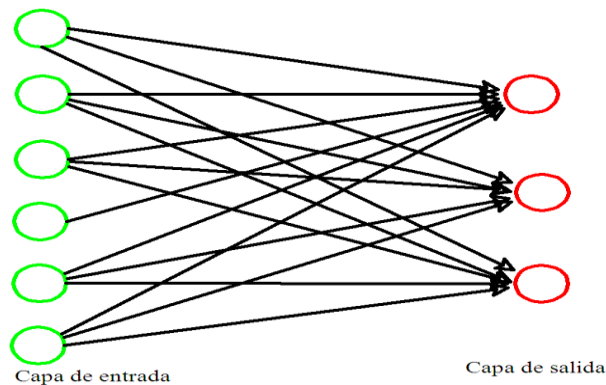
El proceso de aprendizaje consiste esencialmente en hacer un ajuste de los parámetros sinápticos de la red (pesos de la red neuronal artificial), de tal manera que se logre el objetivo de “control” del entorno deseado. La forma o criterio por medio del cual se hace el ajuste de los pesos depende del tipo de técnica de optimización, que por lo general se usa la función de error.

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij} \quad (31)$$

### 3.2.6 El perceptron simple.

El perceptron simple es un modelo unidireccional, compuesto por dos capas de neuronas, una sensorial o de entrada, y otra de salida, ver figura 21 (del Brio & Sanz, 2007; Widrow, 1990; Kabáth, 2010). La operación de una neurona de este tipo, con  $n$  entradas y  $m$  salidas, se puede expresar como:

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} * x_j - \theta_i\right) \forall i, 1 \leq i \leq m \quad (32)$$



**Figura 21. Perceptrón simple.**

Fuente: Autor.

La función de activación de un perceptrón simple es la función escalón, luego su salida está dada por:

$$y_i = H\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} * x_j - \theta_i\right) \forall i, 1 \leq i \leq m \quad (33)$$

Donde H es la función escalón. El perceptrón es en principio de un clasificador de problemas binarios.

### 3.2.7 Algoritmo de aprendizaje del perceptron

El aprendizaje consiste en la determinación de los pesos sinápticos y del umbral, que sigue un proceso adaptativo que comienza con unos valores iniciales aleatorios e ir modificándolos iterativamente hasta cuando la salida de la red coincida con la salida deseada. La regla que sigue para modificar los pesos sinápticos se conoce con el nombre de regla de aprendizaje del Perceptrón simple y viene dada por la expresión:

$$w_j(t + 1) = w_j(k) + \Delta w_j \text{ Con } t=1, 2, 3, \dots \quad (34)$$

$$\Delta w_j = \alpha(k) * [z(k) - y(k)] * x_j(k) \quad (35)$$

Donde:  $[z(k) - y(k)]$  = Error  $z(t)$  la salida esperada,  $y(k)$  la salida del perceptrón y  $\alpha$  es el factor de aprendizaje.

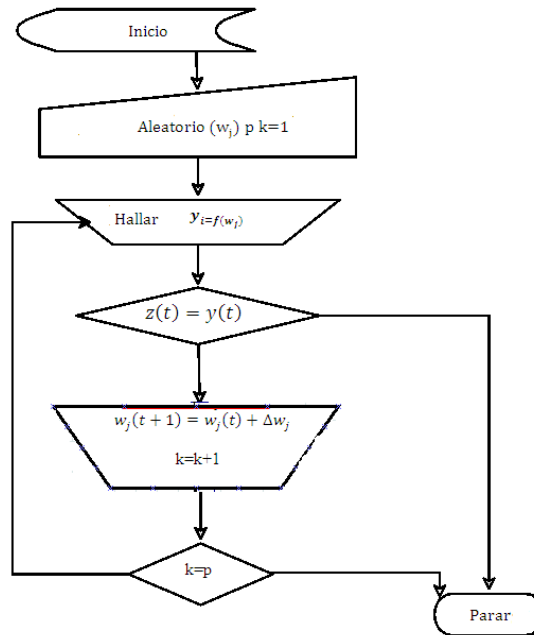
El factor de aprendizaje  $\alpha$  es un valor positivo y determina la velocidad con la cual el perceptron aprende. Es decir, es el parámetro que controla el proceso de aprendizaje.

Ahora como la función de activación que se usa en un perceptrón es la función escalón se puede definir una regla de aprendizaje como:

$$w_j(k + 1) = \begin{cases} w_j(k) + 2 * \alpha * x_j & \text{si } y(k) = -1 \text{ y } z(k) = 1 \\ w_j(k) & \text{si } y(k) = y z(k) \\ w_j(k) - 2 * \alpha * x_j & \text{si } y(k) = 1 \text{ y } z(k) = -1 \end{cases} \quad (36)$$

La regla de aprendizaje es un método de detección del error y corrección. Como se observa en la ecuación (35) Solo aprende cuando se equivoca. En otras palabras, debilita o refuerza los pesos sinápticos de acuerdo al error cometido.

En la figura 22 se describe en forma completa el algoritmo de aprendizaje del perceptron.



**Figura 22. Algoritmo de aprendizaje del Perceptr3n simple.**

Fuente: Autor.

Donde p es el n3mero m3ximo de iteraciones permitido para el proceso de aprendizaje.

### 3.2.8 Neurona Lineal ADALINE

ADALINE que por sus siglas en ingl3s significa ADaptive LINear Element es un dispositivo que consta de un solo elemento de procesamiento, por lo que t3cnicamente no es una red. Su estructura es id3ntica al perceptron y adem3s su respuesta es lineal con entradas reales.

El bias para la arquitectura ADALINE m3s que una entrada de umbral o de disparo es un grado de libertad m3s que posee el sistema. La ecuaci3n que describe la red ADALINE est3 dada por:

$$y_i = \left( \sum_{j=1}^n w_{ij} * x_j - \theta_i \right) \forall i, 1 \leq i \leq m \quad (37)$$

El entrenamiento del ADALINE est3 basado en la regla LMS (Least Mean Square) que busca minimizar el error cuadr3tico medio por medio de la regla delta, lo cual da como resultado

la actualización de los pesos sinápticos de forma continua y proporcional al error que la neurona comete.

### 3.2.9 Regla LMS o regla Delta

Se aplica en entrenamientos Supervisados y es utilizada para entrenar un simple elemento neuronal con función de transferencia lineal (ADALINE) (Wang et. al, 2000).

El entrenamiento con la regla delta, consiste en modificar los pesos buscando reducir la diferencia entre la salida deseada y la salida obtenida por la neurona ADALINE. Se denomina LMS, porque minimiza el Error cuadrático medio.

De acuerdo a la red neuronal ADALINE básica, tenemos que le error esta dado en la ecuación 52.

$$E = [z(k) - (\sum_{i=1}^n w_j(k) * x_j(k))]^2 \quad (38)$$

El objetivo del método LMS es minimizar dicho error mediante la modificación los valores de peso sinápticos, sumándole un  $\Delta w_j$  de tal forma que obtengamos el error mínimo.

Si calculamos la derivada del error con respecto a  $w$

$$E = z^2(k) - 2 * z(k) * (\sum_{j=1}^n w_j(k) * x_j(k)) + [(\sum_{j=1}^n w_j(k) * x_j(k))]^2 \quad (39)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_j} = -2 * [z(k) - (\sum_{j=1}^n w_j(k) * x_j(k))] * x_j(k) \quad (40)$$

Por lo que el error local será reducido si se ajustan los pesos de acuerdo a la regla delta:

$$\Delta w_j(k + 1) = \alpha * [z(k) - (\sum_{j=1}^n w_j(k) * x_j(k))] * x_j(k) \quad (41)$$

#### Algoritmo para ADALINE con LMS:

Este algoritmo es idéntico al aplicado al mostrado en la figura 22 del Perceptrón simple, la diferencia se encuentra en el ajuste de los pesos, el cual se ejecuta de acuerdo a la ecuación (41).

- 1- Inicialización de pesos aleatoriamente  $w_j$  y el número máximo de iteraciones  $p$
- 2- Se aplica un patrón de salida deseado  $z$

- 3- Se calcula la salida lineal que se obtiene de la red  $y(k)$
- 4- Se calcula el error cometido para dicho patrón.  $E$
- 5- Se actualizan las conexiones mediante la ecuación de la regla delta.
- 6- Se repiten los pasos del 2 al 5 para todos los patrones de entrenamiento.

Si el error cuadrático medio es un valor reducido aceptable o el número máximo de iteraciones  $p$  es superado, termina el proceso. Si no se vuelve al paso 2.

### **3.3 Lógica Difusa**

#### **3.3.1 Introducción**

La lógica difusa emula la manera como el cerebro piensa o razona y se denomina así porque permite tratar la información de forma imprecisa, como por ejemplo velocidad alta o media, temperatura baja o alta, en términos de conjuntos difusos los cuales combinados con algunas reglas permitirán tomar acciones para tratar de alcanzar un valor deseado (del Brio & Sanz, 2007; li-xin, 1994; Jantzen , 1998; Calvo, 1998) .

A diferencia de las redes neuronales los sistemas difusos utiliza el conocimiento de los expertos en un tema, bien directamente, bien como punto de partida para una optimización automática, al formalizar el conocimiento ambiguo a veces del experto. Además gracias a su simplicidad de los cálculos necesarios, normalmente pueden realizarse en sistemas baratos y rápidos.

En términos más rigurosos, la teoría difusa se parte de la teoría clásica de conjuntos, a través de una función de pertenecía al conjunto, definida está entre cero y uno.

#### **3.3.2 Conjuntos Difusos**

En los conjuntos clásicos se define que X elemento pertenece o no a un conjunto y esto lo podemos definir matemáticamente con un grado de pertenecía, por ejemplo si es uno (1) pertenece y si es cero (0) no pertenece. La dificultad principal radica que en algunos casos definir exactamente si determinado elemento pertenece o no a un conjunto no es claro y se debe recurrir a unos grados de pertenencia diferentes a cero y uno.

$$x_A(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \in A \\ 0 & \text{si } t \text{ no } \in A \end{cases} \quad (42)$$

Para cada conjunto o subconjunto se define una función de pertenencia  $\mu_A(t)$  que indica el grado en que la variable  $t$  está incluida en el concepto representado en la etiqueta  $A$

### 3.3.3 Funciones de inclusión o de pertenencia de conjuntos difusos

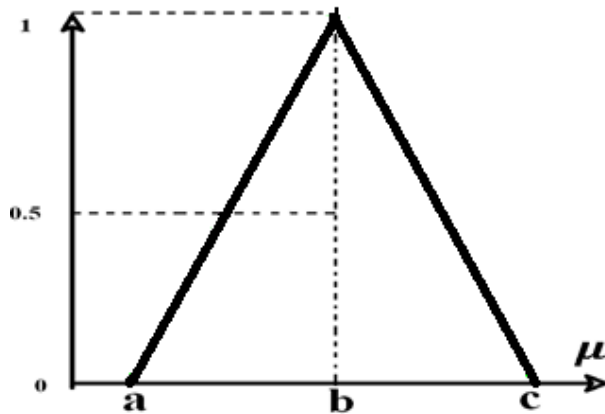
Con la función de pertenencia consiste un conjunto de pares ordenados si la variable es discreta o una función continua si no lo es. La función de pertenencia se establece de una manera arbitraria, dada en la experiencia del usuario o el diseñador del conjunto difuso.

Para la definición de estas funciones de pertenencia, se tienen establecidas ciertas familias de formas estándares y las frecuentes son de tipo singleton, trapezoidal, triangular, en  $S$ , tipo  $\pi$  trapezoidal entre otros. La de interés para este trabajo es la triangular la cual se puede observar en la figura 23.

#### Triangular o T

Se define como

$$T(\mu, a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{si } \mu < a \\ \frac{\mu-a}{b-a} & \text{si } a \leq \mu \leq b \\ \frac{c-\mu}{c-b} & \text{si } b \leq \mu \leq c \\ 0 & \text{si } \mu > c \end{cases} \quad (43)$$



**Figura 23** Función de pertenencia triangular

Fuente: Autor

### 3.3.4 Variables lingüísticas

Son variable cuyos posibles valores son palabras y pueden ser representados mediante conjuntos difusos, por ejemplo alto, bajo, dulce, agrio etc., permitiendo describir el estado de un objeto o fenómeno.

Normalmente cuando describimos una variable numérica toma valores numéricos por ejemplo temperatura de 65 °C, en el caso de determinarla como una variable lingüística se toman valores de tipo lingüístico por ejemplo caliente, y observamos que dicha variable no deja en claro el valor de temperatura por lo cual es un conjunto difuso.

Las variables lingüísticas llevadas a teoría de conjuntos conforman un conjunto de etiquetas por ejemplo:

$$Temp(\text{muy frio}, \text{frio}, \text{tibio}, \text{caliente}, \text{muy caliente})$$

El conjunto *Temp* está conformado por etiquetas que describen los rangos perceptibles de acuerdo al razonamiento típico elaborado por un cerebro humano.

Aunque las variable lingüísticas son conjuntos difusos se le pueden dar valores numérico asociados a un intervalo dado, sin embargo no todas la veces es posible ya que existen algunas variables que no son posible asignarles valor debido a su naturaleza, por ejemplo la tranquilidad, pereza etc.



Todo el rango de valores asignables una variable lingüística asociados al conjunto de etiquetas, se conoce como dominio subyacente y le permite a la lógica difusa ser más específica a la hora de conocer el estado de un sistema.

Una Variable Lingüística se define formalmente como:

$$A, U, T(A), G, M$$

Donde:

A es el nombre de la variable.

U es el dominio subyacente.

T(A) es el conjunto de términos o etiquetas que puede tomar A. G es una gramática para generar las etiquetas de T(N).

M es una regla semántica. Asocia cada elemento de T(N) con un conjunto difuso en U de entre todos los posibles:

$$M: T(A) \rightarrow F(U)$$

### 3.3.5 Medidas Difusas

Si tenemos un conjunto difuso A, se pueden definir ciertas medidas del conjunto. Se conocen como medidas difusas.

La medida más importante es la borrosidad. Se determinada en forma general como la distancia entre los conjuntos difusos. Si  $x_B(t)$  y  $x_A(t)$  son dos conjuntos difusos se puede definir la distancia entre los dos conjuntos de diferente forma como se puede ver en las ecuaciones desde la 44 a la 48 (del Brio & Sanz, 2007, pag.256-257), (Pappis, 2003) .

Hamming

$$d(A, B) = \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)| \quad (44)$$

Hamming Relativa

$$\delta(A, B) = \frac{d(A, B)}{n} \quad (45)$$

Euclidea

$$e(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|^2} \quad (46)$$

Euclidea Relativa

$$\epsilon(A, B) = \frac{e(A, B)}{\sqrt{n}} \quad (47)$$

Minkowski

$$m(A, B) = \sqrt[w]{\left(\sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)|^w\right)} \quad \text{Con } w \in [1, \infty] \quad (48)$$

Otra medida normalmente usada en sistemas de lógica difusa es la similitud, la cual mide el parecido entre dos conjuntos difusos, y en su forma básica es la distancia entre conjuntos (del Brio & Sanz, 2007, pag.257).

Una medida de gran importancia, es la entropía difusa  $E$ . Es un indicativo de cuanta información suministra un conjunto difuso a la descripción de una variable  $x$  dada. Esta se puede expresar tal como en la ecuación 49.

$$E(A) = \sum_{i=1}^n \left\{ \mu_A(x_i) * \log \mu_A(x_i) + (1 - \mu_A(x_i)) * \log(1 - \mu_A(x_i)) \right\} \quad (49)$$

### 3.3.6 Operaciones Difusas

A los conjuntos difusos se les puede aplicar determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos: Al aplicarse una operación de entre conjuntos difusos se generan otros conjuntos difusos (del Brio & Sanz, 2007, pag.257).

Si tenemos dos conjuntos difusos A y B asociados a una variable lingüística x se pueden definir tres operadores básicos: complemento, unión e intersección.

**Complemento:**

$$\mu_{-A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (50)$$

**Unión:**

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (51)$$

**Intersección:**

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (52)$$

Existen otros operadores como la concentración y la dilatación. Estos permiten definir estados extremos dentro de los conjuntos difusos:

$$\mu_{Concentracion}(x) = (\mu_A(x))^2 \quad (53)$$

$$\mu_{dilatacion}(x) = (\mu_A(x))^{0.5} \quad (54)$$

### 3.3.7 Reglas Difusas

Son las encargadas de combinar uno o más conjuntos difusos de entrada llamados antecedentes al cual se la asocia un conjunto de salida llamado consecuente. En esta etapa se encuentra el conocimiento necesario para dar solución al problema (del Brio & Sanz, 2007, pag.263-266).

Las reglas se pueden representar por una tabla conocida como una memoria asociativa FAM (Fuzzy Associative Memory), donde se representan las consecuencias de cada regla definida para cada combinación de dos entradas. Las reglas constan de dos elementos la condición (IF) y la consecuencia (THEM) y ambos conformados por conjuntos difusos.

### 3.3.8 Máquina de interferencia

La máquina de interferencia, son los sistemas que interpretan las reglas de tipo IF THEM de una base de reglas, con el fin de obtener valores de salida a partir de los valores de las variables lingüísticas de entrada del sistema (del Brijo & Sanz, 2007, pag.264-265). Los tipos de interferencia son:

- Implicación difusa por la regla del mínimo

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (55)$$

- Implicación difusa por la regla del producto

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (56)$$

- Implicación difusa por la regla aritmética

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min[1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)] \quad (57)$$

- Implicación difusa por la regla de Max-min

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\} \quad (58)$$

- Implicación difusa por la regla booleana.

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (59)$$

- Implicación difusa por la regla de Goguen

$$\begin{cases} 1 & \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ \frac{\mu_A(x)}{\mu_B(y)} & \mu_A(x) > \mu_B(y) \end{cases} \quad (60)$$

### 3.3.9 Fuzzyficador

El fuzzyficador, es el encargado de hacer la conversión de valores discretos a valores difusos, o en otras palabras es aquel que recibe las variables controladas y llevarlas a variables de tipo lingüístico (del Brio & Sanz, 2007, pag.266).

Hay varias técnicas de fuzzyficación:

#### Fuzzyficador singleton

Es el método de borrrificaciòn considera los valores propios discretos como conjuntos difuso, o sea para cada valor propio de entrada se define un conjunto difuso. En la ecuación 79 se presenta su representación matemática.

$$\begin{cases} \mu_A(x) = 1 & \text{si } x' = x \\ \mu_A(x) = 0 & \text{si } x' \neq x \end{cases} \quad (61)$$

#### Fuzzyficador no singleton

Este método utiliza una función exponencial como la expuesta en la ecuación (62)

$$\mu_A(x') = a \cdot \exp \left[ -\frac{(x'-x)^2}{\sigma} \right] \quad (62)$$

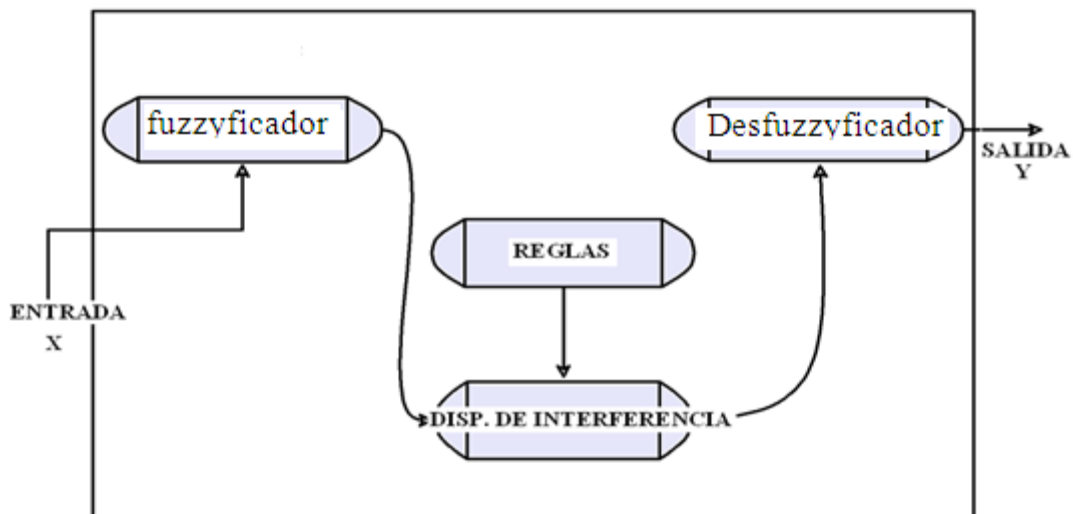
La función es de forma de campana, centrada en el valor x de entrada, de anchura  $\sigma$  y de amplitud  $a$

### 3.3.10 Desfuzzyficador

Su función es la de transformar un conjunto difuso o una variable lingüística en una variable no difusa. Para esta tarea se utilizan diferentes métodos

- Desfuzzyficador por el más pequeño de los máximos (SOM Smallest of Max)
- Desfuzzyficador por el más grande de los máximos (LOM Largest OF Max)
- Desfuzzyficador por la media de los máximos(MOM Mean Of Max)
- Desfuzzyficador por centro de área (COA Centroid Of Area)

En la figura 24 se presenta en forma esquemática un sistema difuso con sus partes más importantes.



**Figura 24. Componentes de un sistema borroso.**

Fuente: Autor.

## **3.4 Algoritmos evolutivos**

### **3.4.1 Introducción**

Los algoritmos evolutivos, son inspirados en la naturaleza, se recogen los modelos basados en la evolución de los seres vivos (Dukkipati & Murty, 2002; Stefanski & Nash, 1995; Arrans & Truyol 2007; Hermides, 2009).

Los algoritmos evolutivos se basan en la capacidad de los organismos vivos para resolver algunos problemas que la naturaleza le ha presentado para su supervivencia. Esto lo conocemos como evolución natural.

La evolución natural parte de dos principios fundamentales: reproducción y selección. La primera se refiere a los cruces que se presentan entre los diferentes individuos presentes en la población en el cual se encuentran y la selección se refiere a la sobrevivencia de los individuos más “fuertes” o de mayor grado de adaptación. La suma de estos dos elementos se le adiciona un tercero asociado con la capacidad de ejercer cambios en las características de los individuos para lograr un mejor desempeño en el entorno en el cual se desenvuelve conocida como mutación.

Estos elementos se usan en la ingeniería para resolver algunos problemas que por métodos tradicionales son difíciles o complejos en su implementación.

Lo primero en hacer, es codificar el problema en una serie de variables, los cuales se recopilan en un elemento conocido como cromosoma, para luego llevarlos a un grupo de individuos con dichos cromosomas conocida como población. A esta población se les aplica a los operadores de selección, cruce, mutación con sus variantes para hallar el o los individuos de mejor solución al problema.

### **3.4.2 Métodos de selección**

Uno de los elementos fundamentales para un esquema o sistema basados con algoritmos evolutivos es definir la manera o metodología se usará para seleccionar los individuos a sobrevivir o copiar para la próxima generación. A continuación se describen los más conocidos, algunos de ellos son excluyentes, otros se pueden usar como una combinación de ellos (Yao, 1997).

### Selección por ruleta

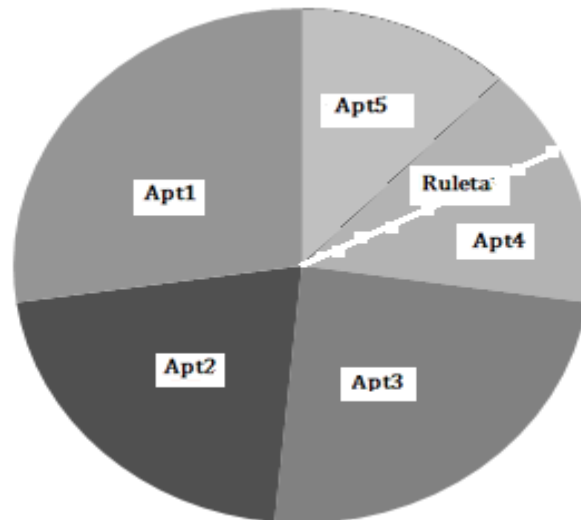
Es una forma de selección donde la probabilidad de un individuo sea seleccionado, es proporcional a la diferencia entre su aptitud y la de sus competidores. Esto puede representarse como un juego de ruleta (ver figura 25): cada individuo obtiene una sección de la ruleta. Los más aptos obtienen secciones mayores. Luego la ruleta se hace girar, y se elige al individuo poseedor de la sección donde se pare la ruleta.

Si tenemos :

$$sum = \sum_i^n f(x)_i \quad (63)$$

Si  $f(x)_i$  es el valor de aptitud de cada individuo y lo dividimos por la suma de todas las aptitudes obtenemos:

$$\sum_{i=1}^n \frac{f(x)_i}{sum} = 1 \quad (64)$$



**Figura 25. Distribución por el método de selección de la ruleta.**

Fuente: Autor.

### Selección por método por torneo

Se eligen subgrupos de individuos de la población, y los miembros de cada subgrupo compiten entre ellos. Sólo se elige a un individuo de cada subgrupo para la reproducción.



En este caso, se seleccionan un grupo de  $t$  individuos y se genera un número aleatorio entre 0 y 1. Si este número es menor a un cierto umbral  $K$  (usualmente 0,75), se selecciona para reproducirse al individuo con mejor aptitud, y si este número es menor a  $K$ , se selecciona, por el contrario, al individuo con peor aptitud.

### **Selección elitista**

En ciertas ocasiones puede suceder, tras la aplicación del operador evolutivo (el cruce, la mutación etc.), perdamos el cromosoma con mejor aptitud. Este método de selección copia el mejor cromosoma o alguno de los mejores en la nueva población. El resto se realiza el operador evolutivo elegido. El elitismo puede mejorar el funcionamiento de los algoritmos evolutivos al evitar perder la mejor solución. Una variación del elitismo es que el mejor cromosoma solo se copie a la siguiente generación en caso de aplicar una reproducción/mutación no se haya generado un cromosoma mejor.

### **Selección generacional**

La descendencia de los individuos seleccionados en cada generación se convierte en toda la siguiente generación. No se conservan individuos entre las generaciones.

### **Selección por Estado Estacionario**

La descendencia de los individuos seleccionados en cada generación vuelve a la población genética preexistente, reemplazando a algunos de los miembros menos aptos de la anterior generación. Se conservan algunos individuos entre generaciones.

### **Selección escalada**

Al incrementarse la aptitud media de la población, al transcurrir de las generaciones la dificultad de la selectiva también aumenta y la función de aptitud se hace más discriminadora. Este método puede ser útil cuando todos los individuos tengan una aptitud relativamente alta y sólo les distinguen pequeñas diferencias.

### **Selección por rango**

A cada individuo de la población se le asigna un rango numérico basado en su aptitud, y la selección se basa en este ranking, en lugar de las diferencias absolutas en aptitud. La ventaja de este método es poder evitar algunos individuos muy aptos ganen dominancia al principio a expensas de los menos aptos, lo cual reduciría la diversidad genética de la población y podría obstaculizar la búsqueda de una solución aceptable.

### 3.4.3 Operador evolutivo

Una vez se han seleccionados los individuos por algunos de los métodos, a éstos se les debe alterar su genética con el fin de mejorar su aptitud para la siguiente generación.

Como se mencionó anteriormente, las variables del problema se codifican en un elemento conocido como cromosomas, y sobre este se ejercen o aplican los operadores evolutivos más conocidos como son la mutación, cruce y algunas combinaciones o variantes de los mismos.

La mutación, tal como a los seres vivos, causa pequeñas alteraciones en puntos concretos del código o cromosoma de un individuo o individuos. Mientras el cruce implica elegir a dos individuos para intercambiar parte de su código o cromosoma, produciendo una “descendencia” artificial cuyos individuos son combinaciones de sus padres.

#### Operador cruce

Hay diferentes formas de realizar los cruces para cada codificación siendo algunas técnicas aplicables indistintamente a las distintas codificaciones.

#### Cruce de un Punto

En este esquema se eligen dos individuos por algunos de los métodos, para jugar el papel de padres. Los dos cromosomas padres se cortan por un punto. Se copia la información genética de uno de los padres desde el inicio hasta el punto de corte y el resto se copia del otro progenitor. En la figura 26 se muestra como se ejecuta el cruce por este método.



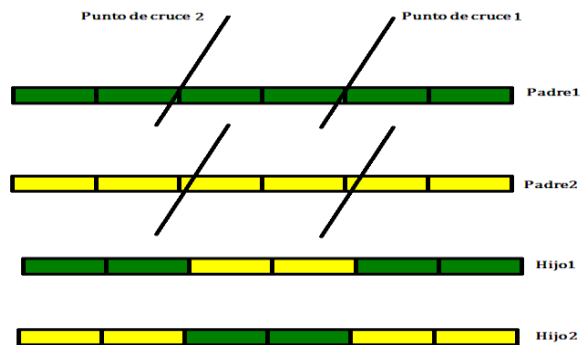
Figura 26. Cruce en un punto.

Fuente: Autor.

#### Cruce en dos Puntos

Es parecido al caso anterior. En este los padres se cortan por dos puntos de cruce. Se copiará al descendiente los genes de un cromosoma progenitor desde el principio hasta el

primer punto de cruce, los genes del otro progenitor desde el primer punto de cruce hasta el segundo y del segundo punto de cruce hasta el final se copiará del otro progenitor. Ver figura 27.



**Figura 27** cruce en dos puntos.

Fuente: Autor.

### Cruce Uniforme

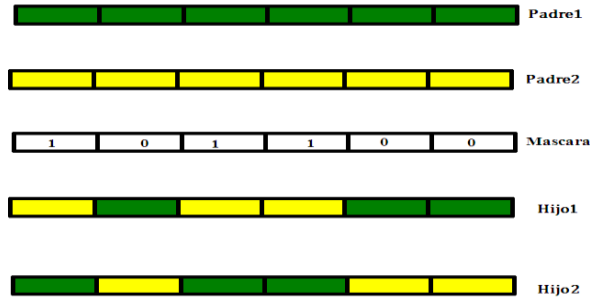
Cada gen del descendiente se obtiene de cualquiera de los padres de forma aleatoria. Una opción es generar un número aleatorio. Si este número supera un cierto umbral se elegirá un padre determinado y si no lo supera se elige al otro. Veamos algún ejemplo como el que se muestra en las figuras 28 y 29:



**Figura 28.** Cruce uniforme.

Fuente: Autor.

Otra opción es seleccionar una máscara. En caso de estar el bit correspondiente a la máscara en 1, se copia el gen de un progenitor y en caso de estar en 0 se copia el gen del otro progenitor. Veamos un ejemplo:

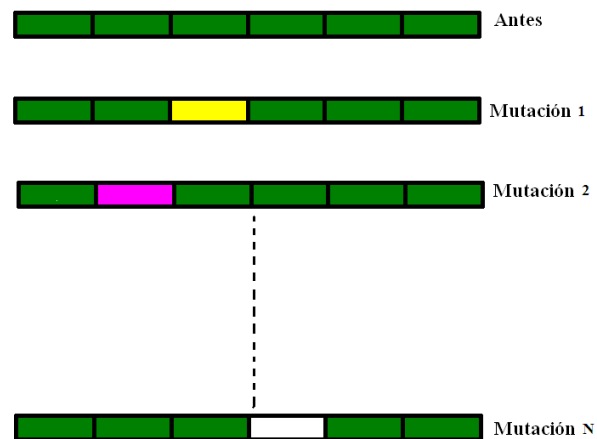


**Figura 29 Cruce uniforme con mascara para codificación.**

Fuente: Autor.

### Operador mutación

La mutación es un operador, generador de un cambio aleatorio en uno de los genes de los cromosomas de uno o varios individuos de una población (ver figura 30). El objetivo del operador de mutación es generar diversidad a partir de la modificación de un cierto número de genes de los individuos de la población. Además previenen a las soluciones de la población de verse limitadas por un óptimo local. Cuando se abusa de la mutación podemos caer en el uso del algoritmo evolutivo como una simple búsqueda aleatoria. Por lo tanto antes de aumentar las mutaciones, conviene estudiar otras soluciones generadoras de diversidad a la población, como podría ser el aumento del tamaño de la población o garantizar la aleatoriedad de la población inicial (Coelho et. Al, 2012).



**Figura 30 Mutación en algoritmos evolutivos.**

Fuente: Autor.

En la figura 31 se muestra el diagrama de flujo de un sistema evolutivo en forma general y sirve de base para cualquier variante deseada para alcanzar el objetivo.

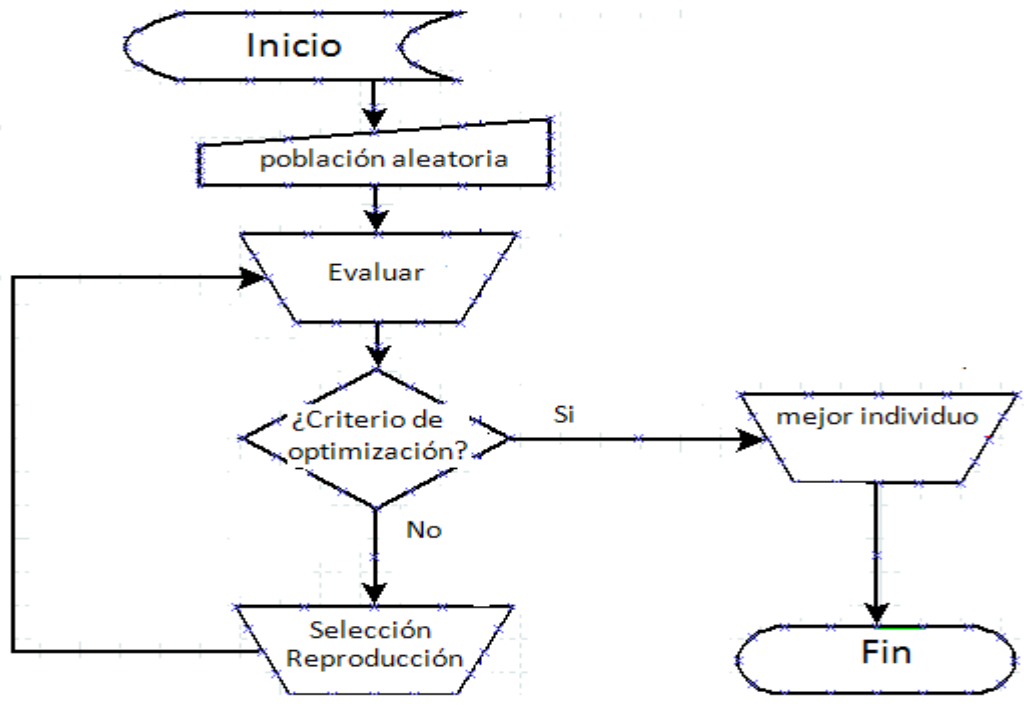


Figura 31 Diagrama de flujo de algoritmos evolutivo.

Fuente: Autor.

## Parte 3

Resultados obtenidos con las técnicas de control ADALINE, Difuso y Algoritmos Evolutivos aplicados a un arreglo de antenas lineal y circular para un usuario final y una radio base o AP

# METODOLOGÍA

---

Las diferentes técnicas de control fueron aplicadas para un arreglo lineal. Para el caso de un usuario final y para el AP o radio base se usó un arreglo circular, ambos con alimentaciones típicas uniforme, triangular y binomial.

Todas las técnicas se centraron en hacer modificación de la fase de un arreglo de antenas tipo dipolo simple, para hallar el patrón de radiación deseado.

Para el caso del usuario final el análisis se realizó para un arreglo de ocho elementos para el uniforme y el binomial y de 7 elementos para el triangular. El error máximo permitido fue de treinta por ciento y un ruidos menores del quince por ciento.

Para el caso del AP o radio base el análisis se realizó para un arreglo de cuatro elementos para el arreglo uniforme y el binomial y de tres elementos para el arreglo triangular. El error máximo permitido para el error y ruido fue del cincuenta por ciento.

Para la toma de datos del análisis del desempeño de los algoritmos aplicados a las diferentes técnicas para un usuario, se tuvo en cuenta un ancho del haz entre 20 a 30 grados para el patrón de referencia, con saltos de 30 grados de 0 a 330, o sea 12 saltos posibles y diez repeticiones por cada uno de ellos, para un total de 120 datos.

Para los AP, se tomaron muestras desde cero (0) a trescientos sesenta grados (360) con pasos de treinta (30) grados y diez (10) repeticiones por cada paso, tal como se realizó para el control para un usuario final, pero en este caso, se mantiene los patrones de los otros cuadrantes quietos en ángulos de treinta grados para el cuadrante uno, ciento veinte grados para el cuadrante dos, doscientos cuarenta grados para el cuadrante tres y trescientos treinta grados para el cuadrante cuatro. Adicionalmente se hace un análisis de los cuatros usuarios ubicados en cuadrantes diferentes en posiciones aleatorias.

El número máximo de iteraciones permitido para las diferentes técnicas de control fue doscientos (200), valor tomado de acuerdo al desempeño máximo observado durante las pruebas.

Se tomaron gráficas que muestran los resultados en coordenadas polares y cartesianas al aplicar las diferentes técnicas de control para un usuario final y un AP. En color azul aparece el patrón deseado y en rojo el patrón encontrado.

También se presenta una figura donde se muestra el comportamiento del número de iteraciones versus el error entre el patrón de radiación deseado y el patrón calculado por

el algoritmo de control, tanto para la radio base como para un usuario final con los diferentes tipos de arreglos de antenas

Posteriormente para cada tipo de arreglo de antenas y técnica de control usada, se realizó un análisis de estadística descriptiva y para luego hacer un comparativo entre ellas tanto para el usuario como para el AP. En este análisis se tomó aspectos relevantes como el error promedio, el número de iteraciones promedio y características de dispersión y varianza, tanto del error como del número de iteraciones de los datos, permitiéndonos obtener una mirada del desempeño del algoritmo aplicado para cada uno de los arreglos de antenas aquí estudiados.

También se consideró importante hacer un análisis por cuadrante con el fin de verificar si el comportamiento de la técnica de control aplicada varía de cuadrante en cuadrante para el número promedio de iteraciones y error. Se define como cuadrante 1 el rango comprendido entre 0 a 90 grados, cuadrante 2 entre 90 a 180 grados, cuadrante 3 entre 180 a 270 grados y cuadrante 4 entre 270 a 360 grados.

Para el estudio se realizó con un sistema de 2.4 GHz., con diferentes parámetros por cada técnica de control como tipo de arreglo.

#### **4 Aplicación de control de arreglo de antenas con técnica ADALINE**

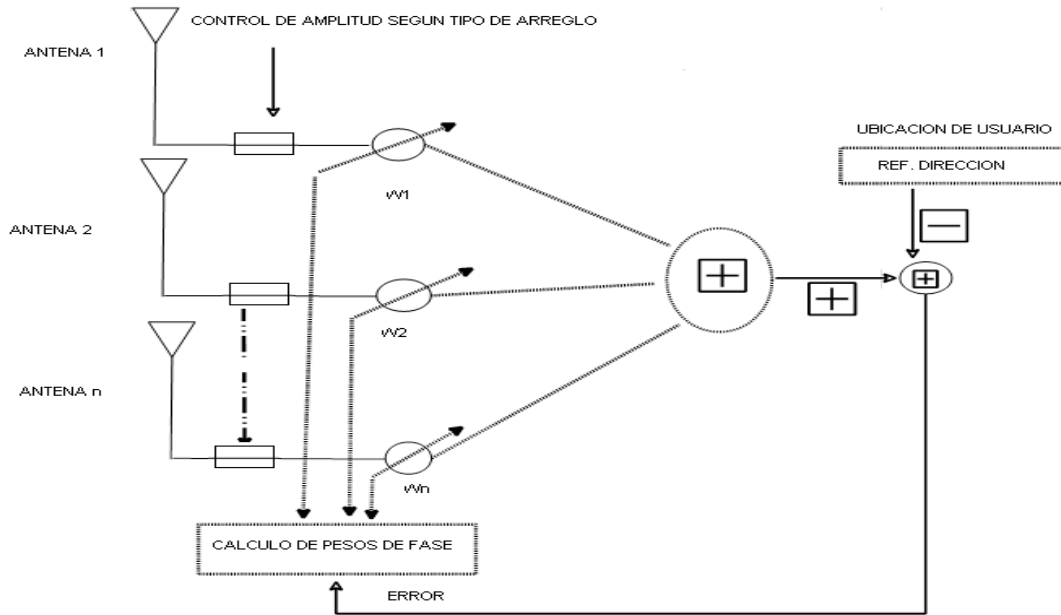
Tomando en cuenta los apartados anteriores nos enfocamos en definir los parámetros del arreglo de antenas se quieren controlar y aplicarle la técnica de control ADALINE.

De acuerdo al capítulo 1 donde se definen los tipos de arreglo y la manera de modificar el patrón de radiación, se tomaron dos elementos básicos, la fase y amplitud para desarrollar el control ADALINE.

Se hace un control sobre la fase de un arreglo lineal y circular para hacer el ajuste del patrón de radiación deseado (sea el vector  $w(i)$ ). Estos ajuste de fase requeridos y serán aquellos que se actualice para alcanzar el patrón requerido y luego se tomara los valores de amplitud según el tipo de arreglo, uniforme, triangular o binomial.

La arquitectura de la red de control ADALINE se muestra en la figura 32 y el algoritmo aplicado se encuentra en el apéndice A.





**Figura 32. Modelo de control de fase con técnica de control ADALINE.**

Fuente: Autor.

El sistema está conformado por los siguientes elementos:

- Los elementos radiantes que son antenas tipo dipolo.
- Un bloque de control de amplitud. Serán de acuerdo al tipo de arreglo lineal (Uniforme, triangular o binomial).
- Un bloque de control de fase. Son los pesos controladores de la arquitectura ADALINE.
- Un sumador. Representa la suma algebraica del aporte de cada elemento radiante.
- Un sumador comparador. Hace la resta algebraica de entre la referencia de ubicación deseada y el resultado de control ADALINE.
- Un bloque donde se calcula los pesos de la fase usando el error cuadrático medio entregado por el comparador para recalculan los pesos.

Este modelo será aplicable tanto para el caso de un patrón de radiación de un usuario como para el caso de la radio base o AP.

#### 4.1 Para un usuario con técnica ADALINE

##### 4.1.1 Entorno de aplicación para un usuario final con técnica ADALINE

La investigación se centra en el control del arreglo para un usuario final para alcanzar una radio base o AP, con las mejores características del patrón de radiación.

En la tabla 2 se encuentra un resumen de los parámetros más importantes para el desarrollo del algoritmo.

**Tabla 2:**

**Parámetros del análisis con técnica de control ADALINE para un usuario final**

PARAMETROS	
Número de elementos	8(uniforme-Binomial) y 7 (Triangular)
Factor de aprendizaje	0,1-1
Separación (landas)	0,01-0.07
Ancho del haz (grados)	20
Ruido (%)	Menor de 15
Error (%)	Menor de 0,3

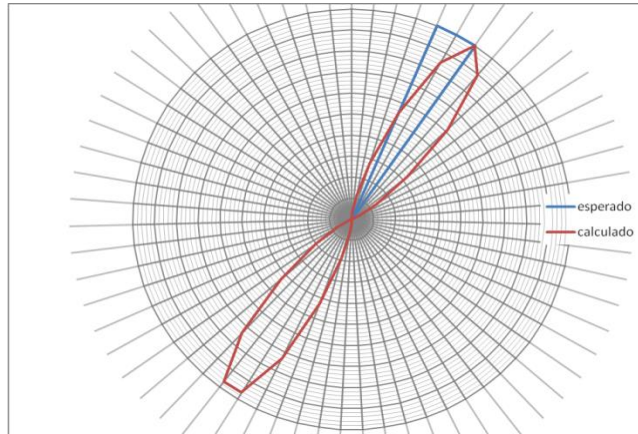
En las gráficas presentadas en el capítulo 4.1.2 muestran el resultado en coordenadas polares y cartesianas respectivamente al aplicar el algoritmo ADALINE para un usuario final ubicado a 30, 210 y 330 grados con los diferentes tipos de arreglo lineal de antenas. En color azul aparece el patrón deseado y en rojo el patrón encontrado.

También se presenta una gráfica donde se muestra el comportamiento del número de iteraciones versus el error entre el patrón de radiación deseado y el patrón calculado por el control con el algoritmo ADALINE para un usuario final ubicando una radio base localizada a 30,210 y 330 grados de él con los diferentes tipos de arreglo lineal de antenas.

**4.1.2 Resultados ADALINE con arreglo para un usuario final**

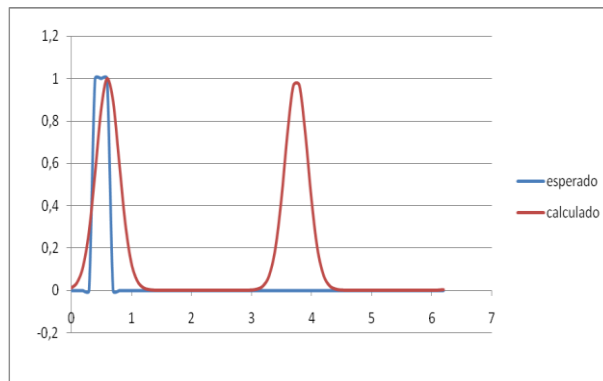
A continuación se presentan algunas figuras y tablas de resultados por cada tipo de arreglo de antenas.

**Control con Red neuronal ADALINE parra arreglo de antena lineal con alimentación uniforme**



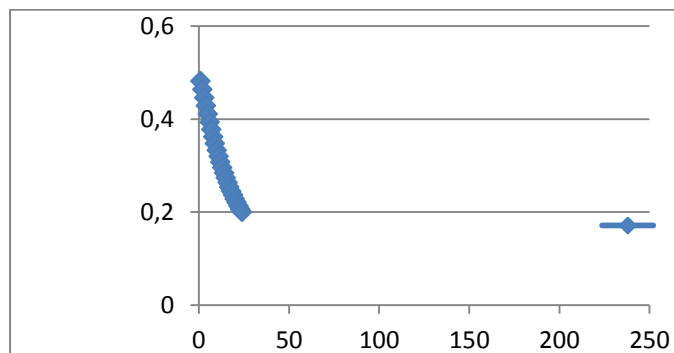
**Figura 33. Diagrama en coordenadas polares del patrón de radiación lineal uniforme ADALINE a treinta grados.**

Fuente: Autor.



**Figura 34 Figura cartesiana del patrón de radiación lineal uniforme ADALINE a treinta grados.**

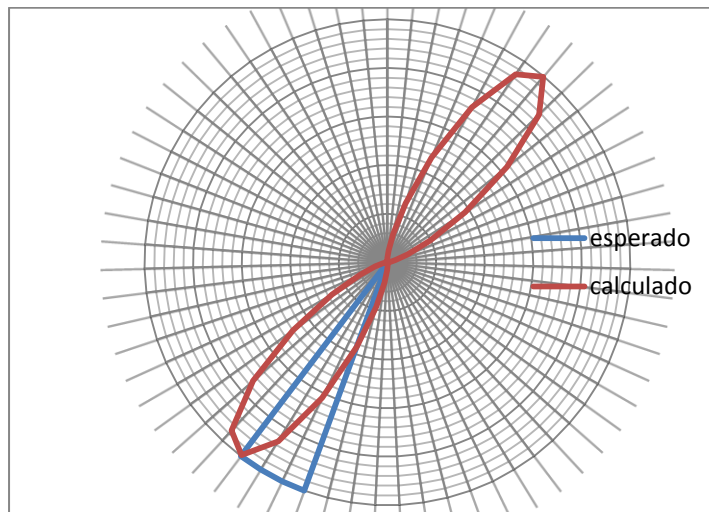
Fuente: Autor.



**Figura 35 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal uniforme ADALINE a treinta grados.**

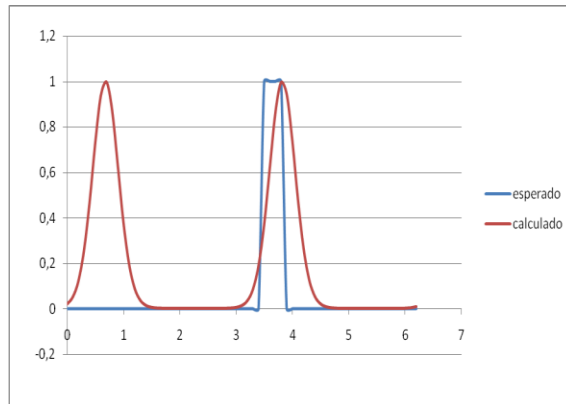
Fuente: Autor.

### Control con Red neuronal ADALINE para arreglo de antena lineal con alimentación triangular



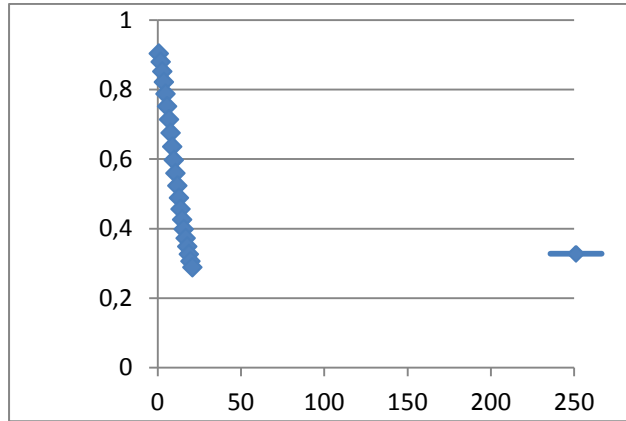
**Figura 36. Figura polar del patrón de radiación lineal triangular ADALINE a doscientos diez grados.**

Fuente: Autor.



**Figura 37. Figura cartesiana del patrón de radiación lineal triangular ADALINE a doscientos diez grados.**

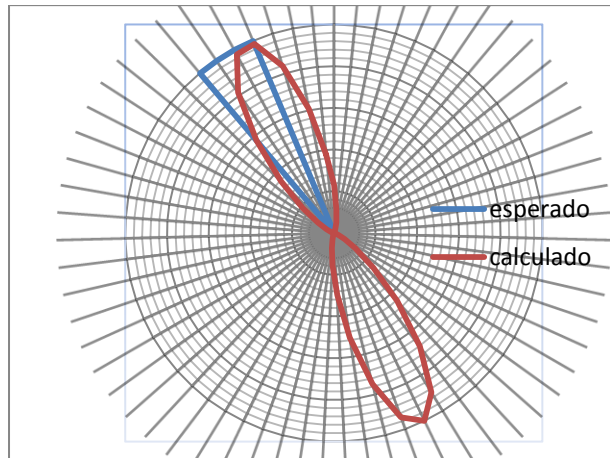
Fuente: Autor.



**Figura 38. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal triangular ADALINE a doscientos diez grados.**

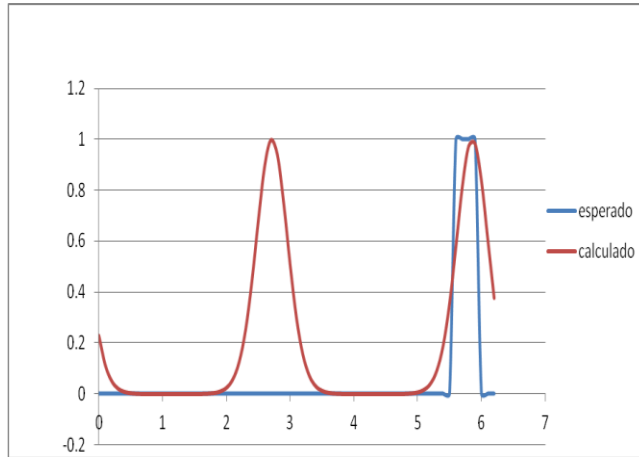
Fuente: Autor.

**Control con Red neuronal ADALINE parra arreglo de antena lineal con alimentación binomial.**



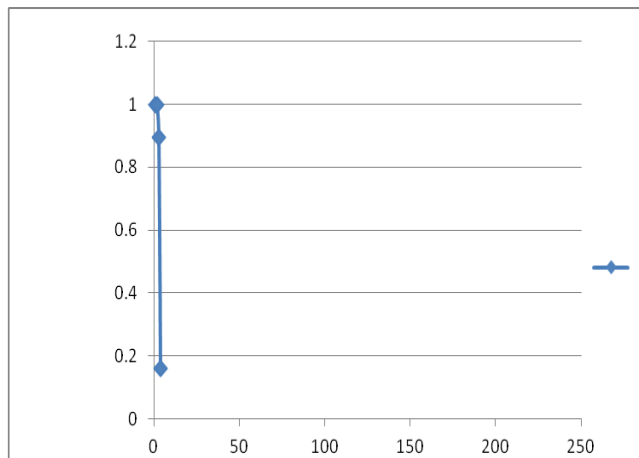
**Figura 39. Figura polar del patrón de radiación lineal binomial ADALINE a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor.



**Figura 40** Figura cartesiana del patrón de radiación lineal binomial ADALINE a trescientos treinta grados.

Fuente: Autor.



**Figura 41.** Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal binomial ADALINE a trescientos treinta grados.

Fuente: Autor.

A continuación se muestra la tabla 3, donde están los datos asociados al aplicar la técnica de control ADALINE para los diferentes tipos de arreglos lineales uniforme, triangular y binomial para alcanzar un patrón de radiación deseado para un usuario final.

**Tabla 3:**

**Resultados de la simulación con red ADALINE para un usuario final**

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
0	0,297	34	0,335	183	0,2821	18
	0,290	28	0,320	37	0,1857	20
	0,296	21	0,310	22	0,2922	24
	0,294	38	0,331	170	0,2541	24
	0,287	32	0,307	22	0,3	18
	0,282	30	0,336	23	0,2894	30
	0,285	31	0,312	24	0,2534	22
	0,293	34	0,337	155	0,2833	12
	0,280	39	0,324	26	0,1848	26
30	0,297	21	0,314	29	0,2619	16
	0,279	14	0,290	14	0,281	12
	0,292	26	0,295	10	0,2897	16
	0,285	18	0,282	7	0,2615	7
	0,291	14	0,281	19	0,278	13
	0,286	21	0,276	26	0,2981	10
	0,286	13	0,290	22	0,2625	11
	0,282	11	0,290	19	0,2666	13
	0,290	13	0,298	22	0,2621	12
60	0,293	25	0,282	5	0,2919	4
	0,286	24	0,296	10	0,285	4
	0,283	3	0,485	22	0,2732	5
	0,295	95	0,285	13	0,2935	55
	0,245	1	0,289	8	0,2888	8
	0,298	105	0,283	9	0,2976	6
	0,147	1	0,287	9	0,2953	55
	0,115	1	0,328	121	0,2999	56
	0,184	1	0,377	98	0,2814	58
90	0,176	1	0,298	11	0,2917	58
	0,293	102	0,287	114	0,2884	68
	0,297	97	0,289	2	0,2819	52
	0,287	78	0,189	59	0,2872	56
	0,298	104	0,320	46	0,2768	51
	0,289	84	0,221	39	0,2818	54
	0,287	83	0,290	38	0,2796	48
	0,295	99	0,292	102	0,3212	51
	0,296	106	0,321	114	0,2717	49
90	0,295	95	0,544	99	0,2955	53
	0,297	100	0,297	95	0,2957	43
	0,292	95	0,284	31	0,2974	63
	0,293	93	0,263	57	0,3775	62

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
120	0,268	54	0,383	76	0,2752	43
	0,340	80	0,012	147	0,2908	31
	0,288	69	0,300	79	0,2634	39
	0,288	63	0,296	79	0,2975	40
	0,291	63	0,069	70	0,2922	37
	0,286	63	0,358	86	0,3381	43
	0,281	73	0,493	78	0,2812	40
	0,293	71	0,540	71	0,2878	40
	0,288	69	0,298	69	0,3519	47
0,290	63	0,324	79	0,2833	31	
150	0,290	52	0,418	63	0,1993	33
	0,290	44	0,428	64	0,2419	29
	0,284	44	0,292	52	0,2881	28
	0,286	49	0,315	60	0,2673	92
	0,280	52	0,287	49	0,2611	34
	0,300	46	0,300	53	0,2813	24
	0,278	48	0,289	54	0,2565	30
	0,287	41	0,293	57	0,2869	23
	0,289	64	0,235	52	0,2817	84
0,297	55	0,292	57	0,2999	96	
180	0,298	26	0,296	32	0,2782	89
	0,287	28	0,315	48	0,293	82
	0,293	28	0,288	32	0,2993	23
	0,296	36	0,284	27	0,2896	18
	0,297	30	0,287	39	0,297	84
	0,285	32	0,459	40	0,2822	84
	0,286	40	0,286	43	0,2897	22
	0,291	51	0,297	69	0,2987	22
	0,289	41	0,291	46	0,2885	27
0,282	27	0,286	25	0,296	19	
210	0,288	17	0,299	29	0,2905	9
	0,283	26	0,298	23	0,2884	15
	0,284	27	0,293	25	0,2846	12
	0,295	20	0,283	23	0,2881	15
	0,299	16	0,379	22	0,2912	11
	0,291	14	0,296	29	0,299	79
	0,282	28	0,285	15	0,2932	16
	0,291	16	0,314	33	0,2848	75
	0,299	15	0,288	23	0,2995	10
0,298	26	0,294	19	0,2913	20	



GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
240	0,082	1	0,292	107	0,264	65
	0,084	1	0,292	100	0,2791	28
	0,132	1	0,294	44	0,2628	6
	0,292	7	0,298	106	0,2882	30
	0,210	1	0,299	95	0,2501	62
	0,128	1	0,292	107	0,2962	59
	0,080	1	0,286	101	0,2981	65
	0,186	1	0,291	107	0,2944	61
	0,288	90	0,297	6	0,2993	68
0,295	103	0,288	49	0,2783	30	
270	0,281	99	0,286	119	0,2793	24
	0,298	83	0,291	93	0,2454	21
	0,285	78	0,294	110	0,2857	21
	0,292	92	0,295	100	0,2865	19
	0,300	95	0,293	147	0,2756	23
	0,280	30	0,290	105	0,2769	21
	0,299	85	0,291	100	0,2724	20
	0,292	85	0,293	111	0,2831	22
	0,280	38	0,287	25	0,1728	19
0,294	84	0,292	149	0,2742	21	
300	0,296	73	0,291	68	0,2978	12
	0,294	81	0,330	81	0,2918	121
	0,297	78	0,299	81	0,2962	98
	0,289	68	0,298	63	0,2942	100
	0,286	67	0,299	76	0,2771	106
	0,288	60	0,295	76	0,2776	116
	0,287	63	0,297	82	0,2787	99
	0,299	84	0,298	77	0,2888	112
	0,297	70	0,299	82	0,2995	108
0,290	66	0,286	73	0,2898	110	
330	0,290	53	0,326	63	0,2936	30
	0,296	55	0,156	79	0,2823	103
	0,296	57	0,293	58	0,2825	99
	0,298	59	0,332	68	0,2916	88
	0,286	50	0,284	47	0,2873	31
	0,299	57	0,298	46	0,2945	28
	0,288	47	0,294	48	0,2979	93
	0,285	57	0,229	75	0,2984	34
	0,291	50	0,311	69	0,2987	38
0,285	50	0,294	51	0,2878	90	

A continuación se realizó el análisis estadística descriptiva. Los resultados obtenidos se pueden observar en las tablas 4 y 5.

**Tabla 4:**

**Estadística descriptiva para ADALINE para la variable Número de iteraciones para un usuario final**

N° DE ITERACIONES			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	47.99166667	60.10833333	43
Error típico	2.832397996	3.561618377	2.819624108
Mediana	47.5	55.5	31
Moda	1	22	30
Desviación estándar	31.02736549	39.01557453	30.88743456
Varianza de la muestra	962.697409	1522.215056	954.0336134
Curtosis	-1.072514942	0.241944371	-0.378358744
Coefficiente de asimetría	0.174181864	0.746870621	0.848275819
Rango	105	181	117
Mínimo	1	2	4
Máximo	106	183	121
Suma	5759	7213	5160
Cuenta	120	120	120

**Tabla 5:**

**Estadística descriptiva para ADALINE para la variable Error para un usuario final**

Error			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	0.276316115	0.302691937	0.282967041
Error típico	0.004264049	0.005745455	0.002299801
Mediana	0.289378822	0.294203445	0.287778512
Moda	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.046710314	0.062938309	0.025193054
Varianza de la muestra	0.002181853	0.003961231	0.00063469
Curtosis	8.904717593	8.709167095	7.974662992
Coefficiente de asimetría	-3.091350887	0.21330277	-1.390506904
Rango	0.260416623	0.531862642	0.204694524
Mínimo	0.079583377	0.012354647	0.172760502
Máximo	0.34	0.544217288	0.377455026
Suma	33.15793378	36.32303244	33.95604494
Cuenta	120	120	120

En las tablas 6 y 7 se describe el análisis por cuadrante para la técnica ADALINE aplicada a un usuario.

**Tabla 6 :**

**Análisis por cuadrante de las iteraciones con ADALINE para un usuario final**

ANALISIS DE ITERACIONES POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	45.78	48.30	30.79
2	60.98	61.90	46.60
3	38.00	63.08	35.43
4	67.13	80.73	60.90

**Tabla 7:**

**Análisis por cuadrante del error con ADALINE para un usuario final**

ANALISIS DE ERROR POR CUADARANTES /			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	0.28	0.31	0.28
2	0.29	0.31	0.29
3	0.26	0.30	0.28
4	0.29	0.29	0.28

#### **4.1.3 Análisis de resultados usuario final con técnica ADALINE**

De las tablas 4 y 5, podemos observar como el sistema con mejor desempeño es el arreglo binomial tanto por número promedio de iteraciones, número promedio de error, como la menor desviación típica de ambas variables. El arreglo uniforme es el segundo mejor de acuerdo, con las variables antes mencionadas y son muy cercanos al arreglo binomial.

Las variables de simetría y curtosis se observa como el comportamiento del sistema no está estadísticamente bajo una distribución normal, lo cual muestra que los datos son dispersos y junto con la varianza denota un comportamiento altamente aleatorio en su desempeño independientemente del cuadrante de trabajo en el cual se requiere adecuar el patrón de radiación. .

De las figuras 33 a la 41 de patrón de radiación y de número de iteraciones versus error, se observa un comportamiento oscilatorio del arreglo binomial alrededor del error, los otros dos arreglos no presentan oscilaciones significativas.

Cuando se hace un análisis de los cuadrantes, establecidos en las tablas 6 y 7, en forma independiente se observa los siguientes aspectos fundamentales:

- El error promedio por cuadrante son similares, lo cual significa que este no es factor importante entre los cuadrantes. Su respuesta es similar en cada uno de ellos.
- Para el número de iteraciones se presentan desempeños diferentes por cuadrante los cuales muestran un comportamiento del algoritmo diferente por cada cuadrante
- El arreglo binomial es de mejor desempeño por cuadrante y en el rango total de cero (0) a trescientos sesenta grados (360).

De lo anterior podemos concluir que la técnica de control del patrón de radiación con una técnica ADALINE para un usuario, tiene mejor desempeño en el arreglo con alimentación binomial, esto teniendo en cuenta parámetros como el número de iteraciones, la desviación típica tanto para el error como para el número de iteraciones.

La técnica ADALINE, aplicada en un arreglo lineal uniforme para un usuario tiene un comportamiento muy parecido al binomial, con la ventaja de ser más fácil su implementación por no requerir cambiar la alimentación de cada elemento del arreglo, tal como se requiere en un arreglo uniforme binomial o triangular.

Teniendo en cuenta las dos conclusiones anteriores, el control de un arreglo uniforme para un usuario, usando técnica ADALINE, es más adecuado para un arreglo lineal uniforme, tanto por desempeño como por la facilidad de implementación.

## **4.2 Para una radio base AP con técnica ADALINE**

### **4.2.1 Entorno de aplicación para una radio base AP con técnica ADALINE**

La investigación se centra en el control del arreglo para una radio base o AP, cuyo fin es alcanzar cuatro usuarios en forma simultánea con el patrón de radiación.

En la tabla 8 se encuentra un resumen de los parámetros más importantes para el desarrollo del algoritmo del control ADALINE para una radio base o AP.

**Tabla 8 :**

**Parámetros del análisis con técnica de control ADALINE para radio base o AP**

PARAMETROS	
Número de elementos	4 uniforme y 3(Binomial-Triangular)
Factor de aprendizaje	0,1-1
Radio (landas)	0,01-0.07
Ancho del haz(grados)	20
Ruido (%)	Menor de 50
Error (%)	Menor de 0,5

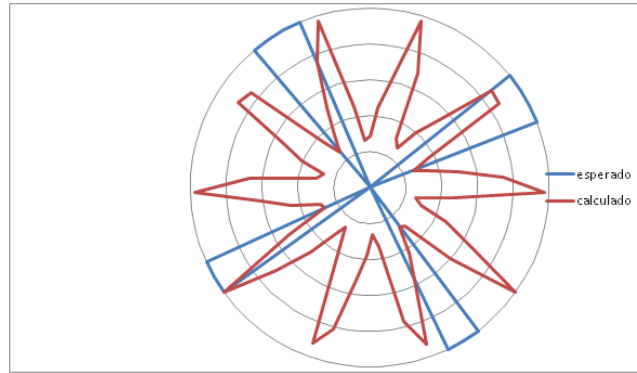
En las figuras presentadas en el capítulo 4.2.2 muestran el resultado en coordenadas polares y cartesianas respectivamente al aplicar el algoritmo ADALINE para una radio base con los diferentes tipos de arreglo circular de antenas. En color azul aparece el patrón deseado y en rojo el patrón encontrado.

También se presenta una figura donde se muestra el comportamiento del número de iteraciones versus el error entre el patrón de radiación deseado y el patrón calculado por el control con el algoritmo ADALINE para una radio base que quiere alcanzar cuatro usuarios simultáneamente con los diferentes tipos de arreglo circular de antenas.

**4.2.2 Resultados con arreglo para una radio base AP con técnica ADALINE**

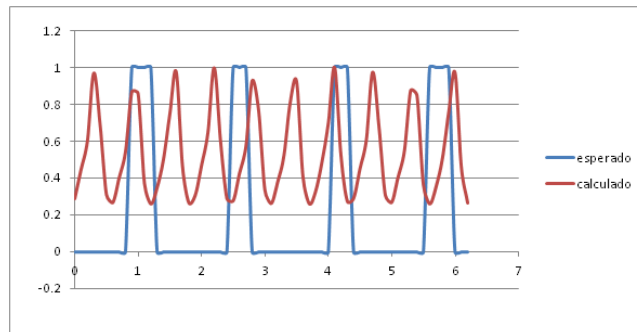
A continuación se presentan las figuras y tablas de resultados por cada tipo de arreglo de antenas.

**Control con Red neuronal ADALINE parra arreglo de antena lineal con alimentación uniforme**



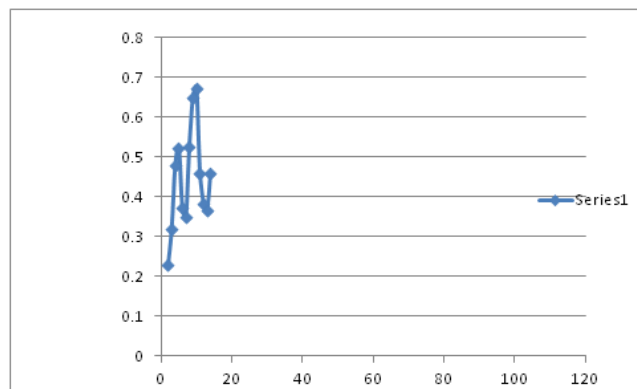
**Figura 42. Figura polar del patrón de radiación circular uniforme ADALINE para radio base o AP a treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 43. Figura cartesiana del patrón de radiación circular uniforme ADALINE para radio base o AP a treinta grados.**

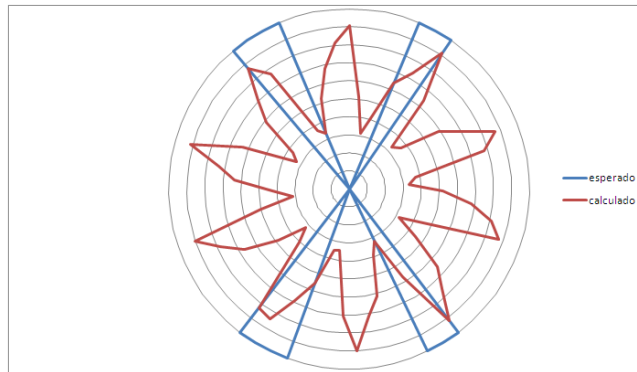
Fuente: Autor



**Figura 44. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular uniforme ADALINE para radio base o AP a treinta grados.**

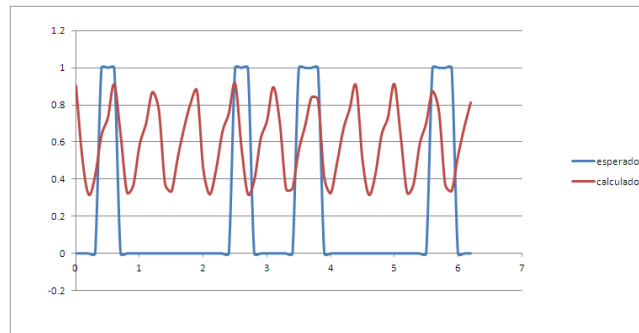
Fuente: Autor

## Control con Red neuronal ADALINE para arreglo de antena lineal con alimentación triangular



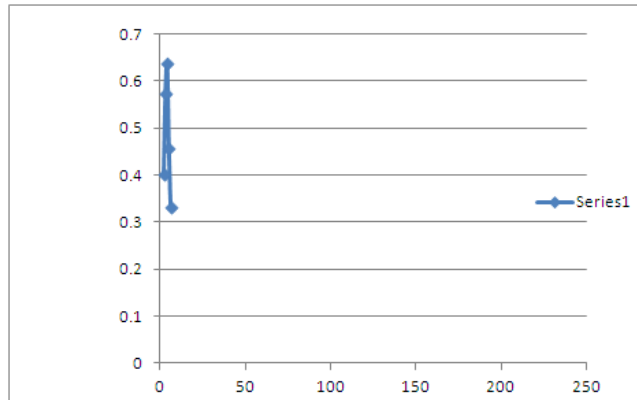
**Figura 45. Figura polar del patrón de radiación circular triangular ADALINE para radio base o AP a doscientos diez grados.**

Fuente: Autor



**Figura 46. Figura cartesiana del patrón de radiación circular triangular ADALINE para radio base o AP a doscientos diez grados.**

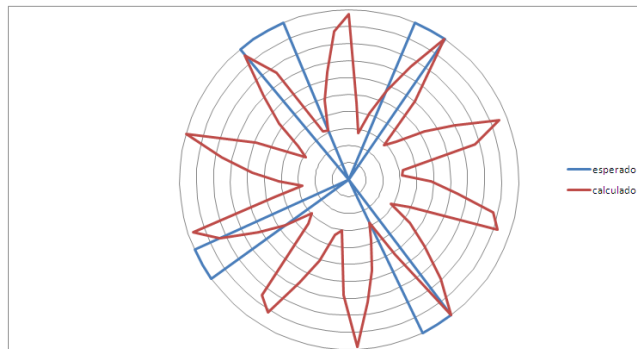
Fuente: Autor



**Figura 47. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular triangular ADALINE para radio base o AP a doscientos diez grados.**

Fuente: Autor

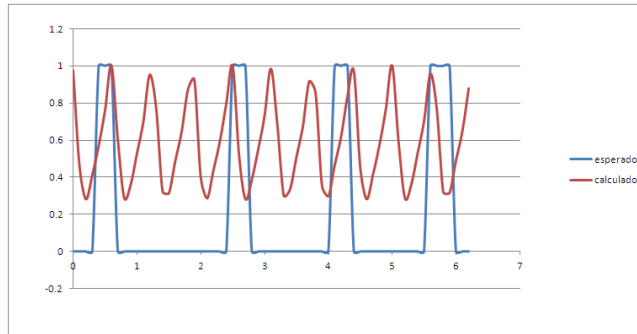
**Control con Red neuronal ADALINE parra arreglo de antena lineal con alimentación binomial**



**Figura 48. Figura polar del patrón de radiación circular binomial ADALINE para radio base o AP a trescientos treinta grados.**

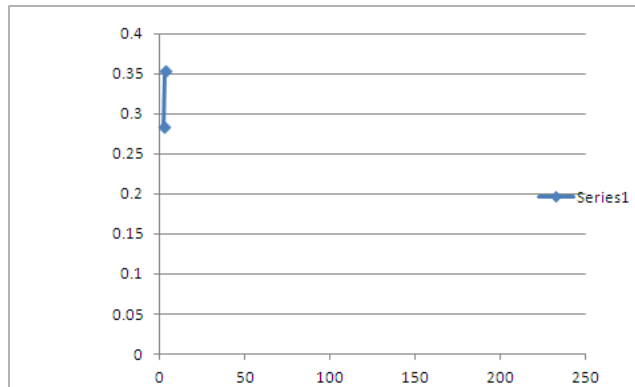
Fuente: Autor





**Figura 49. Figura cartesiana del patrón de radiación circular binomial ADALINE para radio base o AP a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 50. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular binomial ADALINE para radio base o AP a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor

A continuación se muestra la tabla 9, donde aparecen los datos asociados a los resultados de aplicar la técnica de control ADALINE para los diferentes tipos de arreglos lineales uniforme, triangular y binomial, para una radio base o AP, para obtener un patrón de radiación deseado para alcanzar cuatro usuarios finales.

Tabla 9:

Resultados de la simulación con red ADALINE para una radio base o AP

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
0	0.3544	5	0.47987	14	0.362	5
	0.3731	22	0.48128	2	0.418	4
	0.4383	26	0.48244	3	0.367	4
	0.4426	5	0.45922	4	0.437	4
	0.4542	2	0.48524	9	0.336	4
	0.4541	4	0.42381	4	0.406	3
	0.442	25	0.38175	3	0.41	5
	0.4214	4	0.46883	16	0.419	6
	0.3497	23	0.49184	5	0.39	4
0.3207	5	0.44629	4	0.327	4	
30	0.4853	11	0.48248	4	0.355	3
	0.356	5	0.38913	2	0.427	3
	0.3568	21	0.36775	18	0.439	23
	0.3822	5	0.36476	4	0.387	5
	0.4014	4	0.37244	2	0.361	3
	0.489	10	0.49038	9	0.352	4
	0.4773	13	0.449	3	0.434	2
	0.3566	5	0.41667	5	0.343	3
	0.3483	5	0.3608	5	0.42	23
0.4809	8	0.43143	4	0.41	3	
60	0.4262	10	0.40335	5	0.377	6
	0.4304	10	0.41234	4	0.38	3
	0.4324	9	0.45323	4	0.404	2
	0.4056	2	0.35986	2	0.36	4
	0.3922	4	0.39538	3	0.397	3
	0.3684	5	0.48995	2	0.404	5
	0.3868	4	0.38219	2	0.416	4
	0.4518	12	0.47468	4	0.394	3
	0.4142	4	0.42785	3	0.377	2
0.3869	4	0.40126	18	0.425	4	
90	0.4109	11	0.43947	8	0.438	10
	0.4113	5	0.44081	16	0.344	7
	0.3806	10	0.44639	6	0.42	9
	0.474	5	0.44005	4	0.442	3
	0.4823	4	0.41491	6	0.438	2
	0.4045	10	0.42704	16	0.438	21
	0.3905	14	0.44657	9	0.422	2
	0.4492	4	0.43398	2	0.374	8
	0.4495	3	0.38667	8	0.426	2
0.4184	5	0.43991	9	0.381	8	

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
120	0.4447	7	0.41924	3	0.394	3
	0.3507	9	0.44686	7	0.444	2
	0.4418	8	0.43363	7	0.388	5
	0.4343	6	0.42154	23	0.437	2
	0.3926	9	0.43096	28	0.444	5
	0.4096	6	0.42972	28	0.434	5
	0.3656	12	0.41529	8	0.399	2
	0.3832	10	0.41137	22	0.428	4
	0.4623	4	0.44801	26	0.409	2
150	0.3751	12	0.41722	3	0.425	4
	0.3707	5	0.40213	5	0.407	4
	0.4261	10	0.40219	37	0.407	4
	0.4066	4	0.40903	2	0.391	2
	0.3691	9	0.43353	18	0.433	23
	0.3593	6	0.37439	6	0.437	2
	0.4039	2	0.35789	4	0.439	3
	0.378	5	0.44263	17	0.426	2
	0.3734	5	0.40586	3	0.45	8
180	0.4233	11	0.38649	2	0.415	4
	0.3742	5	0.36708	3	0.412	3
	0.3748	5	0.33542	3	0.432	23
	0.4143	4	0.42297	25	0.416	2
	0.3395	4	0.41325	4	0.444	4
	0.314	4	0.38754	2	0.375	4
	0.3686	5	0.36012	2	0.368	4
	0.431	2	0.313	3	0.358	4
	0.3771	5	0.3448	4	0.434	6
210	0.4309	12	0.40624	5	0.449	5
	0.3316	4	0.42899	6	0.354	2
	0.3417	6	0.36984	5	0.348	2
	0.3819	4	0.43981	5	0.423	4
	0.4363	12	0.33163	5	0.362	5
	0.4672	13	0.35667	3	0.342	3
	0.3515	4	0.39025	5	0.359	2
	0.3383	8	0.40119	6	0.441	3
	0.4593	11	0.40286	4	0.342	3
210	0.3685	5	0.37347	3	0.32	4
	0.3345	5	0.30067	2	0.439	4
	0.4525	10	0.39782	4	0.396	4
	0.3614	6	0.4426	5	0.383	2

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
240	0.3743	4	0.38877	4	0.375	2
	0.4274	13	0.38927	18	0.4	3
	0.4508	15	0.4189	5	0.407	6
	0.3688	4	0.43838	17	0.374	4
	0.3836	4	0.36118	18	0.394	5
	0.4421	10	0.44688	3	0.39	3
	0.4306	12	0.44733	4	0.426	2
	0.4342	12	0.43399	3	0.408	4
	0.3837	4	0.43174	6	0.399	5
270	0.4095	6	0.37009	5	0.356	3
	0.433	10	0.40983	3	0.398	2
	0.4177	13	0.40533	5	0.385	4
	0.4591	6	0.40445	16	0.434	2
	0.4815	6	0.44696	7	0.419	2
	0.4033	8	0.37309	18	0.398	7
	0.426	5	0.43457	3	0.435	3
	0.3821	13	0.44219	3	0.445	2
	0.4857	9	0.44296	18	0.431	5
300	0.403	12	0.40837	16	0.437	4
	0.4921	7	0.44576	18	0.408	8
	0.3581	10	0.42794	18	0.449	5
	0.4127	6	0.4232	5	0.409	2
	0.453	5	0.43624	6	0.434	4
	0.4689	8	0.41911	6	0.391	3
	0.4224	8	0.40764	5	0.405	3
	0.415	7	0.42525	7	0.44	4
	0.3827	15	0.42583	24	0.441	2
330	0.357	10	0.41762	4	0.406	3
	0.3671	12	0.41298	5	0.395	6
	0.3749	13	0.42405	7	0.395	5
	0.4208	12	0.34309	5	0.363	3
	0.4447	13	0.34621	4	0.371	4
	0.3933	4	0.38376	4	0.417	5
	0.3825	6	0.40638	6	0.402	4
	0.4473	13	0.35192	6	0.354	2
	0.4067	5	0.36486	8	0.448	2
330	0.3664	3	0.35081	3	0.374	4
	0.3539	3	0.41396	4	0.354	3
	0.3881	5	0.33729	3	0.379	3
	0.4365	11	0.38088	6	0.434	3

A continuación se realizó el análisis estadística descriptiva. Los resultados obtenidos se pueden observar en las tablas de la 10 y 11.

**Tabla 10:**

**Estadística descriptiva para ADALINE para la variable Número de iteraciones para una radio base o AP**

N° DE ITERACIONES			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	7.991666667	7.75	4.566666667
Error típico	0.428745782	0.638653389	0.375311884
Mediana	6	5	4
Moda	5	4	4
Desviación estándar	4.696674728	6.996097351	4.111335699
Varianza de la muestra	22.0587535	48.94537815	16.90308123
Curtosis	3.021544833	2.825829121	13.56593709
Coefficiente de asimetría	1.528189226	1.795431173	3.610763304
Rango	24	35	21
Mínimo	2	2	2
Máximo	26	37	23
Suma	959	930	548
Cuenta	120	120	120

**Tabla 11:**

**Estadística descriptiva para ADALINE para la variable Error para una radio base o AP**

Error			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	0.405916621	0.411287935	0.402022684
Error típico	0.003842757	0.003609682	0.002939679
Mediana	0.406122714	0.415100634	0.406490564
Moda	N/A	N/A	0.407347322
Desviación estándar	0.042095292	0.03954208	0.032202566
Varianza de la muestra	0.001772014	0.001563576	0.001037005
Curtosis	-0.819757819	-0.111735772	-0.747586193
Coefficiente de asimetría	0.105165327	-0.269920639	-0.465567447
Rango	0.178118408	0.191172898	0.129228979
Mínimo	0.313992321	0.300670415	0.32030341
Máximo	0.492110729	0.491843313	0.44953239
Suma	48.70999452	49.35455215	48.24272206
Cuenta	120	120	120

En las tablas 12 y 13 se describe el análisis por cuadrante para la técnica ADALINE aplicada a una radio base o AP.

**Tabla 12:**

**Análisis por cuadrante de las iteraciones con ADALINE para una radio base o AP**

ANALISIS DE ITERACIONES POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	8.58	6.28	5.51
2	6.68	9.88	5.43
3	7.55	7.28	4.15
4	8.60	8.10	3.63

**Tabla 13:**

**Análisis por cuadrante del error con ADALINE para una radio base o AP**

ANALISIS DE ERROR POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	0.41	0.43	0.40
2	0.40	0.41	0.41
3	0.40	0.40	0.40
4	0.41	0.40	0.41

**4.2.3 Análisis de resultados para radio base o AP con ADALINE**

De las tablas 10, 11,12 y 13 podemos observar como el sistema con mejor desempeño es el arreglo binomial tanto por número promedio de iteraciones, número promedio de error, como la menor desviación típica de ambas variables.

Las variables de simetría y curtosis para el numero de iteraciones, muestran un comportamiento del sistema alejado estadísticamente de una distribución normal, lo cual muestra que los datos son dispersos y junto con la varianza denota un comportamiento altamente aleatorio en su desempeño independientemente del cuadrante de trabajo en el cual se requiere adecuar el patrón de radiación. Para la variable de error se presenta una aproximación a una distribución normal.

De las figuras 42 a la 50 de patrón de radiación y de número de iteraciones versus error, se observa en todos los arreglos circulares (uniforme, triangular y binomial), oscilaciones alrededor del error.

Cuando se hace un análisis de los cuadrantes, plasmado en las tablas 12 y 13, en forma independiente se observa los siguientes aspectos fundamentales:

- El error promedio y el número de iteraciones promedio por cuadrante son similares, lo cual significa que estos no son factores que sea importantes entre los cuadrantes.
- Los arreglos presenta un desempeño similar por cuadrante en el rango total de cero (0) a trescientos sesenta grados (360).

De lo anterior podemos decir o concluir como, la técnica de control del patrón de radiación con una técnica ADALINE para una radio base o AP, tiene mejor desempeño en el arreglo con alimentación binomial, esto teniendo en cuenta parámetros de iteraciones y la desviación típica tanto para el error como para el número de iteraciones

La técnica ADALINE, aplicada en un arreglo circular uniforme y triangular para una radio base o AP tiene comportamiento muy parecido al binomial, aunque el uniforme tiene como ventaja de ser mucho más fácil su implementación al no requerir cambiar la alimentación de cada elemento del arreglo, tal como se requiere en un arreglo uniforme binomial o triangular.

Teniendo en cuenta las dos conclusiones anteriores, el control de un arreglo uniforme para una radio base o AP, usando técnica ADALINE, es más adecuado para un arreglo circular binomial, de acuerdo su buen desempeño, aunque el uniforme posee la ventaja de su facilidad en la implementación a pesar de poseer un desempeño más bajo.

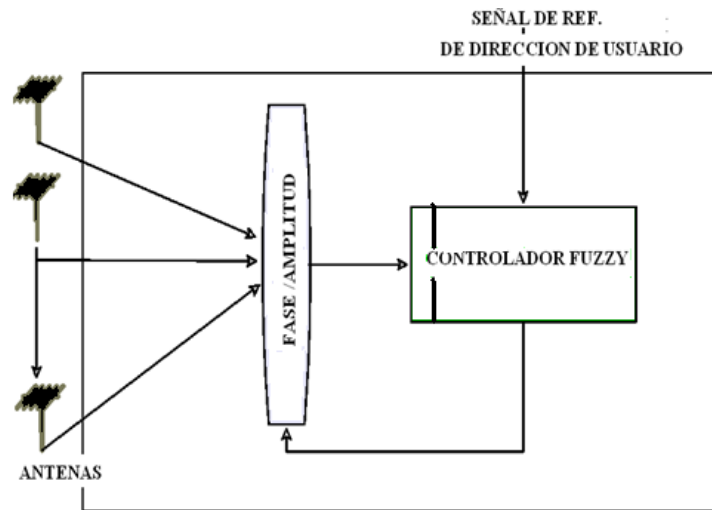
## **5 Aplicación de control de arreglo de antenas con lógica Difusa**

Tomando en cuenta los apartados anteriores nos enfocamos en definir los parámetros del arreglo de antenas se requieren controlar y aplicarle la técnica de control difuso.

De acuerdo al capítulo 1 donde se definen los tipos de arreglo y la manera de modificar el patrón de radiación, vamos a tomar dos elementos básicos, la fase y amplitud para desarrollar el control difuso.

Se hará un control sobre la fase de un arreglo (lineal para un usuario y circular para la radio base) para hacer el ajuste del patrón de radiación deseado. Los ajustes de fase requerida serán aquellos arrojados por el controlador difuso de acuerdo a las reglas planteadas para alcanzar el patrón y luego se tomara los valores de amplitud según el tipo de arreglo, uniforme, triangular o binomial.

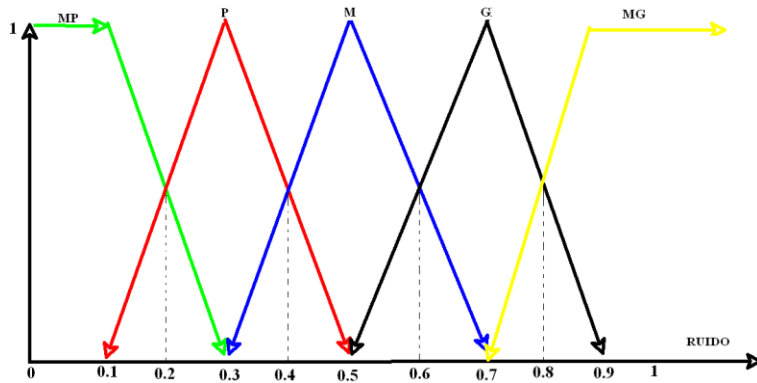
La arquitectura de la red de control difuso se muestra en la figura 51 y el algoritmo aplicado se encuentra en el apéndice B. Como se observa, se tiene los elementos radiantes los cuales ingresan al sistema de control de amplitud y fase. La amplitud se determinara por el tipo de arreglo (uniforme, triangular y binomial) y la fase se obtendrá al aplicar el control difuso. La señal de referencia servirá para determinar el error y ruido máximos deseado y partir de allí describir las reglas de control.



**Figura 51 Modelo de control de fase con técnica de control difuso (Fuente: Autor)**

Las variables de entradas usadas para el controlador difuso y tenidas en cuenta para la construcción de los conjuntos borrosos son el error simple de apuntamiento y el ruido asociado a distorsiones del patrón de radiación. En la figura 52 se muestra los conjuntos difuso para el ruido y en la figura 53 el conjunto difuso para el error. Además en las tablas 14 y 15 se encuentra la descripción de las variables de ruido y error respectivamente



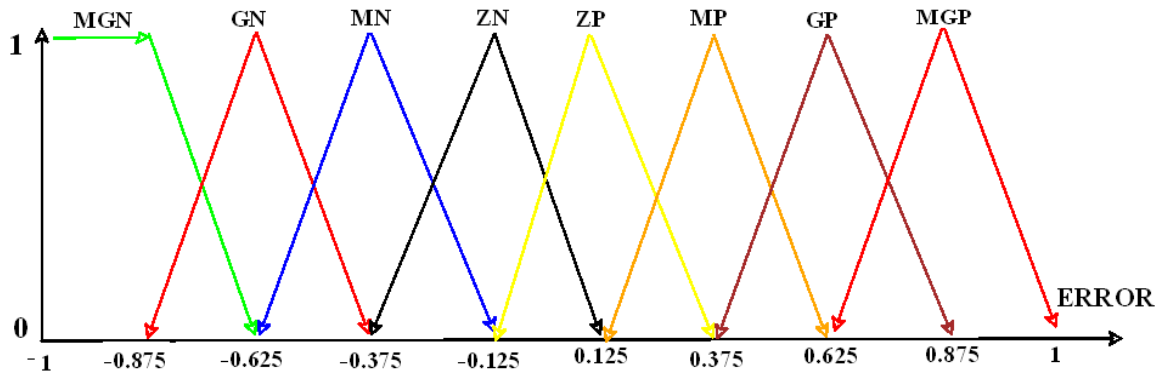


**Figura 52. Conjuntos difuso para el ruido.**

Fuente: Autor

Los conjuntos difuso para el ruido se determinaron entre un intervalo de 0 y 1 y se describió acorde al parámetro de relación espalda delante de una antena, definida como la relación existente entre la máxima potencia radiada en una dirección geométrica deseada y la potencia radiada en las direcciones opuestas o no deseadas.

Se determina 0 en ruido cuando el patrón de radiación es totalmente direccional y 1 cuando este es omnidireccional.



**Figura 53. Conjuntos difuso para el error.**

Fuente: Autor

Los conjuntos difusos para el error se definieron entre -1 y 1, indicado 0 cuando el patrón de radiación calculado coincide perfectamente su lóbulo principal con el lóbulo deseado y -1 y 1 cuando no existe ningún lóbulo con alguna coincidencia.

Es importante destacar, tanto para un usuario final como para una radio base se usan los mismos criterios para los conjuntos difusos pero con valores diferentes de error y ruido en la aplicación del algoritmo.

En la tabla 14 y 15 se especifican los significados de los conjuntos difusos de ruido y error.

**Tabla 14:**

**Descripción de la variable ruido control difuso**

<b>RUIDO</b>	<b>DEFINICION</b>
<b>MP</b>	<b>Muy Pequeño</b>
<b>P</b>	<b>Pequeño</b>
<b>M</b>	<b>Mediano</b>
<b>G</b>	<b>Grande</b>
<b>MG</b>	<b>Muy Grande</b>

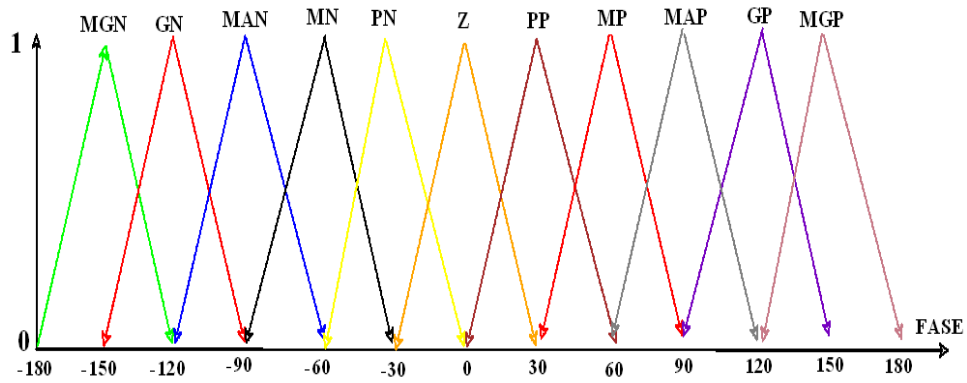
**Tabla 15:**

**Descripción de la variable error para control difuso**

<b>ERROR</b>	<b>DEFINICION</b>
<b>MGN</b>	<b>Muy Grande Negativo</b>
<b>GN</b>	<b>Grande Negativo</b>
<b>MN</b>	<b>Mediano Negativo</b>
<b>ZN</b>	<b>Cero Negativo</b>
<b>ZP</b>	<b>Cero Positivo</b>
<b>MP</b>	<b>Mediano Positivo</b>
<b>GP</b>	<b>Grande Positivo</b>
<b>MGP</b>	<b>Muy Grande Positivo</b>

La variable usada para alcanzar el patrón de radiación deseado será la fase. En la figura 54 se muestran los conjuntos difusos asociados a esta variable y en la tabla 16 el control de la variable de salida de fase para el control difuso.

Estos conjuntos fueron tomados teniendo en cuenta el ancho la separación de fase entre el valor deseado y la ubicación del lóbulo principal. Si analizamos el caso extremo es cuando el lóbulo principal se encuentra a  $\pm 180$  grados del lóbulo deseado, dependiendo de la dirección escogida y 0 cuando coincide exactamente el lóbulo deseado con el calculado. Además la separación del conjunto borroso es de 30 grados debido al ancho de haz requerido definido entre 20 a 30 grados.



**Figura 54. Conjuntos difuso para la fase.**

Fuente: Autor

**Tabla 16:**

**Descripción de la variable de salida de fase para control difuso**

FASE	DEFINICION
MGN	Muy Grande Negativo
GN	Grande Negativo
MAN	Mediana Alta Negativa
MN	Mediana Negativa
PN	Pequeña Negativa
Z	Cero
PP	Pequeña Positivo
MP	Mediana Positivo
MAP	Mediana Alta Positivo
GP	Grande Positiva
MGP	Muy Grande Positiva

Tomando los variables de entrada ruido y error entramos a construir la tabla 17 donde están las reglas difusas asociadas al sistema.

**Tabla 17:**

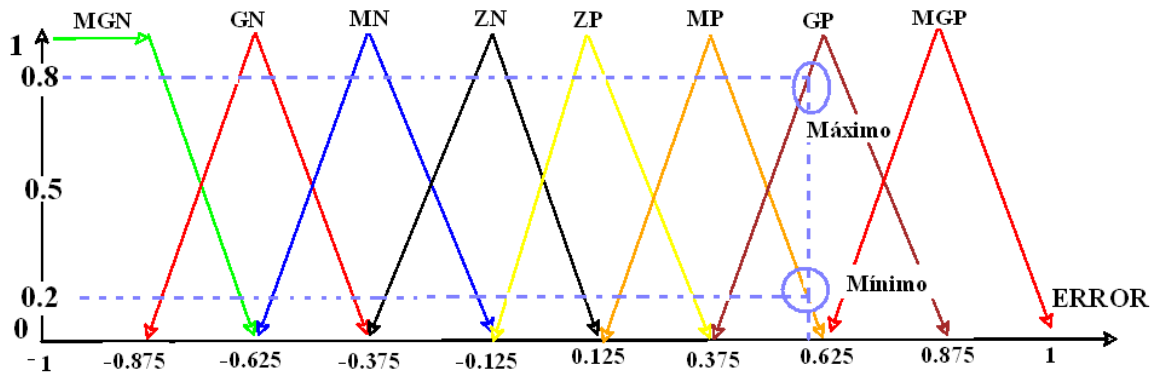
**Reglas difusa para el control del patrón de radiación**

ERROR/RUIDO	MP	P	M	G	MG
<b>MGN</b>	GP	GP	MGP	MGP	MGP
<b>GN</b>	GP	GP	GP	MGP	MGP
<b>MN</b>	MAP	MAP	GP	GP	GP
<b>ZN</b>	PP	PP	MP	MAP	MAP
<b>ZP</b>	PN	PN	MN	MN	MAN
<b>MP</b>	MAN	MAN	GN	GN	GN
<b>GP</b>	GN	GN	GN	MGN	MGN
<b>MGP</b>	GN	GN	MGN	MGN	MGN

Los operadores para determinar la pertenencia de los conjuntos difusos de las variables de entrada serán la OR (máximo) y para identificar la regla asociada usaremos implicación difusa Mamdani y defuzzyficador SOM (Smallest Of Max).

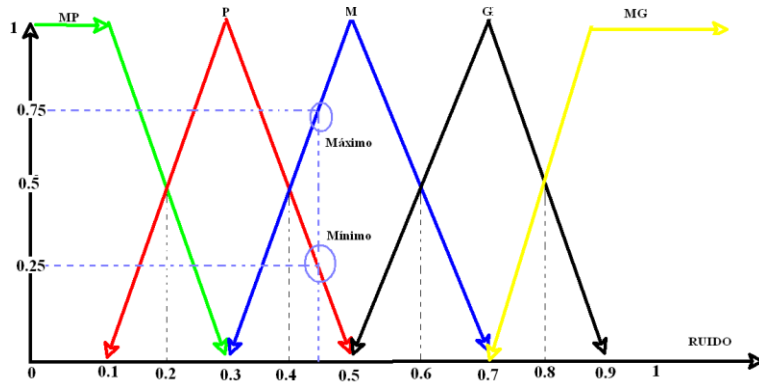
A continuación presentamos un ejemplo:

Si tenemos un error simple del patrón de radiación con respecto al patrón de referencia de 0.6 y un ruido asociado de 0.45 observando las figuras 55 y 56 para el análisis de pertenencia tenemos:



**Figura 55. Resultado del máximo para el error para ejemplo de control difuso.**

Fuente: Autor



**Figura 56. Resultado del máximo para el ruido para ejemplo del control borroso.**

Fuente: Autor

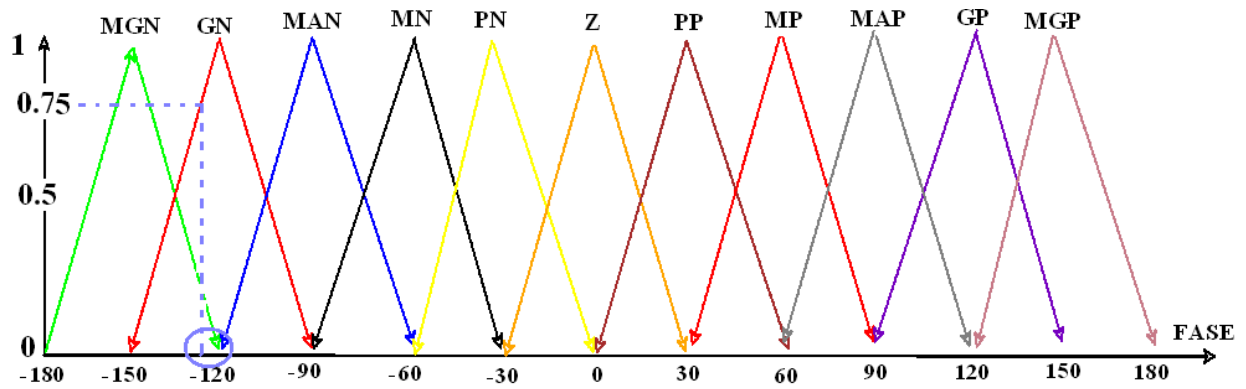
Si tomamos el máximo en ambos casos, vemos de la tabla 18 como la fase debe ser alterada con una acción Grande Negativa.

**Tabla 18:**

**Reglas difusa para el control del patrón de radiación para el ejemplo**

ERROR/RUIDO	MP	P	M	G	MG
<b>MGN</b>	GP	GP	MGP	MGP	MGP
<b>GN</b>	GP	GP	GP	MGP	MGP
<b>MN</b>	MAP	MAP	GP	GP	GP
<b>ZN</b>	PP	PP	MP	MAP	MAP
<b>ZP</b>	PN	PN	MN	MN	MAN
<b>MP</b>	MAN	MAN	GN	GN	GN
<b>GP</b>	GN	GN	<b>GN</b>	MGN	MGN
<b>MGP</b>	GN	GN	MGN	MGN	MGN

El valor de esta es; si tomamos para el defuzificador SOM (Smallest Of Max), es de 0.75 y el valor de fase es aproximadamente -125 grados como se puede observar en la figura 57



**Figura 57. Resultado SOM para la fase para el ejemplo del control borroso.** Fuente: Autor

La diferencia para entre un usuario y una radio base radicara en las condiciones del entorno de aplicación en la cual cambian las variables de error y ruido requeridos.

### 5.1 Para un usuario con lógica difusa

#### 5.1.1 Entorno de aplicación para un usuario con lógica difusa

La investigación se centra en el control del arreglo para un usuario final para alcanzar una radio base o AP, con las mejores características del patrón de radiación.

En la tabla 19 se encuentra un resumen de los parámetros básicos de un control difuso para un arreglo lineal para un usuario final.

**Tabla 19:**

#### Parámetros del análisis con técnica de control difuso

PARAMETROS	
Número de elementos	8(uniforme-Binomial) 7 Triangular
Separación (landas)	0,07
Ancho del haz (grados)	20
Ruido (%)	Menor de 15
Error (%)	Menor de 0,3

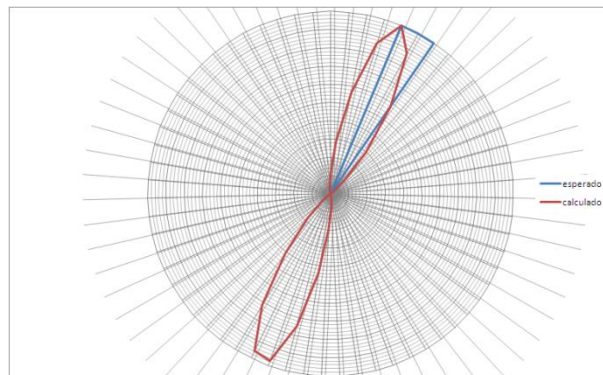
En las figuras presentadas en el capítulo 5.1.2 muestran el resultado en coordenadas polares y cartesianas respectivamente al aplicar el algoritmo de control difuso para un usuario final ubicado a 30, 210 y 330 grados con los diferentes tipos de arreglo lineal de antenas. En color azul aparece el patrón deseado y en rojo el patrón encontrado.

También se presenta una figura donde se muestra el comportamiento del número de iteraciones versus el error entre el patrón de radiación deseado y el patrón calculado por el control con el algoritmo difuso para un usuario final ubicando una radio base localizada a 30, 210 y 330 grados de él, con los diferentes tipos de arreglo lineal de antenas.

### 5.1.2 Resultados con arreglo para un usuario con lógica difusa.

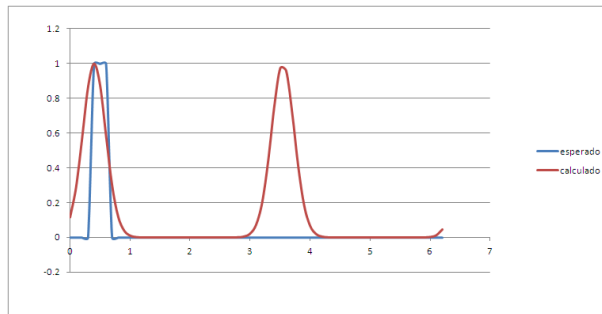
A continuación se presentan las figuras y tablas de resultados por cada tipo de arreglo de antenas.

#### Control difuso para un arreglo de antena lineal con alimentación uniforme



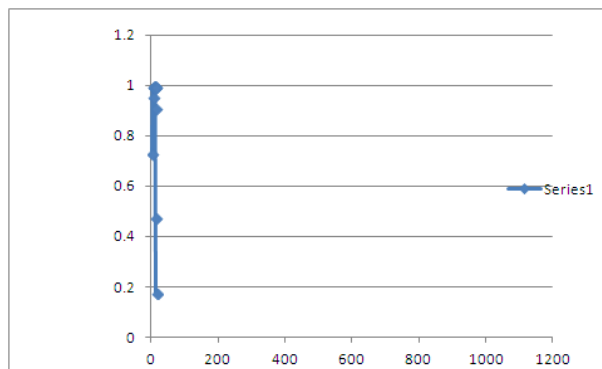
**Figura 58. Figura polar del patrón de radiación lineal uniforme difuso para un usuario final a treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 59. Figura cartesiana del patrón de radiación lineal uniforme difuso para un usuario final a treinta grados.**

Fuente: Autor

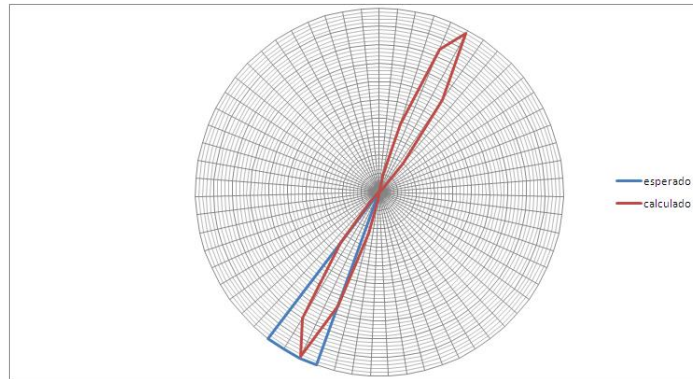


**Figura 60 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal uniforme difuso para un usuario final a treinta grados.**

Fuente: Autor

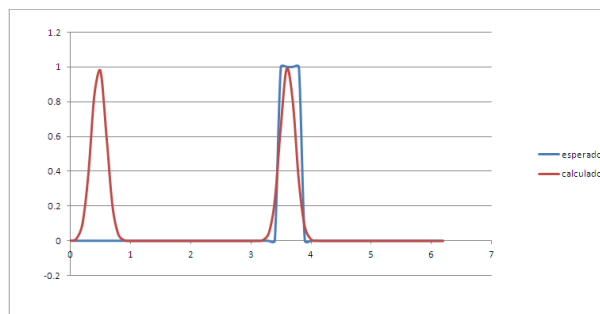


## Control difuso para un arreglo de antena lineal con alimentación triangular



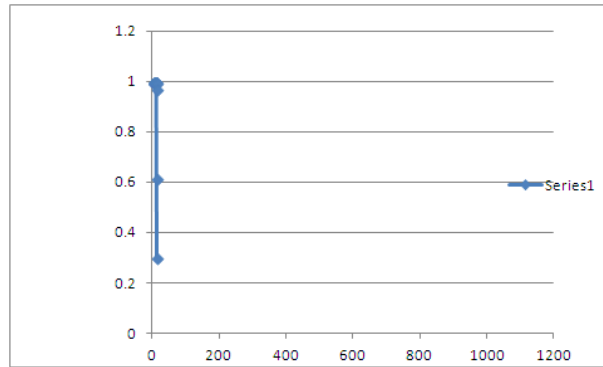
**Figura 61** Figura polar del patrón de radiación lineal triangular difuso para un usuario final a doscientos diez grados.

Fuente: Autor



**Figura 62.** Figura cartesiana del patrón de radiación lineal triangular difuso para un usuario final a doscientos diez grados.

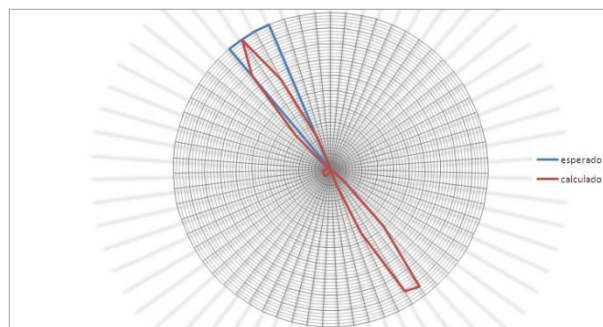
Fuente: Autor



**Figura 63. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal triangular borroso para un usuario final a doscientos diez grados.**

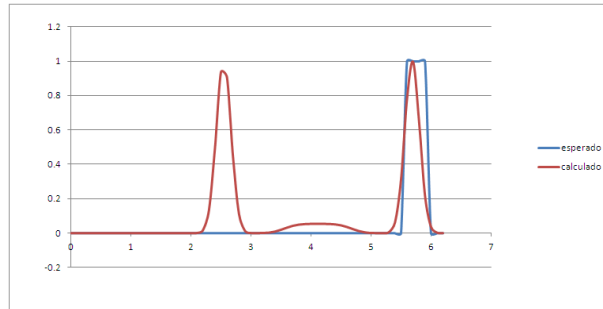
Fuente: Autor

**Control difuso para un arreglo de antena lineal con alimentación binomial**



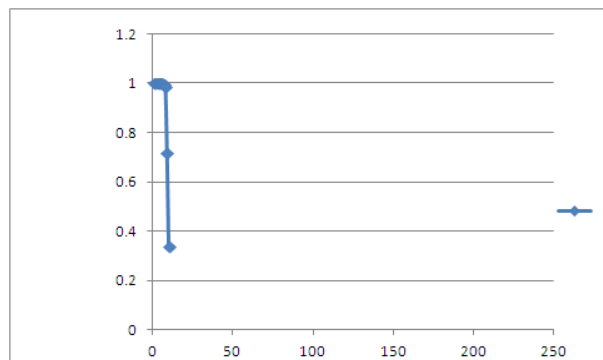
**Figura 64 Figura polar del patrón de radiación lineal binomial difuso para un usuario final a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 65. Figura cartesiana del patrón de radiación lineal binomial difuso para un usuario final a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 66. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal binomial difuso para un usuario final a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor

A continuación se muestra la tabla 20, donde están los datos asociados a los resultados de aplicar la técnica de control difuso para los diferentes tipos de arreglos lineales uniforme, triangular y binomial para un usuario final.

**Tabla 20:**

**Resultados de la simulación con control difuso para un usuario final**

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
0	0.12	9	0.08	10	0.06	10
	0.05	11	0.06	13	0.08	11
	0.06	9	0.08	10	0.07	9
	0.14	8	0.08	12	0.04	12
	0.19	12	0.19	10	0.08	10
	0.10	12	0.31	13	0.08	10
	0.10	12	0.06	12	0.12	10
	0.12	12	0.12	11	0.07	12
	0.15	9	0.24	10	0.07	9
	0.16	11	0.20	9	0.26	10
30	0.09	12	0.19	13	0.19	14
	0.17	14	0.18	13	0.21	14
	0.17	13	0.18	13	0.20	13
	0.09	13	0.19	13	0.21	14
	0.11	13	0.18	13	0.19	13
	0.16	11	0.18	13	0.22	12
	0.09	13	0.18	16	0.19	15
	0.14	11	0.18	13	0.22	14
	0.16	13	0.19	16	0.19	14
	0.19	14	0.18	13	0.19	15
60	0.16	3	0.28	4	0.30	4
	0.17	4	0.29	15	0.29	3
	0.19	4	0.29	4	0.29	14
	0.17	14	0.28	14	0.30	33
	0.15	15	0.29	2	0.30	17
	0.18	16	0.29	4	0.31	19
	0.15	15	0.29	4	0.31	19
	0.18	15	0.28	16	0.30	15
	0.17	5	0.29	4	0.31	3
	0.18	15	0.29	19	0.31	17
90	0.18	4	0.29	5	0.31	20
	0.15	4	0.29	3	0.31	3
	0.16	6	0.29	19	0.30	6
	0.17	7	0.28	2	0.31	6
	0.15	5	0.28	2	0.31	6
	0.15	4	0.28	20	0.30	6
	0.17	5	0.29	19	0.30	21
	0.17	5	0.29	4	0.31	6
	0.15	3	0.28	5	0.31	6
	0.18	3	0.29	6	0.30	3

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
120	0.19	6	0.22	5	0.22	4
	0.14	9	0.21	5	0.19	6
	0.15	5	0.18	5	0.19	7
	0.09	8	0.21	7	0.22	7
	0.19	5	0.22	4	0.22	7
	0.17	4	0.23	6	0.19	8
	0.13	7	0.18	7	0.22	6
	0.16	6	0.20	5	0.19	7
	0.13	6	0.18	8	0.22	7
	0.19	5	0.19	7	0.19	7
150	0.15	9	0.18	9	0.20	7
	0.15	9	0.18	7	0.23	8
	0.15	10	0.18	9	0.21	7
	0.13	8	0.27	9	0.22	8
	0.13	6	0.20	10	0.19	11
	0.14	11	0.18	8	0.19	7
	0.14	8	0.22	10	0.22	10
	0.15	11	0.22	10	0.19	7
	0.17	8	0.21	11	0.19	8
	0.17	8	0.22	6	0.19	9
180	0.19	10	0.29	9	0.30	9
	0.19	12	0.29	29	0.31	26
	0.18	14	0.29	27	0.30	27
	0.16	10	0.29	12	0.30	28
	0.19	13	0.29	12	0.30	11
	0.17	11	0.28	12	0.30	11
	0.19	13	0.29	26	0.30	26
	0.15	9	0.28	10	0.30	11
	0.15	9	0.30	13	0.30	9
	0.18	11	0.29	9	0.31	11
210	0.15	12	0.29	17	0.30	12
	0.17	14	0.29	13	0.29	11
	0.18	12	0.29	13	0.30	13
	0.17	14	0.29	12	0.30	14
	0.19	14	0.28	12	0.30	13
	0.18	15	0.28	12	0.30	17
	0.17	11	0.29	15	0.31	15
	0.18	13	0.30	29	0.31	13
	0.15	13	0.29	12	0.30	15
	0.17	16	0.30	13	0.30	12

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
240	0.18	14	0.17	3	0.27	2
	0.11	14	0.18	2	0.19	3
	0.09	3	0.22	2	0.19	16
	0.11	14	0.22	4	0.20	4
	0.17	5	0.29	2	0.25	14
	0.11	13	0.20	4	0.19	15
	0.11	14	0.18	3	0.18	16
	0.17	3	0.25	14	0.21	15
	0.18	3	0.18	14	0.18	15
	0.10	3	0.23	14	0.19	15
270	0.19	3	0.18	6	0.19	3
	0.19	5	0.18	6	0.27	3
	0.09	5	0.18	2	0.19	5
	0.16	7	0.22	3	0.24	4
	0.14	5	0.19	4	0.19	5
	0.09	5	0.17	6	0.19	2
	0.15	4	0.18	4	0.19	3
	0.13	5	0.17	5	0.23	4
	0.14	7	0.23	3	0.19	5
	0.11	5	0.18	6	0.27	5
300	0.16	5	0.29	6	0.30	5
	0.18	4	0.28	5	0.30	6
	0.18	6	0.28	7	0.30	5
	0.18	5	0.29	22	0.31	5
	0.18	9	0.29	6	0.30	7
	0.16	5	0.30	8	0.29	8
	0.17	6	0.28	8	0.30	5
	0.16	7	0.28	7	0.29	9
	0.15	5	0.29	7	0.30	5
	0.15	8	0.28	6	0.30	8
330	0.18	8	0.28	10	0.30	24
	0.15	7	0.30	10	0.30	10
	0.19	11	0.28	11	0.30	9
	0.19	9	0.29	8	0.29	10
	0.15	9	0.29	9	0.31	10
	0.15	8	0.30	9	0.31	9
	0.18	6	0.30	12	0.30	7
	0.18	10	0.29	10	0.30	10
	0.17	8	0.29	9	0.30	8
	0.15	9	0.28	8	0.30	7

A continuación se realizó el análisis estadística descriptiva. Los resultados obtenidos se pueden observar en las tablas 21 y 22.

**Tabla 21:**

**Estadística descriptiva para control difuso para la variable Número de iteraciones para un usuario final**

N° DE ITERACIONES			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	8.841666667	9.641666667	10.341666667
Error típico	0.345842825	0.510642457	0.534849364
Mediana	9	9	9
Moda	5	13	7
Desviación estándar	3.788518332	5.593807851	5.858981231
Varianza de la muestra	14.35287115	31.29068627	34.32766106
Curtosis	-1.255110529	2.020513306	2.12034472
Coefficiente de asimetría	0.11610602	1.174079361	1.264546773
Rango	13	27	31
Mínimo	3	2	2
Máximo	16	29	33
Suma	1061	1157	1241
Cuenta	120	120	120

**Tabla 22:**

**Estadística descriptiva para control difuso para el error para un usuario final**

Error			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	0.154057074	0.238355146	0.244174475
Error típico	0.002850408	0.005526791	0.006280697
Mediana	0.161025301	0.278328001	0.281063005
Moda	N/A	N/A	N/A
Desviación estándar	0.031224659	0.060542967	0.068801586
Varianza de la muestra	0.000974979	0.003665451	0.004733658
Curtosis	0.877459568	0.141587156	0.456191153
Coefficiente de asimetría	-1.121319746	-0.883966781	-1.025438674
Rango	0.14639353	0.249459393	0.272360511
Mínimo	0.048174687	0.063081585	0.035740666
Máximo	0.194568217	0.312540978	0.308101177
Suma	18.48684888	28.60261758	29.30093703
Cuenta	120	120	120

En las tablas 23 y 24 se describe el análisis por cuadrante para la técnica difusa aplicada a un usuario.

**Tabla 23:**

**Análisis de iteraciones por cuadrante con control difuso para un usuario final**

<b>ANALISIS DE ITERACIONES POR CUADARANTES</b>			
<b>CUADRANTE</b>	<b>UNIFORME</b>	<b>TRIANGULAR</b>	<b>BINOMIAL</b>
1	9.60	10.43	11.92
2	7.68	9.80	10.00
3	9.58	10.35	11.45
4	6.53	7.43	6.87

**Tabla 24 :**

**Análisis de error por cuadrante con control difuso para un usuario final**

<b>ANALISIS DE ERROR POR CUADARANTES</b>			
<b>CUADRANTE</b>	<b>UNIFORME</b>	<b>TRIANGULAR</b>	<b>BINOMIAL</b>
1	0.15	0.22	0.22
2	0.16	0.25	0.25
3	0.15	0.24	0.26
4	0.16	0.25	0.27

**5.1.3 Análisis de resultados con lógica difusa para un usuario final**

De las tablas 21, 22, 23 y 24 podemos observar como el sistema con mejor desempeño es el arreglo uniforme tanto por número promedio de iteraciones, número promedio de error, como la menor desviación típica de ambas variables. El arreglo binomial y triangular tiene un desempeño similar con la ventaja de este último de requerir un dipolo menos en el arreglo lineal de antenas.

De las figuras del patrón de radiación y de número de iteraciones versus error, se observa como para ninguno de los arreglos se presenta oscilaciones alrededor del error, lo cual indica que el controlador difuso no le genera oscilaciones al arreglo lineal de antenas.

Cuando se hace un análisis de los cuadrantes en forma independiente se observa los siguientes aspectos fundamentales:



- El error promedio en todos los cuadrantes son muy similares lo cual indica un uniforme desempeño de esta variable en el rango de 0 a 360 grados.
- Para el número de iteraciones se presentan desempeños diferentes por cuadrante. El cuarto cuadrante es el menor promedio de iteraciones en todos los arreglos (uniforme, binomial y triangular).
- El arreglo uniforme es de mejor desempeño por cuadrante y en el rango total de cero (0) a trescientos sesenta grados (360).
- La técnica de control del patrón de radiación con un controlador difuso, tiene mejor desempeño en el arreglo con alimentación uniforme, esto teniendo en cuenta parámetros como el número de iteraciones, la desviación típica tanto para el error como para el numero de iteraciones
- La técnica difusa, aplicada en un arreglo lineal uniforme tiene la ventaja de ser más fácil su implementación debido a no requerir cambiar la alimentación de cada elemento del arreglo, tal como se necesita en un arreglo uniforme binomial o triangular.

Teniendo en cuenta las dos conclusiones anteriores, el control de un arreglo uniforme, usando un controlador difuso, es más adecuado para un arreglo lineal uniforme, tanto por desempeño como por la facilidad de implementación.

## **5.2 Para un radio base o AP con lógica difusa**

### **5.2.1 Entorno de aplicación para una radio base o AP con lógica difusa**

En la tabla 25 hay un resumen de los parámetros que se usaron para el arreglo circular de antenas con la técnica de control difusa para una radio base o AP.

**Tabla 25:**

**Parámetros del análisis con técnica de control difuso para una radio base o AP**

PARAMETROS	
Número de elementos	4(uniforme-Binomial) 3 Triangular
Radio (landas)	0,01-0,07
Ancho del haz (grados)	20
Ruido (%)	Menor de 30
Error (%)	Menor de 0,3

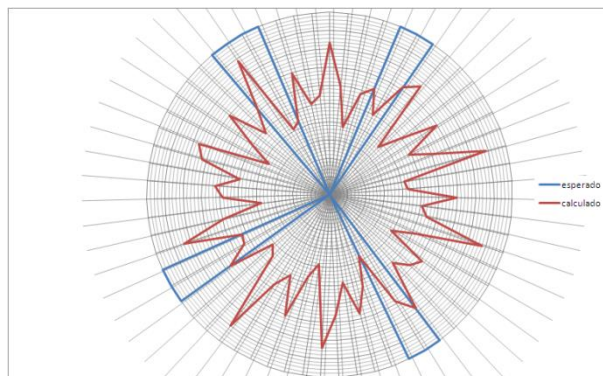
En las figuras presentadas en el capítulo 5.2.2 muestran el resultado en coordenadas polares y cartesianas respectivamente al aplicar el algoritmo de control difuso para una radio base con los diferentes tipos de arreglo circular de antenas. En color azul aparece el patrón deseado y en rojo el patrón encontrado.

También se presenta una figura donde se muestra el comportamiento del número de iteraciones versus el error entre el patrón de radiación deseado y el patrón calculado por el control con el algoritmo de control difuso, para una radio base que quiere alcanzar cuatro usuarios simultáneamente con los diferentes tipos de arreglo circular de antenas.

**5.2.2 Resultados con arreglo para una radio base o AP con lógica difusa**

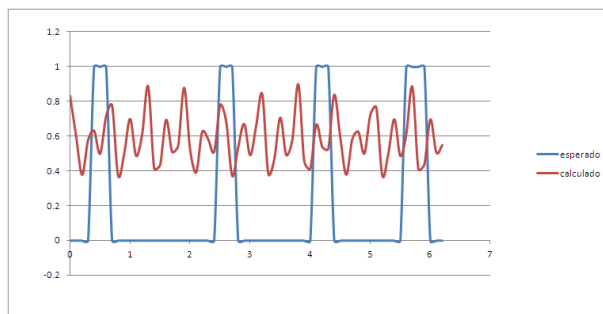
A continuación se presentan las figuras y tablas de resultados por cada tipo de arreglo de antenas.

## Control difuso para un arreglo de antena circular con alimentación uniforme



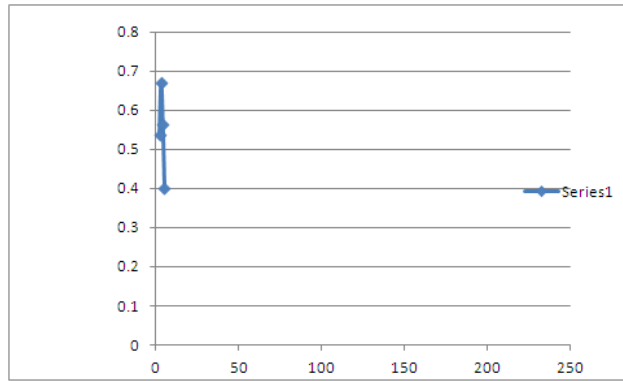
**Figura 67. Figura polar del patrón de radiación circular uniforme difuso para una radio base o AP a treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 68. Figura cartesiana del patrón de radiación circular uniforme difuso para una radio base o AP a treinta grados.**

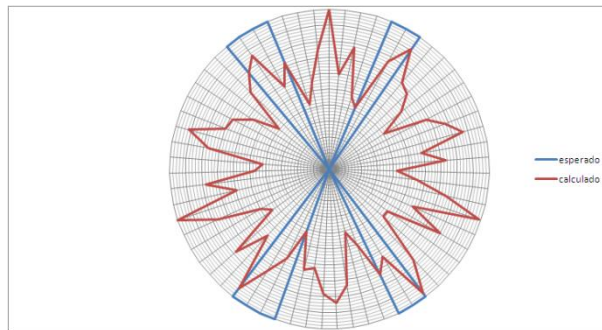
Fuente: Autor



**Figura 69. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular uniforme difuso para una radio base o AP a treinta grados.**

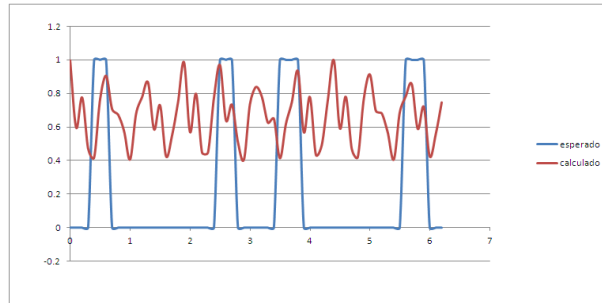
Fuente: Autor

**Control difuso para un arreglo de antena circular con alimentación triangular**



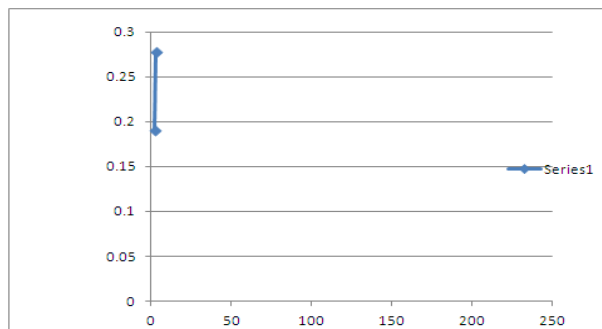
**Figura 70. Figura polar del patrón de radiación circular triangular difuso para una radio base o AP a doscientos diez grados.**

Fuente: Autor



**Figura 71. Figura cartesiana del patrón de radiación circular triangular difuso para una radio base o AP a doscientos diez grados.**

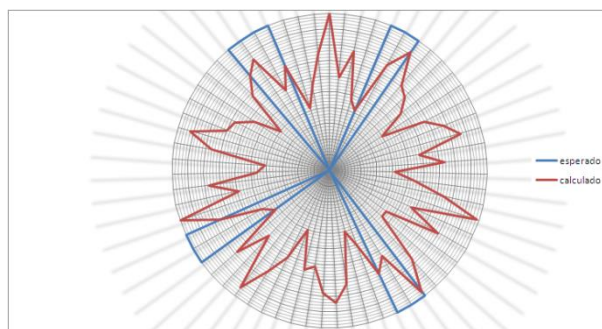
Fuente: Autor



**Figura 72 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular triangular difuso para una radio base o AP a doscientos diez grados.**

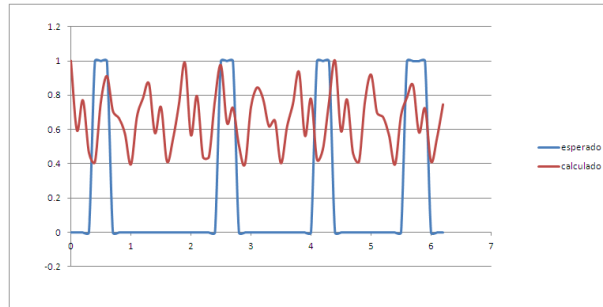
Fuente: Autor

### Control difuso para un arreglo de antena circular con alimentación binomial



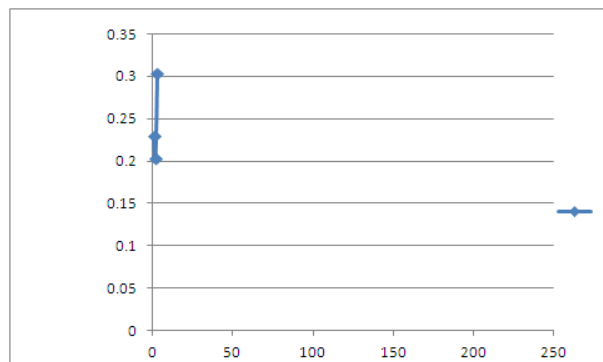
**Figura 73 Figura polar del patrón de radiación circular binomial difuso para una radio base o AP a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 74. Figura cartesiana del patrón de radiación circular binomial difuso para una radio base o AP a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 75 Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación circular binomial difuso para una radio base o AP a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor

A continuación se muestra en la tabla 26 los datos asociada a los resultados de aplicar la técnica de control difuso para los diferentes tipos de arreglos circulares uniforme, triangular y binomial.

**Tabla 26:**

**Resultados de la simulación con control difuso para una radio base o AP**

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
0	0.37012	2	0.39875	4	0.2890235	2
	0.44546	3	0.29327	3	0.3962527	4
	0.42476	4	0.39503	5	0.3895353	2
	0.38689	2	0.28458	2	0.3842271	3
	0.4391	3	0.292	3	0.289627	3
	0.37807	3	0.26478	2	0.2890016	3
	0.3784	4	0.29057	3	0.3902173	2
	0.38061	2	0.39608	6	0.3781324	2
	0.38683	3	0.38406	3	0.3952371	6
	0.37409	2	0.29287	2	0.2911532	3
30	0.39425	3	0.36385	4	0.3066294	3
	0.46684	5	0.36454	4	0.3073641	3
	0.47918	5	0.2827	2	0.312296	2
	0.40329	4	0.30546	2	0.2774116	2
	0.40104	3	0.27643	2	0.2681851	2
	0.39343	3	0.33656	2	0.30078	2
	0.39517	2	0.34467	2	0.3614938	4
	0.38583	3	0.30569	3	0.3651697	3
	0.45611	4	0.37202	2	0.3116027	3
	0.40275	2	0.30714	3	0.308105	3
60	0.4224	4	0.31895	2	0.3126281	3
	0.41237	3	0.3006	2	0.3048171	3
	0.44628	2	0.33247	3	0.3100909	2
	0.44094	4	0.28622	2	0.2951146	2
	0.41574	2	0.29799	2	0.3142804	2
	0.41342	2	0.32698	2	0.2946151	2
	0.41214	2	0.33011	2	0.3103667	3
	0.447	4	0.33143	3	0.3271423	2
	0.4014	2	0.30015	3	0.3249041	2
	0.37782	3	0.33363	2	0.3341574	2
90	0.37199	2	0.30549	2	0.3081492	2
	0.42567	4	0.31032	2	0.310596	2
	0.4135	3	0.34656	2	0.3466776	2
	0.41811	4	0.3042	3	0.3066111	2
	0.40717	4	0.30243	2	0.3465106	3
	0.41752	3	0.31015	2	0.3007954	2
	0.43283	4	0.34571	3	0.3138268	2
	0.40994	2	0.34026	2	0.3418877	2
	0.42063	4	0.31575	3	0.3475607	2
	0.42059	4	0.30542	3	0.3471119	2

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
120	0.42634	2	0.29247	3	0.3521245	3
	0.3913	2	0.33816	3	0.3360486	2
	0.42226	3	0.31868	2	0.2918434	2
	0.42695	5	0.29559	2	0.2851214	3
	0.42256	4	0.30955	2	0.2786429	3
	0.42761	2	0.29207	2	0.2880323	3
	0.42306	3	0.3449	3	0.3151217	2
	0.42381	4	0.29627	3	0.2781992	3
	0.43214	4	0.32112	2	0.3195669	2
0.42628	3	0.35224	3	0.2781562	3	
150	0.40327	3	0.35913	3	0.304781	3
	0.3868	2	0.30127	3	0.3629732	3
	0.40062	2	0.36182	3	0.3037878	2
	0.38993	2	0.36175	3	0.3046989	3
	0.40299	5	0.30949	2	0.3121349	2
	0.39687	2	0.29783	2	0.3064562	3
	0.40247	4	0.31114	2	0.3639109	4
	0.39473	3	0.30632	3	0.3720576	2
	0.40257	2	0.37206	2	0.2859015	2
0.3939	2	0.30819	3	0.3624785	5	
180	0.40213	3	0.3666	2	0.3024893	2
	0.40438	2	0.31606	3	0.3131716	2
	0.39581	3	0.29289	2	0.3140126	3
	0.39833	2	0.31561	3	0.3654596	2
	0.39994	4	0.31863	2	0.3154452	2
	0.3943	3	0.31538	2	0.3693033	2
	0.40596	3	0.35104	2	0.3159003	3
	0.39915	3	0.31027	3	0.3151086	2
	0.42188	4	0.30885	3	0.2805405	2
0.42457	2	0.31607	3	0.3701088	2	
210	0.41349	2	0.39839	4	0.3975205	4
	0.39168	2	0.33997	2	0.2838193	3
	0.39348	4	0.27798	2	0.2842661	3
	0.41764	2	0.28679	2	0.2543325	2
	0.43431	3	0.28274	3	0.2865444	2
	0.39402	2	0.39588	2	0.2868071	3
	0.38284	2	0.28216	2	0.3673697	2
	0.35902	5	0.39944	2	0.3980334	4
	0.36992	2	0.25156	2	0.3971313	4
0.44353	4	0.35837	2	0.2859796	3	



GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
240	0.40063	2	0.31014	3	0.2995155	2
	0.42616	3	0.31219	3	0.3473562	2
	0.39278	2	0.2674	2	0.3028053	3
	0.40243	4	0.36569	3	0.3655588	2
	0.39454	3	0.30148	3	0.3622223	2
	0.40136	2	0.30366	2	0.3651768	3
	0.38954	2	0.36473	5	0.3616968	2
	0.42762	4	0.2888	2	0.3617048	3
	0.40249	5	0.31036	2	0.3638214	3
	0.38995	4	0.36559	2	0.3123247	3
270	0.39167	3	0.35941	2	0.3088501	3
	0.44771	3	0.35413	2	0.3136503	3
	0.40169	2	0.3098	2	0.308778	2
	0.40185	3	0.35788	2	0.3094888	2
	0.42835	3	0.31408	2	0.3053829	3
	0.40882	4	0.30637	3	0.3508183	2
	0.41155	4	0.28169	2	0.3507964	2
	0.42412	2	0.35394	4	0.3446563	2
	0.43028	4	0.31223	2	0.352893	2
	0.40044	2	0.31217	2	0.3477484	2
300	0.38053	2	0.32472	2	0.315055	2
	0.39863	2	0.30376	2	0.3303909	2
	0.40112	3	0.31108	3	0.301395	2
	0.39791	4	0.30374	3	0.3096318	3
	0.40747	3	0.31137	2	0.3442801	2
	0.39711	4	0.30984	2	0.3318379	2
	0.44058	3	0.30822	2	0.3542823	3
	0.42081	2	0.35829	3	0.337653	5
	0.35292	4	0.30116	2	0.3467369	2
	0.40137	2	0.34673	2	0.3551897	3
330	0.4025	3	0.30573	3	0.3697598	2
	0.39012	2	0.37195	2	0.3434744	2
	0.44581	4	0.30334	3	0.3607333	2
	0.40263	2	0.30941	3	0.3719636	2
	0.39494	2	0.3715	2	0.3650761	3
	0.40005	3	0.28074	2	0.3628287	3
	0.40147	3	0.37165	2	0.3711376	2
	0.42849	2	0.31171	2	0.3715418	2
	0.40264	5	0.29064	2	0.3039826	3
	0.39139	2	0.36019	5	0.3612939	4

A continuación se realizó el análisis estadística descriptiva. Los resultados obtenidos se pueden observar en las tablas 27 y 28.

**Tabla 27:**

**Estadística descriptiva para control difuso para la variable Número de iteraciones para una radio base o AP**

N° DE ITERACIONES			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	2.983333333	2.533333333	2.558333333
Error típico	0.086143107	0.069947292	0.068799055
Mediana	3	2	2
Moda	2	2	2
Desviación estándar	0.94365046	0.766234198	0.753655889
Varianza de la muestra	0.89047619	0.587114846	0.567997199
Curtosis	-0.927767669	4.261662044	3.765280936
Coefficiente de asimetría	0.460687426	1.823808047	1.654912923
Rango	3	4	4
Mínimo	2	2	2
Máximo	5	6	6
Suma	358	304	307
Cuenta	120	120	120

**Tabla 28:**

**Estadística descriptiva para control difuso para la variable error para una radio base o AP**

Error			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	0.407874871	0.322817421	0.328817992
Error típico	0.001963395	0.002996324	0.003121921
Mediana	0.402537778	0.31125854	0.315283448
Moda	N/A	N/A	N/A
Desviación estándar	0.021507909	0.032823083	0.034198933
Varianza de la muestra	0.00046259	0.001077355	0.001169567
Curtosis	0.66113205	-0.37327158	-0.968337952
Coefficiente de asimetría	0.470621199	0.583610128	0.222534587
Rango	0.126268566	0.147875756	0.143700987
Mínimo	0.352915257	0.251564473	0.254332453
Máximo	0.479183823	0.399440229	0.39803344
Suma	48.94498447	38.73809057	39.45815903
Cuenta	120	120	120

En las tablas 29 y 30 se describe el análisis por cuadrante para la técnica difusa aplicada a una radio base o AP.

**Tabla 29:**

**Análisis de iteraciones por cuadrante con control difuso para una radio base o AP**

ANALISIS DE ITERACIONES POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	3.10	2.65	2.54
2	3.05	2.50	2.45
3	2.95	2.45	2.50
4	2.90	2.40	2.47

**Tabla 30 :**

**Análisis de error por cuadrante con control difuso para una radio base o AP**

ANALISIS DE ERROR POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	0.41	0.32	0.33
2	0.41	0.32	0.32
3	0.41	0.32	0.33
4	0.41	0.32	0.34

**5.2.3 Análisis de resultados para una radio base o AP con lógica difusa**

De las tablas 27, 28, 29 y 30 podemos observar como el sistema con mejor desempeño es el arreglo triangular tanto por número de iteraciones como por el error. El arreglo binomial tiene mejor desempeño en comparación con el uniforme aunque este último tiene la ventaja de no necesitar ejecutar cambios sobre la amplitud.

De las figuras 67 a la 75 del patrón de radiación y de número de iteraciones versus error, se observa como ninguno de los arreglos presenta grandes oscilaciones alrededor del error, lo cual indica que el controlador difuso no le genera un gran número de oscilaciones al arreglo circular de antenas.

Cuando se hace un análisis de los cuadrantes en forma independiente se observa los siguientes elementos fundamentales:

- El error promedio y el número de iteraciones promedio en todos los cuadrantes son muy similares lo cual indica un comportamiento del desempeño de estas variables es parejo en todo el rango de 0 a 360 grados.

- La técnica difusa, aplicada en un arreglo circular uniforme tiene la ventaja de su implementación es mucho más fácil al no requerir cambiar la alimentación de cada elemento del arreglo, tal como se necesita en un arreglo circular binomial o triangular y su desempeño es muy parecido al triangular.

Teniendo en cuenta los apartados anteriores, el control de un arreglo circular, usando un controlador difuso, es más adecuado para un arreglo uniforme, debido al tener un desempeño adecuado y la facilidad de su implementación.

## 6 Aplicación de control de arreglo de antenas con algoritmos evolutivos

Tomando como referencia el capítulo 3.4 sobre algoritmos evolutivos, se definió todos los aspectos relevantes para la aplicación del mismo.

### Codificación y población

Igual a las dos técnicas anteriores, la ADALINE y la difusa, se decido ejercer control sobre la fase para aplicación del algoritmo y usar arreglos de antenas (lineales y circulares) uniforme, triangular y binomial. Por lo cual la codificación se ejercerá como un cromosoma de  $n$  genes, correspondiente a la fase de cada elemento del arreglo de antenas.

La codificación directa será de tipo real para cada gen del cromosoma, asociado al número de elementos radiantes.

$$Cromosoma = w(1), w(2) \dots \dots w(n - 1), w(n) \quad (65)$$

Donde cada elemento  $w(i)$  del vector cromosoma corresponde la fase del elemento radiante  $i$ .

La definición de la población inicial es aleatoria y su tamaño será de diez, la cual será constante en toda la aplicación del algoritmo evolutivo. Podemos definir la población total con sus cromosomas como una matriz, ver ecuación (66), donde las filas corresponden a un individuo con cada genética asociada.

$$\begin{bmatrix} w_1(1), w_1(2) \dots \dots w_1(n-1), w_1(n) \\ w_2(1), w_2(2) \dots \dots w_2(n-1), w_2(n) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ w_k(1), w_k(2) \dots \dots w_k(n-1), w_k(n) \end{bmatrix} \quad (66)$$

Don de k corresponde al tamaño de la población.

### **Función de criterio de evaluación**

Se define como función de criterio de evaluación, el error simple entre el patrón de radiación producto del arreglo con el individuo  $k$  y el patrón de referencia del patrón deseado. La evaluación se hará para cada individuo de la población para formar un vector de error, ver ecuación (67), el cual servirá posteriormente para aplicar el algoritmo de selección.

$$error = \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots \dots \varepsilon_k \quad (67)$$

El algoritmo se aplica repetidamente hasta encontrar los individuos cuya evaluación alcancen un valor determinado.

### **Algoritmo de selección**

Debido a querer conservar el mejor individuo de cada población, se tomó la decisión de usar el método de selección elitista, sobre los cuales se aplicaran los operadores de mutación o cruce con sus variantes.

Los otros métodos no fueron seleccionados debido a su complejidad, por lo cual requieren mayor procesamiento y haría más lenta la respuesta en caso de hacer su implementación en el esquema de control.

Se usara el vector de error para tomar la decisión del o los mejores individuos, dependiendo del operador usado de cruce o mutación.

### **Operadores**

Los operadores utilizados fueron dos para el arreglo de antenas:

- Cruce de un punto. Se elegirán los dos mejores individuos por el método elitista y sobre este se genera una nueva población conservando los dos mejores individuos usados para generar el total de la población.

- Mutación. Se selecciona el mejor individuo y a partir de él, se hacen modificaciones de un punto del cromosoma, elegido aleatoriamente para luego ser mutado su valor de igual forma entre 0 y  $2\pi$ . De esta manera se genera una nueva población conservando el mejor individuo.

Estos operadores fueron usados en forma individual en el arreglo de antenas, no en forma combinada. Esta técnica solo se utilizó para un usuario final no para radio base o AP.

El algoritmo usado, que aparece en el anexo C.

## 6.1 Para un usuario con algoritmos evolutivos

### 6.1.1 Entorno de aplicación para un usuario con algoritmos evolutivos

La investigación se centra en el control del arreglo para un usuario final para alcanzar una radio base o AP, con las mejores características del patrón de radiación.

En la tabla 31 se encuentra un resumen de los parámetros usados para un arreglo lineal uniforme con algoritmos evolutivos para un usuario final.

**Tabla 31:**

#### Parámetros del análisis con técnica de control con algoritmos evolutivos

PARAMETROS	
Número de elementos	8(uniforme-Binomial) 7 Triangular
Operador	Mutación-Cruce
Separación (landas)	0,01-0,07
Ancho del haz (grados)	20
Ruido (%)	Menor de 15
Error (%)	Menor de 0,45

En las figuras presentadas en el capítulo 6.1.2 muestran el resultado en coordenadas polares y cartesianas respectivamente al aplicar el algoritmo evolutivo-mutación, para un

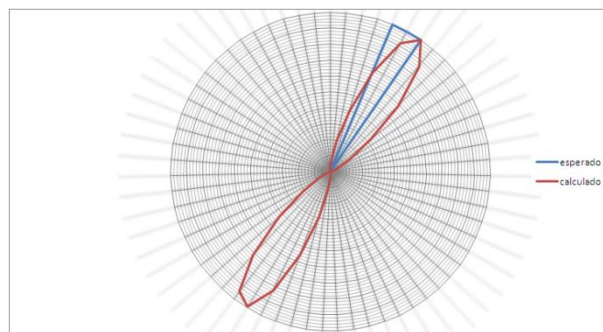
usuario final ubicado a 30, 210 y 330 grados con los diferentes tipos de arreglo lineal de antenas. En color azul aparece el patrón deseado y en rojo el patrón encontrado.

También se presenta una figura donde se muestra el comportamiento del número de iteraciones versus el error entre el patrón de radiación deseado y el patrón calculado por el control con el algoritmo evolutivo-mutación, para un usuario final ubicando una radio base localizada a 30,210 y 330 grados de él, con los diferentes tipos de arreglo lineal de antenas.

### 6.1.2 Resultados con arreglo lineal con algoritmos evolutivos mutación para un usuario final.

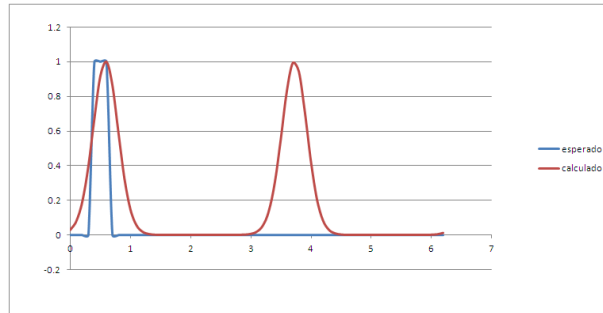
A continuación se presentan las figuras y tablas de resultados por cada tipo de arreglo de antenas.

#### Control con algoritmos evolutivos-mutación para un arreglo de antena lineal con alimentación uniforme para un usuario final



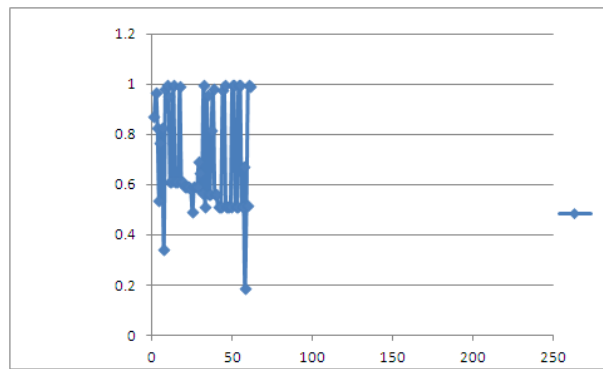
**Figura 76. Figura polar del patrón de radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 77. Figura cartesiana del patrón de radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a treinta grados.**

Fuente: Autor

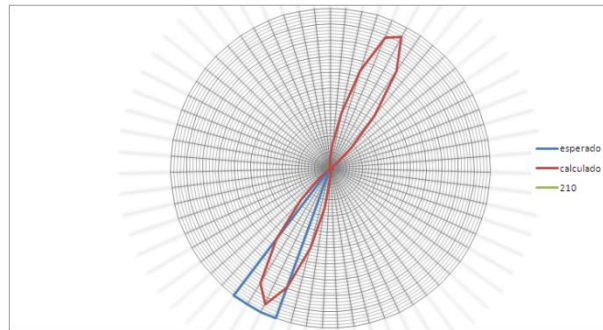


**Figura 78. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a treinta grados.**

Fuente: Autor

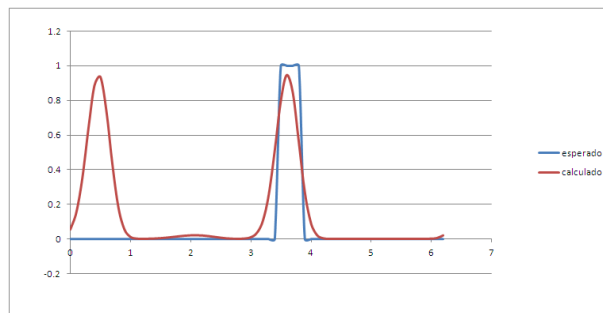


### Control con algoritmos evolutivos-mutación para un arreglo de antena lineal con alimentación triangular para un usuario final



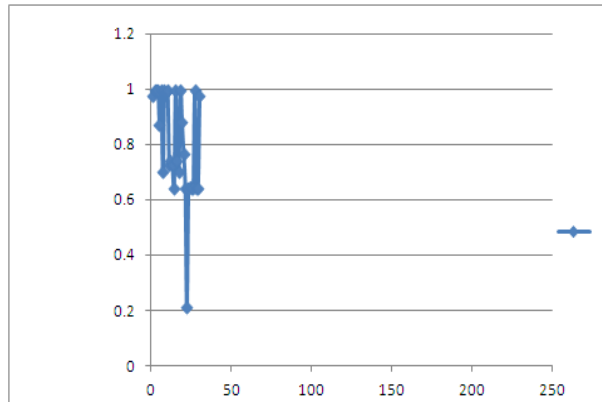
**Figura 79.** Figura polar del patrón de radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a doscientos diez grados.

Fuente: Autor



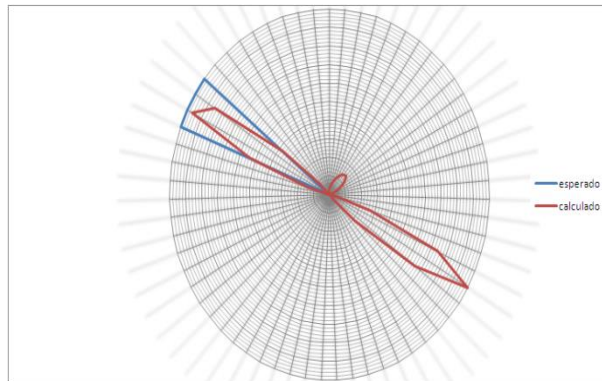
**Figura 80.** Figura cartesiana del patrón de radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a doscientos diez grados

Fuente: Autor



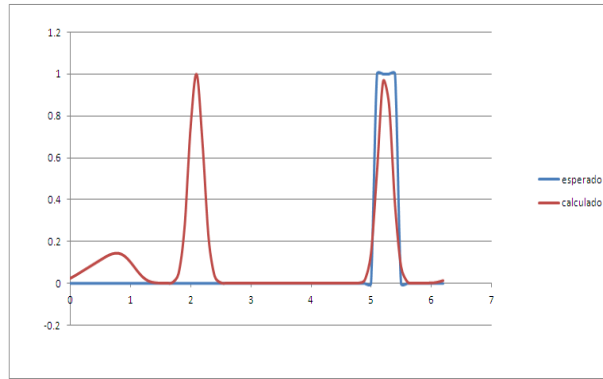
**Figura 81** Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a doscientos diez grados.

Fuente: Autor

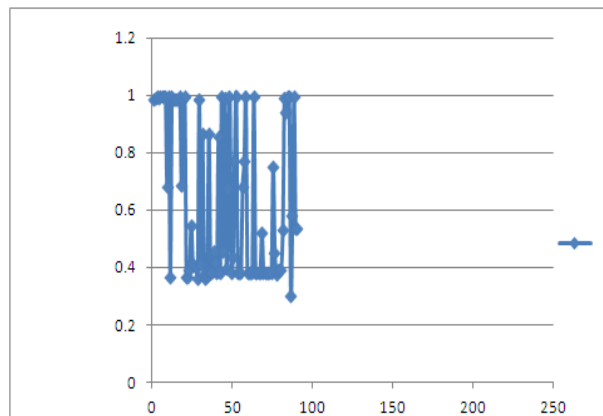


**Figura 82.** Figura polar del patrón de radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a trescientos treinta grados.

Fuente: Autor



**Figura 83. Figura cartesiana del patrón de radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a trescientos treinta grados.**  
Fuente: Autor



**Figura 84. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor

A continuación se muestra la tabla 32 donde están los datos asociados a los resultados de aplicar la técnica de control con algoritmos evolutivos-mutación para los diferentes tipos de arreglo lineal uniforme, triangular y binomial.

**Tabla 32:**

**Resultados de la simulación con control con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario final**

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
0	0.23507	20	0.27446	20	0.2631641	30
	0.29198	110	0.04818	20	0.3370264	50
	0.03547	100	0.26712	30	0.2693467	30
	0.25321	20	0.11284	20	0.2428614	70
	0.10797	170	0.09319	30	0.2610563	60
	0.19969	110	0.01509	40	0.0874303	40
	0.19209	20	0.02434	20	0.2873519	130
	0.1342	60	0.20756	60	0.2953537	60
	0.06571	60	0.02944	20	0.258945	20
	0.0293	100	0.21943	40	0.1466243	80
30	0.2388	110	0.03957	30	0.2224473	100
	0.20786	30	0.06802	20	0.1935318	130
	0.18389	20	0.06611	40	0.2290417	70
	0.21562	50	0.06795	30	0.2264613	60
	0.12739	70	0.04674	40	0.2889509	40
	0.13138	20	0.08885	20	0.282656	130
	0.3246	200	0.15638	20	0.2193644	100
	0.28383	40	0.19119	30	0.3325087	200
	0.36874	200	0.06108	40	0.2371719	110
	0.22913	50	0.07028	20	0.2957366	60
60	0.27306	180	0.19817	60	0.3701073	200
	0.23859	30	0.09314	20	0.2866481	170
	0.2388	80	0.15311	20	0.6172705	200
	0.20053	200	0.11931	30	0.2687157	80
	0.23664	50	0.22241	30	0.3137554	50
	0.14302	120	0.24321	50	0.2415513	180
	0.45764	200	0.23307	20	0.2077838	60
	0.20601	100	0.19028	20	0.2448025	100
	0.13994	20	0.04598	20	0.2523794	120
	0.17378	70	0.12634	40	0.2870339	180
90	0.28573	100	0.2602	20	0.6161896	200
	0.29626	90	0.24812	30	0.2949373	140
	0.29843	50	0.03577	20	0.4565582	200
	0.25223	50	0.12127	70	0.2845462	80
	0.18186	30	0.0736	30	0.2939747	50
	0.14826	110	0.08912	20	0.3071272	80
	0.13994	50	0.24477	20	0.3385246	200
	0.27985	160	0.15664	20	0.6026207	200
	0.19033	70	0.16029	20	0.3066861	160
	0.44882	200	0.13578	30	0.3049186	150

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
120	0.20699	50	0.20644	80	0.1832125	200
	0.08123	70	0.25594	60	0.3061779	50
	0.28685	100	0.24056	30	0.4581649	200
	0.11839	50	0.08746	40	0.2994791	50
	0.2157	120	0.26509	30	0.247926	150
	0.23211	110	0.08577	40	0.3335324	200
	0.17463	180	0.23745	80	0.1761013	70
	0.08346	20	0.04723	30	0.2585971	140
	0.17268	20	0.24565	40	0.2367414	30
	0.08513	110	0.20107	20	0.4210129	200
150	0.22495	30	0.04454	40	0.3361516	200
	0.2435	150	0.06799	50	0.3210281	70
	0.08726	40	0.2343	70	0.3086003	40
	0.57311	200	0.06791	30	0.2224485	80
	0.25205	20	0.06993	50	0.551317	200
	0.22274	80	0.21283	90	0.1895242	140
	0.29331	160	0.29693	50	0.1818816	20
	0.19002	30	0.0719	60	0.2729554	20
	0.11813	40	0.27764	40	0.2189325	110
	0.31539	200	0.21373	70	0.2588876	50
180	0.19235	50	0.20099	40	0.2795963	50
	0.15704	40	0.18561	40	0.2786692	80
	0.28343	50	0.15063	50	0.2919289	140
	0.22751	130	0.08273	30	0.2950594	80
	0.21716	30	0.23855	40	0.2929977	60
	0.20375	70	0.27168	20	0.5756978	200
	0.13855	50	0.24736	30	0.3816592	200
	0.18763	150	0.22122	50	0.3049441	50
	0.1667	110	0.16198	60	0.2968071	50
	0.25409	120	0.27465	40	0.2932532	140
210	0.16999	110	0.16791	50	0.3150263	40
	0.27798	90	0.08078	20	0.3020571	130
	0.2268	50	0.21542	20	0.3814354	200
	0.18171	110	0.28707	30	0.2672715	30
	0.22464	70	0.18108	20	0.3864845	200
	0.24409	40	0.13087	50	0.2934678	40
	0.27566	40	0.16439	30	0.4453269	200
	0.27079	130	0.13095	20	0.3640636	200
	0.29885	90	0.21018	30	0.3407896	200
	0.22275	130	0.12361	20	0.7635662	200

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
240	0.14538	30	0.10888	20	0.240061	70
	0.23432	30	0.07827	30	0.187209	90
	0.22229	40	0.15857	30	0.1875153	30
	0.083	60	0.03964	20	0.3172152	130
	0.08316	40	0.05623	20	0.3174627	90
	0.21227	90	0.07334	30	0.6736824	200
	0.09652	50	0.25593	30	0.1837258	100
	0.12052	160	0.09203	40	0.1877823	90
	0.07692	50	0.06254	30	0.2650017	120
	0.26009	60	0.26145	20	0.2356689	50
270	0.0727	30	0.0312	20	0.1923009	60
	0.21415	100	0.27974	20	0.283013	120
	0.23549	50	0.02409	20	0.1975542	80
	0.29666	80	0.19126	30	0.1820169	120
	0.42307	200	0.20378	30	0.2030608	60
	0.10061	30	0.08527	20	0.1697324	40
	0.26008	110	0.16733	20	0.2189714	160
	0.27786	120	0.09408	30	0.4943272	200
	0.23202	30	0.22776	20	0.2612406	200
	0.09411	30	0.09937	40	0.2781554	70
300	0.26812	50	0.18866	40	0.346983	200
	0.46267	200	0.09146	70	0.2833631	90
	0.28459	90	0.05298	30	0.2652145	70
	0.21157	30	0.11972	40	0.3015921	50
	0.1474	180	0.13345	60	0.2938409	80
	0.22009	40	0.1581	50	0.2911213	40
	0.35653	200	0.12468	50	0.2899307	30
	0.29337	40	0.08767	40	0.3753786	200
	0.14581	40	0.12419	30	0.5037364	200
	0.20164	200	0.09422	30	0.3206906	200
330	0.1557	30	0.29402	30	0.5534617	200
	0.57016	200	0.1368	50	0.335857	200
	0.22068	70	0.12734	80	0.3344066	200
	0.19705	40	0.11688	50	0.3964594	200
	0.31339	200	0.28342	40	0.4866775	200
	0.35104	200	0.16198	60	0.4352254	200
	0.13805	30	0.10573	40	0.3581038	200
	0.14945	40	0.28739	60	0.5376658	200
	0.21284	170	0.15104	60	0.2943358	30
	0.17569	50	0.18643	50	0.2790172	20

A continuación se realizó el análisis estadística descriptiva. Los resultados obtenidos se pueden observar en las tablas 33 y 34.

**Tabla 33:**

**Estadística descriptiva para control con algoritmos evolutivos-mutación para la variable Número de iteraciones para un usuario final**

N° DE ITERACIONES			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	87.0833333	36.25	116.416667
Error típico	5.32474251	1.497254724	5.96182514
Mediana	70	30	100
Moda	50	20	200
Desviación estándar	58.3296317	16.40160373	65.3085223
Varianza de la muestra	3402.34594	269.012605	4265.20308
Curtosis	-0.65818159	0.646131265	-1.5566052
Coefficiente de asimetría	0.77641951	1.064232041	0.15022891
Rango	180	70	180
Mínimo	20	20	20
Máximo	200	90	200
Suma	10450	4350	13970
Cuenta	120	120	120

**Tabla 34:**

**Estadística descriptiva para control con algoritmos evolutivos-mutacio para la variable error para un usuario final**

Error			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	0.21751522	0.150610792	0.31137245
Error típico	0.00872538	0.007203174	0.01032257
Mediana	0.21565624	0.143714488	0.29246327
Moda	N/A	N/A	N/A
Desviación estándar	0.09558178	0.07890682	0.11307813
Varianza de la muestra	0.00913588	0.006226286	0.01278666
Curtosis	2.45491269	-1.197227492	2.90446478
Coefficiente de asimetría	1.01367208	0.17416293	1.53057358
Rango	0.54381437	0.28183475	0.67613591
Mínimo	0.02930032	0.015091212	0.08743028
Máximo	0.57311469	0.296925962	0.7635662
Suma	26.1018263	18.07329507	37.3646944
Cuenta	120	120	120

En las tablas 35 y 36 se describe el análisis por cuadrante para la técnica con algoritmos evolutivos mutación para un usuario final.

**Tabla 35:**

**Análisis de iteraciones por cuadrante con control con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario final**

ANALISIS DE ITERACIONES POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	88.00	29.50	108.21
2	87.25	42.00	118.25
3	76.25	30.25	114.25
4	96.00	40.33	130.67

**Tabla 36:**

**Análisis de error por cuadrante con control con algoritmos evolutivos-mutación para un usuario final**

ANALISIS DE ERROR POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	0.22	0.13	0.30
2	0.22	0.17	0.32
3	0.20	0.16	0.31
4	0.24	0.15	0.33

### **6.1.3 Análisis de resultados para un usuario final con algoritmos evolutivos-mutación**

De las tablas 33, 34, 35 y 36 podemos observar como el sistema con mejor desempeño es el arreglo triangular tanto por número promedio de iteraciones, número promedio de error, como la menor desviación típica de ambas variables. El arreglo uniforme tiene un mejor desempeño comparado con el binomial.

De las figuras 76 a la 84 del patrón de radiación y de número de iteraciones versus error, se observa como todos los arreglos presentan oscilaciones alrededor del error, lo cual indica que el controlador con algoritmos evolutivos-mutación le genera oscilaciones al arreglo lineal de antenas



Cuando se hace un análisis de los cuadrantes en forma independiente se observa los siguientes elementos fundamentales:

- El error promedio en todos los cuadrantes son muy similares lo cual es un indicativo del desempeño de esta variable es parejo en todo el rango de 0 a 360 grados.
- Para el número de iteraciones se presentan desempeños diferente por cuadrante, o sea de acuerdo al cuadrante el número de estas varía. los cuadrantes uno y tres presentan el menor promedio de iteraciones en todos los arreglos (uniforme, binomial y triangular)
- El arreglo triangular es de mejor desempeño por cuadrante y en el rango total de cero (0) a trescientos sesenta grados (360).
- La técnica con algoritmo evolutivos-mutación, aplicada en un arreglo lineal uniforme tiene la ventaja de ser mucho más fácil su implementación, al no requerir cambiar la alimentación de cada elemento del arreglo, tal como se requiere en un arreglo lineal binomial o triangular, aunque no se recomienda por su bajo desempeño.

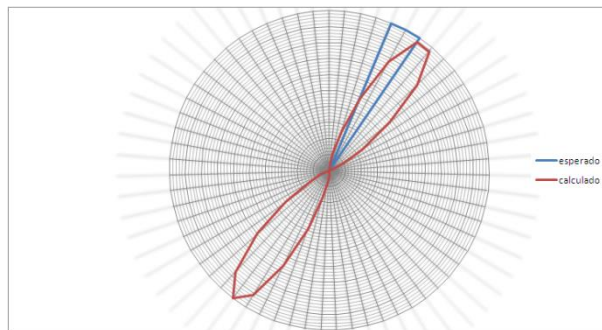
Teniendo en cuenta las conclusiones anteriores, el control de un arreglo lineal, usando un controlador con algoritmo evolutivos-mutación, es más adecuado para un arreglo triangular, de acuerdo a su desempeño.

#### **6.1.4 Resultados con arreglo lineal para un usuario con algoritmos evolutivos cruce**

En las figuras presentadas en este capítulo muestran el resultado en coordenadas polares y cartesianas respectivamente al aplicar el algoritmo evolutivo-cruce, para un usuario final ubicado a 30, 210 y 330 grados con los diferentes tipos de arreglo lineal de antenas. En color azul aparece el patrón deseado y en rojo el patrón encontrado.

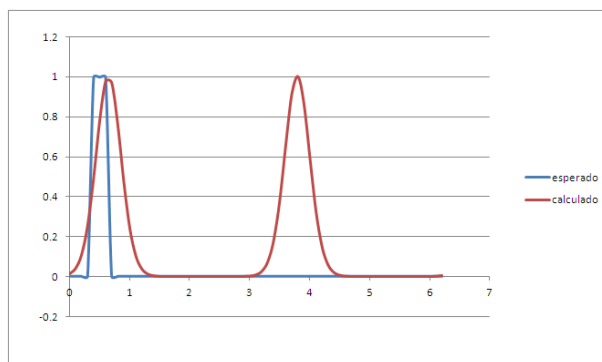
También se presenta una figura donde se muestra el comportamiento del número de iteraciones versus el error entre el patrón de radiación deseado y el patrón calculado por el control con el algoritmo evolutivo-cruce, para un usuario final ubicando una radio base localizada a 30,210 y 330 grados de él, con los diferentes tipos de arreglo lineal de antenas.

**Control con algoritmos evolutivos-cruce para un arreglo de antena lineal con alimentación uniforme para un usuario final**



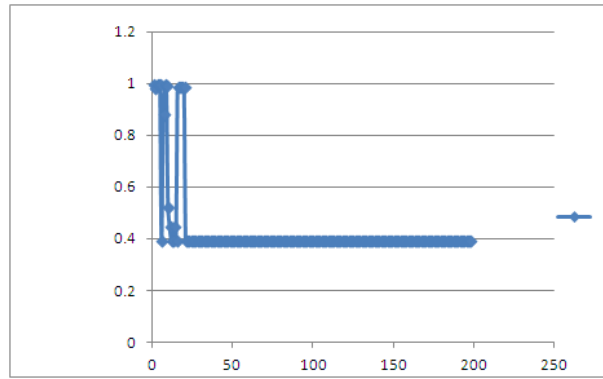
**Figura 85. Figura polar del patrón de radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a treinta grados.**

Fuente: Autor



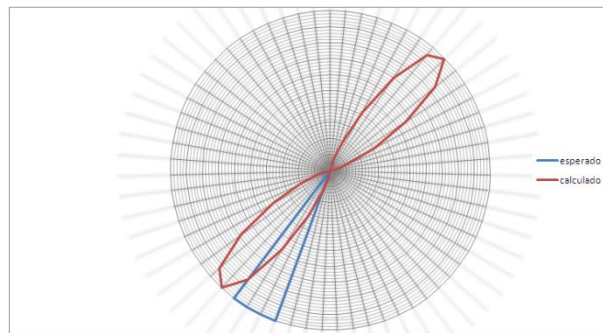
**Figura 86. Figura cartesiana del patrón de radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a treinta grados.**

Fuente: Autor



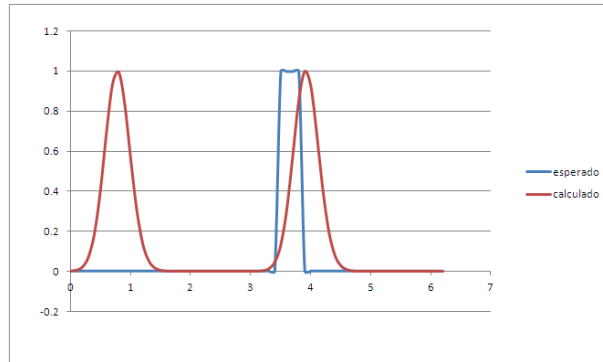
**Figura 87.** Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal uniforme con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a treinta grados.  
Fuente: Autor

**Control con algoritmos evolutivos-cruce para un arreglo de antena lineal con alimentación triangular para un usuario final**



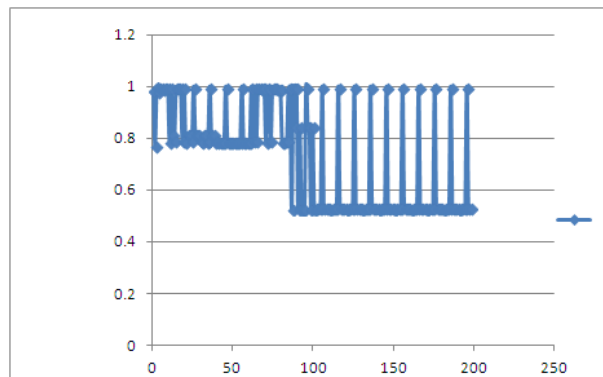
**Figura 88.** Figura polar del patrón de radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a doscientos diez grados.

Fuente: Autor



**Figura 89. Figura cartesiana del patrón de radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a doscientos diez grados.**

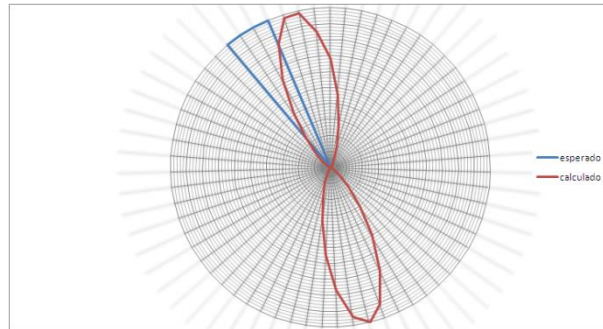
Fuente: Autor



**Figura 90. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal triangular con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a doscientos diez grados.**

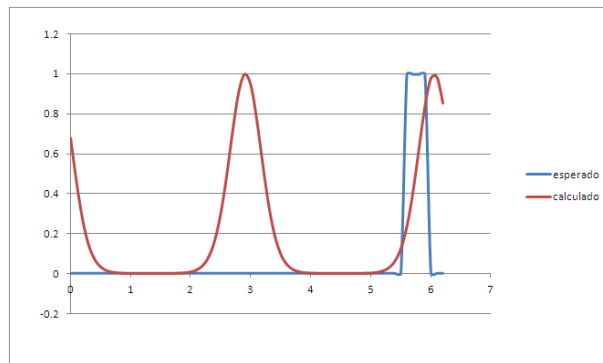
Fuente: Autor

**Control con algoritmos evolutivos-cruce para un arreglo de antena lineal con alimentación binomial para un usuario final.**



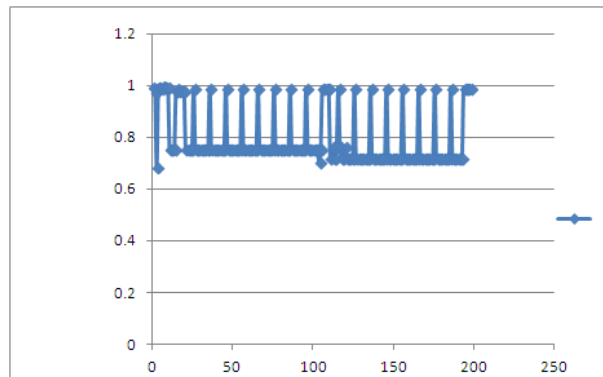
**Figura 91. Figura polar del patrón de radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a trescientos treinta grados .**

Fuente: Autor



**Figura 92. Figura cartesiana del patrón de radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor



**Figura 93. Figura iteración versus error para alcanzar el patrón radiación lineal binomial con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario a trescientos treinta grados.**

Fuente: Autor

A continuación se muestra la tabla 37 donde están los datos asociados a los resultados de aplicar la técnica de control con algoritmos evolutivos-cruce para los diferentes tipos de arreglo lineal uniforme, triangular y binomial.

**Tabla 37 Resultados de la simulación con control con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario final**

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
0	0.6853	200	0.29461	90	0.688894	200
	0.7781	200	0.42276	200	0.4009735	200
	0.35414	200	0.43628	200	0.5597266	200
	0.52729	200	0.64064	200	0.8937581	200
	0.18909	150	0.48416	200	0.8178479	200
	0.57532	200	0.41834	200	0.6727696	200
	0.60653	200	0.19129	110	0.1785405	170
	0.37074	20	0.68308	200	0.4713266	200
	0.48328	200	0.56624	200	0.2075868	50
	0.04882	150	0.56941	200	0.7007703	200
30	0.52097	200	0.80537	200	0.6238698	200
	0.82919	200	0.8845	200	0.5574414	200
	0.47584	200	0.36074	70	0.1831159	30
	0.00714	190	0.22398	200	0.2500408	50
	0.2354	40	0.47498	200	0.6894243	200
	0.34795	80	0.17228	100	0.6590949	200
	0.92483	150	0.6276	200	0.2973718	110
	0.67653	200	0.90706	200	0.6058971	200
	0.48078	200	0.05183	30	0.3486516	190
	0.50079	200	0.24852	30	0.8140897	200
60	0.70726	200	0.8213	200	0.1770389	90
	0.14785	200	0.18975	50	0.6161466	200
	0.03723	160	0.56451	200	0.7486328	200
	0.18458	150	0.82223	200	0.6895576	200
	0.54082	200	0.45052	200	0.9171111	200
	0.18229	200	0.80946	200	0.9088104	200
	0.65708	200	0.37592	200	0.9322462	200
	0.2715	150	0.05483	50	0.3415729	160
	0.26228	170	0.23205	90	0.5837117	200
	0.63235	200	0.76908	200	0.844291	200
90	0.05895	150	0.65906	200	0.7221387	200
	0.37441	190	0.21067	90	0.1139724	50
	0.71387	200	0.6618	200	0.8232949	200
	0.77942	200	0.14528	50	0.507723	200
	0.1823	150	0.12567	20	0.4743251	200
	0.31696	200	0.25423	100	0.8132596	200
	0.3632	200	0.91747	200	0.908955	200
	0.91335	200	0.76368	200	0.6730173	200
	0.12883	150	0.22467	170	0.7753378	200
	0.15046	70	0.76296	200	0.5053621	200

GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
120	0.36333	150	0.16242	40	0.2495001	150
	0.78116	200	0.36554	200	0.2567425	120
	0.22854	150	0.48878	200	0.1830574	150
	0.24895	160	0.50322	200	0.1045978	90
	0.17241	90	0.78366	200	0.2795828	130
	0.15385	90	0.50504	200	0.6899218	200
	0.8156	200	0.31035	30	0.850275	200
	0.23992	50	0.0773	50	0.5915206	200
	0.57927	200	0.48996	200	0.2491453	20
	0.58986	200	0.58438	200	0.9293735	200
150	0.50328	200	0.572	200	0.4087121	200
	0.40218	200	0.05818	90	0.4852354	200
	0.84397	200	0.35774	190	0.348503	90
	0.70734	200	0.46636	200	0.8537753	200
	0.61304	200	0.38081	200	0.1196809	90
	0.18487	150	0.53255	200	0.7652369	200
	0.81541	200	0.13284	120	0.2676256	120
	0.19912	20	0.09052	190	0.2754922	150
	0.66664	200	0.10368	150	0.9381303	200
	0.86087	200	0.45883	200	0.866174	200
180	0.32475	120	0.48333	200	0.6943242	200
	0.1914	200	0.39421	200	0.6357314	200
	0.4984	200	0.3449	50	0.5376527	200
	0.27093	20	0.67628	200	0.4792079	200
	0.78463	200	0.28092	130	0.1897052	30
	0.43908	200	0.52091	200	0.4897691	200
	0.47196	200	0.94891	200	0.7275142	200
	0.9053	200	0.20678	190	0.2906607	170
	0.09498	80	0.58047	200	0.3124448	150
	0.84331	200	0.8215	200	0.3989054	200
210	0.4933	200	0.73132	200	0.3616646	200
	0.15635	100	0.85164	200	0.6353713	200
	0.61665	200	0.75552	200	0.4916531	200
	0.72955	200	0.67227	200	0.9189302	200
	0.50216	200	0.92087	200	0.1350448	100
	0.76879	200	0.2487	190	0.6301231	200
	0.29013	30	0.70078	200	0.8492159	200
	0.50227	200	0.84358	200	0.7187708	200
	0.39321	200	0.51973	200	0.2693638	190
	0.60644	200	0.32394	110	0.1061426	100



GRADOS	UNIFORME		TRIANGULAR		BINOMIAL	
	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES	ERROR	ITERACIONES
240	0.38761	200	0.26146	130	0.8519049	200
	0.16831	150	0.7433	200	0.3531536	200
	0.58913	200	0.42102	200	0.3120573	60
	0.82739	200	0.84432	200	0.1270893	70
	0.55777	200	0.25319	20	0.2788597	140
	0.53029	200	0.94372	200	0.2290579	160
	0.18369	30	0.14254	50	0.5613997	200
	0.75976	200	0.7325	200	0.9311524	200
	0.59332	200	0.59838	200	0.8261191	200
0.50154	200	0.52361	200	0.3374787	60	
270	0.50411	200	0.58978	200	0.6470766	200
	0.57781	200	0.1455	90	0.6286759	200
	0.43854	200	0.60908	200	0.6140342	200
	0.15517	120	0.46223	200	0.1389143	30
	0.38953	200	0.15779	30	0.9307735	200
	0.52152	200	0.54516	200	0.3232308	180
	0.81282	200	0.90968	200	0.2279217	80
	0.34792	20	0.66676	200	0.2870505	110
	0.21441	30	0.66621	200	0.2360195	90
0.42742	200	0.21823	150	0.5726699	200	
300	0.44926	200	0.62548	200	0.4319842	200
	0.21116	30	0.89615	200	0.6847502	200
	0.93097	200	0.55896	200	0.21248	150
	0.5322	200	0.62603	200	0.5546287	200
	0.78286	200	0.80702	200	0.9253655	200
	0.068	50	0.26913	190	0.4372262	200
	0.32915	100	0.83565	200	0.7049246	200
	0.36487	200	0.57811	200	0.5598403	200
	0.94035	200	0.28912	60	0.1042197	50
0.80771	200	0.24397	70	0.2017003	150	
330	0.61523	200	0.42344	200	0.2104222	90
	0.53095	200	0.59056	200	0.7487123	200
	0.33169	60	0.76463	200	0.2523807	90
	0.13159	120	0.33961	100	0.3242931	100
	0.33157	90	0.842	200	0.658004	200
	0.71235	200	0.94376	200	0.296574	150
	0.55303	200	0.27265	120	0.3444399	160
	0.40754	200	0.81895	200	0.7030328	200
	0.32189	70	0.29487	70	0.7284481	200
0.17702	200	0.41593	200	0.9125179	200	

A continuación se realizó el análisis estadística descriptiva. Los resultados obtenidos se pueden observar en las tablas 38 y 39.

**Tabla 38:**

**Estadística descriptiva para control con algoritmos evolutivos-cruce para la variable Número de iteraciones para un usuario final**

N° DE ITERACIONES			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	166.666667	165.5	167.25
Error típico	5.120855	5.320077188	4.79110184
Mediana	200	200	200
Moda	200	200	200
Desviación estándar	56.0961559	58.27852567	52.4838911
Varianza de la muestra	3146.77871	3396.386555	2754.55882
Curtosis	0.98174646	0.216639179	0.57684725
Coefficiente de asimetría	-1.53538102	-1.353206215	-1.3922139
Rango	180	180	180
Mínimo	20	20	20
Máximo	200	200	200
Suma	20000	19860	20070
Cuenta	120	120	120

**Tabla 39:**

**Estadística descriptiva para control con algoritmos evolutivos-cruce para la variable error para un usuario final**

Error			
	<i>UNIFORME</i>	<i>TRIANGULAR</i>	<i>BINOMIAL</i>
Media	0.46744656	0.503333357	0.52243966
Error típico	0.0221408	0.022950679	0.02325156
Mediana	0.48203065	0.50413105	0.55603505
Moda	N/A	N/A	N/A
Desviación estándar	0.24254028	0.251412087	0.25470802
Varianza de la muestra	0.05882579	0.063208037	0.06487618
Curtosis	-0.97381002	-1.101940199	-1.2781278
Coefficiente de asimetría	0.11322432	0.012389176	0.01811879
Rango	0.9332087	0.8970788	0.8339106
Mínimo	0.0071399	0.0518307	0.1042197
Máximo	0.9403486	0.9489095	0.9381303
Suma	56.0935875	60.4000028	62.6927588
Cuenta	120	120	120

En las tablas 40 y 41 se encuentra el análisis por cuadrante, del control con algoritmos evolutivos-cruce para un arreglo lineal para un usuario.

**Tabla 40:**

**Análisis de iteraciones por cuadrante con control con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario final**

ANÁLISIS DE ITERACIONES POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	173.00	156.25	176.92
2	164.75	161.50	167.75
3	167.50	173.50	163.00
4	156.33	169.33	161.00

**Tabla 41:**

**Análisis de error por cuadrante con control con algoritmos evolutivos-cruce para un usuario final**

ANÁLISIS DE ERROR POR CUADARANTES			
CUADRANTE	UNIFORME	TRIANGULAR	BINOMIAL
1	0.43	0.48	0.59
2	0.47	0.44	0.52
3	0.48	0.56	0.48
4	0.46	0.55	0.49

### 6.1.5 Análisis de resultados para un usuario con algoritmos evolutivos-cruce

De las tablas 38, 39, 40 y 41 podemos observar como el sistema ligeramente con mejor desempeño es el arreglo triangular tanto por número promedio de iteraciones, como número promedio de error. El arreglo uniforme tiene un ligero mejor desempeño comparado con el binomial.

De las figuras 85 a la 93 del patrón de radiación y de número de iteraciones versus error, se observa como todos los arreglos presentan oscilaciones alrededor del error, lo cual

indica que el controlador con algoritmos evolutivos-cruce le genera oscilaciones al arreglo lineal de antenas.

Cuando se hace un análisis de los cuadrantes en forma independiente se observa los siguientes elementos fundamentales:

- El error promedio en todos los cuadrantes son diferentes lo cual muestra como el desempeño de esta variable depende del cuadrante de operación del arreglo lineal.
- Para el número de iteraciones se presentan desempeños diferentes por cuadrante.
- La técnica de control del patrón de radiación con un controlador con algoritmo evolutivos-cruce, tiene un desempeño similar en todos los tipos de arreglo lineales.
- La técnica con algoritmo evolutivos-cruce, aplicada en un arreglo lineal uniforme tiene la ventaja de su facilidad de implementación, al no sé requerir cambiar la alimentación de cada elemento del arreglo, tal como se necesita en un arreglo lineal binomial o triangular y su desempeño es muy similar.

Teniendo en cuenta las conclusiones anteriores, el control de un arreglo uniforme, usando un controlador con algoritmo evolutivos-cruce, es más adecuado para un arreglo lineal uniforme, ya que el desempeño es similar a los otros dos tipos de arreglo, con la ventaja de su facilidad de implementación.

## Parte 4

Análisis de resultados y selección de algoritmos para el diseño conceptual del driver de control

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

## 7 Comparación de técnicas de control

Tomando en cuenta los resultados encontrados en los capítulos anteriores por cada una de las técnicas de control usado, se entró hacer una comparación para definir con cuál de ellas se hará el diseño conceptual del controlador para el arreglo tanto para el usuario final como para la radio base.

Para el análisis se tuvieron en cuenta las tres variables más importantes:

- **Media de iteraciones:** Esta nos permite definir la eficiencia de la técnica de control usada en términos de tiempo de respuesta. De alguna manera nos permite visualizar la “velocidad” de respuesta de las diferentes técnicas de control.
- **Media de error:** Nos permite definir qué tan parecido el patrón de radiación deseado con el hallado por la técnica de control.
- **Rango de iteraciones:** Nos determina el grado de dispersión del número de las iteraciones. Cuanto mayor sea, más disperso están el número de iteraciones y por ende da cuenta del desempeño de la técnica de control.

Teniendo como base las variables antes mencionadas se hacen un comparativo entre las diferentes técnicas de control.

En el cálculo para realizar la comparación entre las diferentes técnicas, se hace teniendo en cuenta de cada una de ellas, cual es el valor de la técnica en las diferentes variables comparada con el valor mínimo hallado en cada una de ellas. Esto se puede observar en la ecuación 68.

$$Desempeño = \frac{\text{valor de la variable en la tecnica}}{\text{valor minimo de la variable en todas las tecnica}} \quad (68)$$

## 7.1 Comparación de técnicas de control para el usuario final.

Para el usuario final analizamos las técnicas de control ADALINE, difusa y evolutiva (mutación elitista y cruce elitista) para un arreglo lineal uniforme, triangular y binomial.

En las tablas 42 y 43 se hace un análisis del mejor resultado de cada tipo de arreglo (uniforme, triangular y binomial) para cada técnica de control, para luego elegir la mejor y hacer un comparativo entre ellas.

**Tabla 42:**

**Cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control para el arreglo de antenas lineal para un usuario final**

ADALINE						
	VALORES			COMPRATIVO		
	Uniforme	Triangular	Binomial	Uniforme	Triangular	Binomial
Media Iteraciones	47,99166667	60,10833333	43	1,1160853	1,3978682	1
Media Error	0,276316115	0,302691937	0,282967041	1	1,0954552	1,02406999
Rango Iteraciones	105	181	117	1	1,7238095	1,11428571
DIFUSO						
	VALORES			COMPRATIVO		
	Uniforme	Triangular	Binomial	Uniforme	Triangular	Binomial
Media Iteraciones	8,841666667	9,641666667	10,34166667	1	1,0904807	1,16965127
Media Error	0,154057074	0,238355146	0,244174475	1	1,5471873	1,58496114
Rango Iteraciones	13	27	31	1	2,0769231	2,38461538
MUTACION ELITISTA						
	VALORES			COMPRATIVO		
	Uniforme	Triangular	Binomial	Uniforme	Triangular	Binomial
Media Iteraciones	87,08333333	36,25	116,4166667	2,4022989	1	3,21149425
Media Error	0,217515219	0,150610792	0,311372453	1,4442207	1	2,06739801
Rango Iteraciones	180	70	180	2,5714286	1	2,57142857
CRUCE ELITISTA						
	VALORES			COMPRATIVO		
	Uniforme	Triangular	Binomial	Uniforme	Triangular	Binomial
Media Iteraciones	166,6666667	165,5	167,25	1,0070493	1	1,01057402
Media Error	0,467446563	0,503333357	0,522439657	1	1,076772	1,11764573
Rango Iteraciones	180	180	180	1	1	1

Teniendo en cuenta la ecuación (86), podemos observar la tabla anterior, como el arreglo con mejor desempeño en las técnicas ADALINE y difusa es el arreglo lineal uniforme y el arreglo lineal triangular para las técnicas con algoritmos evolutivos para un usuario final. Estos se encuentran resaltados en color verde.

Los de un valor de uno (1) muestra el de mejor desempeño en ese punto de la variable analizada (los resaltados en color naranja). La variable en las otras técnicas presenta un valor por encima de uno (1) y cuanto más se aleje de este tiene peor desempeño.

En la técnica ADALINE se escoge el arreglo lineal uniforme al presentar dos de las variables (media de error y rango de iteraciones) en un valor de uno (1) y la tercer variable de media de iteraciones es la segunda de mejor desempeño.

En la técnica difusa el arreglo lineal uniforme posee mejor desempeño en las tres variables por tanto es el tipo de arreglo elegido.

Para las técnicas con algoritmos evolutivos- mutación y evolutivos-cruce el arreglo triangular es el de mejor desempeño de acuerdo a los resultados de las tres variables.

Teniendo en cuenta los tipos de arreglos elegidos por técnica, se hizo un análisis entre ellos, para entrar a elegir cual técnica de control con qué tipo de arreglo será usado en el diseño conceptual del controlador para un usuario final. Esto lo podemos ver en la tabla 43.

**Tabla 43:**

**Cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control elegidas para el arreglo de antenas lineal para un usuario final**

	TECNICA DE CONTROL				COMPARATIVO			
	ADALINE UNIFORME	BORROSO UNIFORME	MUTACION- TRIANGULAR	CRUCE- TRIANGULAR	ADALINE UNIFORME	DIFUSO UNIFORME	MUTACION- TRIANGULAR	CRUCE- TRIANGULAR
Media Iteraciones	47,99166667	8,841666667	36,25	165,5	5,4278982	1	4,099905749	18,71819039
Media Error	0,276316115	0,154057074	0,150610792	0,5033334	1,8346369	1,02288204	1	3,341947473
Rango Iteraciones	105	13	70	180	8,0769231	1	5,384615385	13,84615385



De la tabla 43 se observa como el arreglo uniforme con control difuso es poseedor del mejor desempeño en dos variables, media de iteraciones y rango de iteraciones y la media de error es la segunda de mejor desempeño y cercana a uno. Esto se puede ver resaltado en color naranja para las variables y en verde la técnica difusa que es la seleccionada como de mejor desempeño en todas las variables.

Es importante destacar como en la variable de media de iteraciones en la técnica con algoritmos evolutivos-mutación esta en segundo lugar de mejor desempeño y es cuatro veces más “lenta” comparado con la técnica difusa y es dieciocho veces más “rápida” comparada con la técnica algoritmos evolutivos-cruce triangular, cuyo desempeño es el peor. Estos e puede ver resaltado en la tabla 43 resaltado en color rojo.

De la tabla 43 se puede observar cómo, la mejor técnica de control con el tipo de arreglo lineal de antenas es el arreglo lineal uniforme con técnica de control difuso para un usuario final.

## 7.2 Comparación de técnicas de control para una radio base o AP

Para la radio base o AP analizamos las técnicas de control ADALINE y difusa para un arreglo circular uniforme, triangular y binomial.

En las tablas 44 y 45 se hace un análisis de la mejor resultado de cada tipo de arreglo circular (uniforme, triangulara y binomial) para cada técnica de control, para luego elegir la mejor y hacer un comparativo entre ellas.

**Tabla 44:**

**Cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control para el arreglo de antenas circular para una radio base o AP**

ADALINE						
	VALORES			COMPRATIVO		
	Uniforme	Triangular	Binomial	Uniforme	Triangular	Binomial
Media Iteraciones	7,991666667	7,75	4,566666667	1,75	1,697080292	1
Media Error	0,405916621	0,411287935	0,402022684	1,00968586	1,023046587	1
Rango Iteraciones	24	35	21	1,14285714	1,666666667	1
DIFUSO						
	VALORES			COMPARATIVO		
	Uniforme	Triangular	Binomial	Uniforme	Triangular	Binomial
Media Iteraciones	2,983333333	2,533333333	2,558333333	1,17763158	1	1,018588125
Media Error	0,407874871	0,322817421	0,328817992	1,26348469	1,333333333	1,333333333
Rango Iteraciones	3	4	4	1	1,333333333	1,333333333

Los de un valor de uno (1) muestra el de mejor desempeño en ese punto de la variable analizada (los resaltados en color naranja). La variable en las otras técnicas presenta un valor por encima de uno (1) y cuanto más se aleje de este tiene peor desempeño.

Como podemos observar de la tabla anterior, el arreglo con mejor desempeño de la técnica ADALINE es el arreglo circular binomial y el arreglo circular uniforme para la técnica de control difuso.

Teniendo en cuenta los las tipos de arreglos elegidos por técnica se hace un análisis entre ellas. Esto lo podemos ver en la tabla 45.

**Tabla 45 :**

**Cuadro comparativo de las diferentes técnicas de control elegidas para el arreglo de antenas circular para una radio base o AP**

	TECNICA DE CONTROL		COMPARATIVO	
	ADALINE BINOMIAL	DIFUSO UNIFORME	ADALINE BINOMIAL	DIFUSO UNIFORME
Media Iteraciones	4,566666667	2,983333333	1,530726257	1
Media Error	0,402022684	0,407874871	1	1,01455686
Rango Iteraciones	21	3	7	1

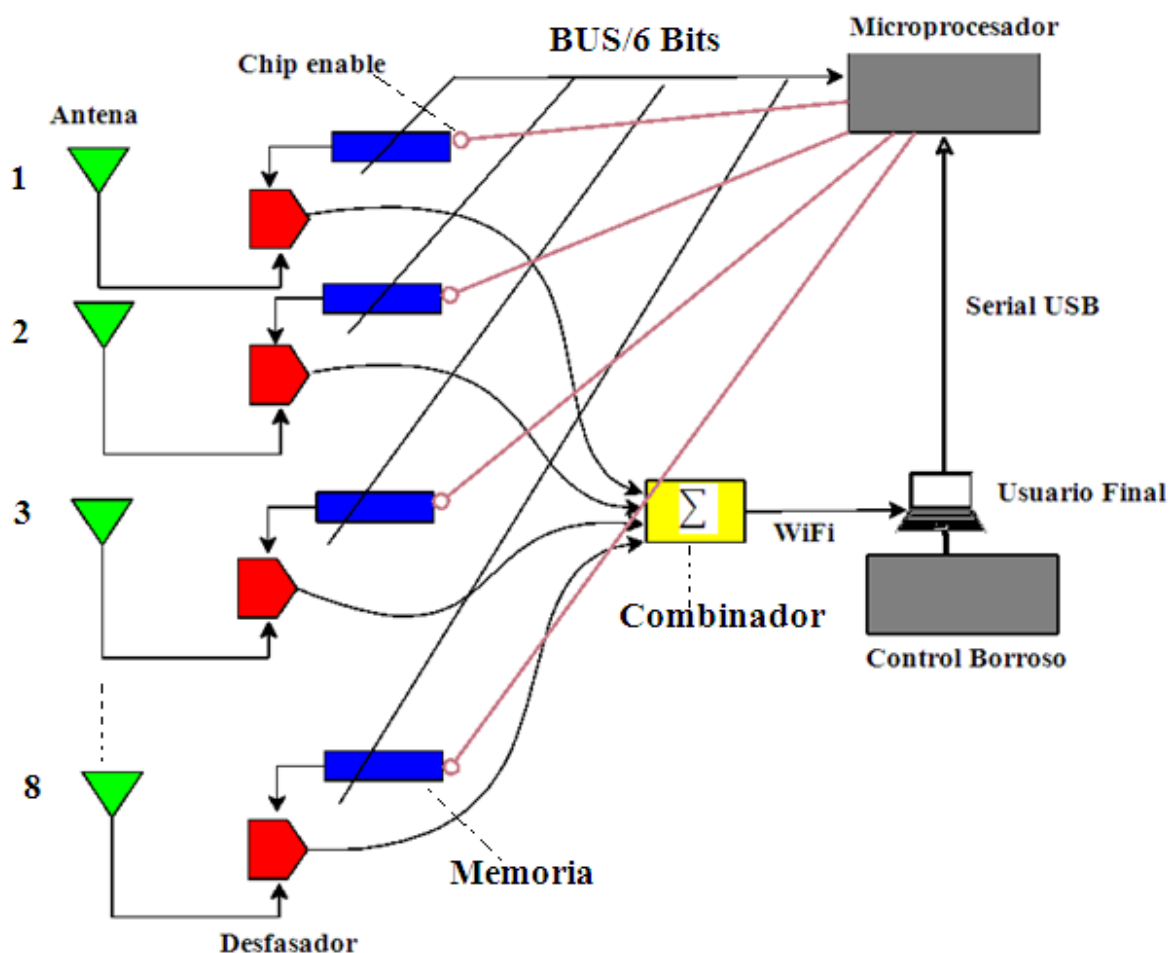
Si tomamos en cuenta los resultados en este apartado, queda claro que la técnica de control con mejor desempeño es la difusa, con un arreglo circular uniforme de cuatro elementos, para la radio base o AP. Dos de las tres variables a analizadas son de mejor desempeño (media de iteraciones y rango de iteraciones resaltados en color naranja) y la tercer variable de media de error es muy cercana a 1 y similar a la ADALINE binomial resaltada en color verde.

## 8 Diseño del controlador

### 8.1 Diseño del controlador para usuario final

Acorde con el apartado anterior el control difuso se definió para el diseño del controlador. A continuación entramos a concretar cuáles son los elementos requeridos para permitir el diseño físico del controlador para un usuario final y el funcionamiento del mismo.

Tomando la arquitectura física mostrada en la figura 94 podemos entrar a definir los elementos de hardware y software del driver de control.



**Figura 94. Arquitectura y diseño de un controlador para un usuario final con técnica difusa.**

Fuente: Autor

Como podemos observar los elementos constitutivos son los siguientes:

- Un conjunto de elementos radiantes tipo dipolo (8)
- Un desfasadores ref. MAPCG M0003 (ver anexo D)
- Un combinador de 8 puertos ref. SEPS-ED14112/1 (ver anexo E)
- Microprocesador PIC16(L)F1454/5/9 (ver anexo F)
- Controlador difuso (embebido en el usuario final)

El funcionamiento del circuito es de la siguiente forma:

Los elementos radiantes o antenas reciben la señal la cual se entrega a un desfazador por cada uno de ellos, los cuales son encargados de generar un desfase de acuerdo a la entrada binaria de seis (6) bits , suministrados por la memoria, la cual es alimentada por el microprocesador que controla la carga de los valores digitales en el registro usando el bus de seis (6) bits, y adicionalmente es encargado de recibir los datos del controlador difuso, alojado en forma embebida en el usuario final, por un puerto serial o USB.

El controlador difuso tiene la información de la dirección en la cual se encuentra la radio base, bajo esta define cuales los valores de fase de cada uno de los elementos radiantes requiere para alcanzar la radio base, tal como se explicó en los apartados anteriores del control difuso.

En caso de generarse movilidad en el usuario se requeriría esperar a un nuevo cálculo del controlador y este enviar dichos datos de nuevo hasta el proceso y modificar la fase de los elementos radiantes acorde a la nueva situación.

## **8.2 Diseño del controlador para una radio base o AP**

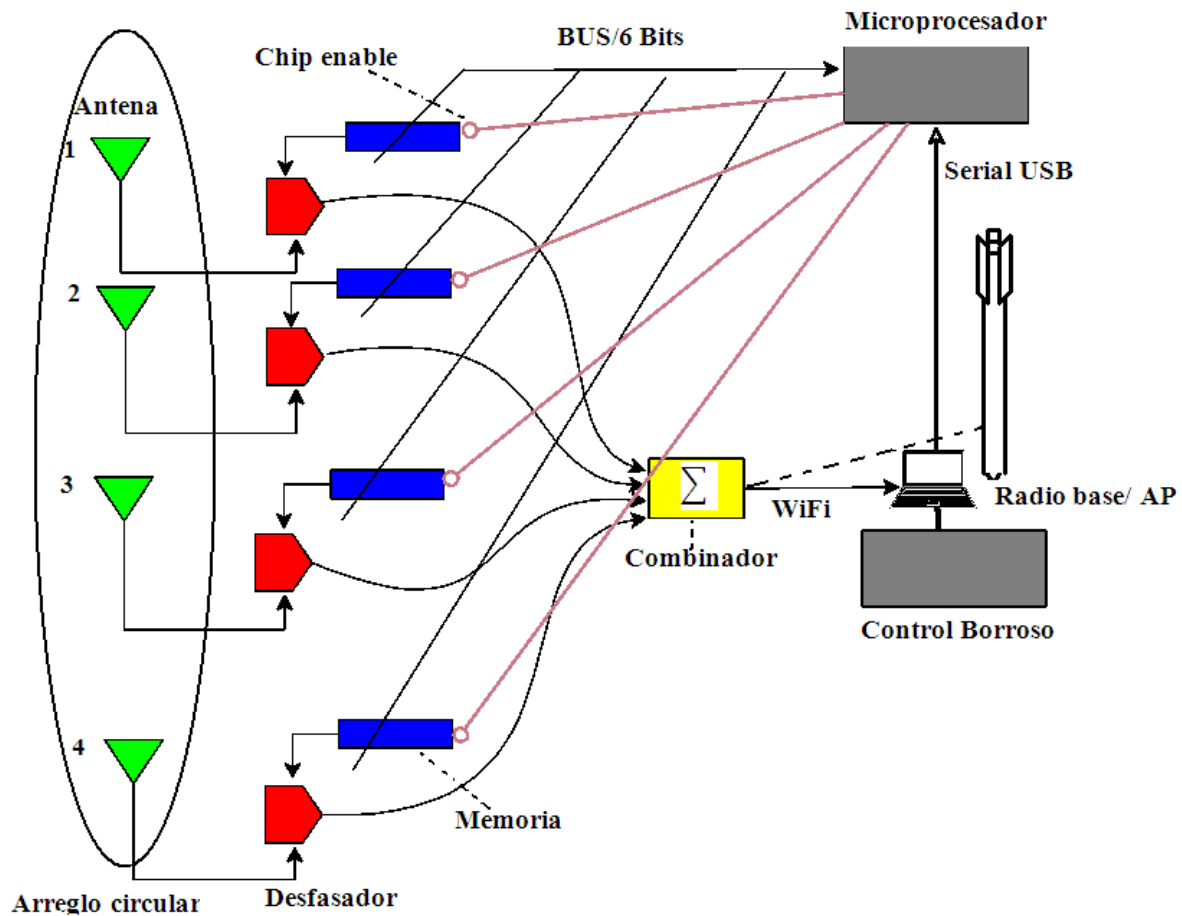
El esquema es el mismo al de un controlador para un usuario final, la diferencia radica en los siguientes aspectos:

- El arreglo no es lineal si no circular
- El número de elementos radiantes son 4 antenas dipolo
- El controlador difuso a diferencia del para un usuario conoce las coordenadas donde se ubican cuatro usuarios, y a partir del cual calcula los datos de fase requeridos para dicha base para alcanzar los usuarios finales.
- Los parámetros para el controlador difuso son acorde a las condiciones de la radio base (error, ruido número de elementos etc.).
- Y el computador debe de operar como AP o ser una radio base

La manera de operar el circuito es similar a la el usuario final. Adicionalmente en este caso cualquier cambio de uno de los usuarios, requiere hacer un nuevo cálculo del controlador

para enviar dichos datos de nuevo hasta el proceso y modificar la fase de los elementos radiantes acorde a la nueva situación.

En la figura 95 se muestra la arquitectura física y elementos de hardware y software del driver de control.



**Figura 95. Arquitectura y diseño de un controlador para para una radio base o AP con tecnica difusa.**

Fuente: Autor

Los elementos del controlador son los siguientes:

- Un conjunto de elementos radiantes tipo dipolo (4)
- Un desfasadores ref. MAPCG M0003 (ver anexo D)
- Un combinador de 4 puertos ref. JEPS-4-ED12484/1 (ver anexo G)
- Microprocesador PIC16(L)F1454/5/9 (ver anexo F)
- Controlador difuso (embebido en el usuario final)

# CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

## 9 Resultados y conclusiones del trabajo de investigación

Del trabajo observamos los siguientes aspectos relevantes:

- La técnica de control difuso presenta un desempeño muy superior a las otras técnicas de control para el caso de un arreglo lineal de antenas para un usuario.
- El uso de estas técnicas en un arreglo circular para una radio base o AP no posee buen desempeño. Esto es debido a la naturaleza del arreglo circular. Este tiene un comportamiento axial simétrico y en caso de que un usuario se encuentre fuera de este no es posible alcanzarlo con uno de los lóbulos de radiación.
- Como se pudo observar alcanzar con lóbulos de treinta grados para los cuatro usuarios simultáneamente es bastante difícil con un solo arreglo. Para lograr que todos los usuarios sean alcanzados con un patrón de radiación adecuado a partir de una radio base, se debe usar combinaciones de otras técnicas de multiplexación.
- Las técnicas de ADALINE y con algoritmos evolutivos presentan fuertes oscilaciones alrededor de del patrón de radiación deseado. Esto puede ser crítico cuándo se requiera implementar el controlador con tiempos de respuestas muy bajos del orden de segundos o menores para móviles que se quieran alcanzar con un patrón de radiación de diez grados y que se encuentren asociados a una radio base a una distancia igual o menor de un kilometro a una velocidad entre 60 km/h a 120 km/h.

## 10 Nuevas líneas de investigación

Durante el largo desarrollo de este trabajo de investigación surgen preguntas por fuera del alcance de este trabajo y generadas como producto de la observación, pruebas y resultados obtenidos. Dentro de las relevantes tenemos:

- Investigar una técnica de control identificando en forma automática la posición de los usuarios desde la radio base usando algoritmo DOA (directional of arrival) tal como plantean diferentes autores en antenas inteligentes o un esquema de con GPS coordinado entre usuarios y la radio base.
- Investigar sobre las mismas técnicas de control y a diferencia de este trabajo, usar software en lugar de hardware para elementos como el desfasadores y combinadores etc., técnicas digitales con DSP y comparar su desempeño con el diseño planteado.
- Usar técnicas diferentes de algoritmos evolutivos para ver su desempeño. Por ejemplo combinar mutación con cruce etc.
- Usar las técnicas de control inteligente en otros tipos de arreglos de antenas, como bidimensionales, en cruz etc.
- Usar técnicas de control inteligente combinando con técnicas de multiplexación como TDM para el diseño de los controladores para múltiples usuarios. TDM – SDM, SDM-TDM-SDM. Por ejemplo construir un proyecto para 16 usuarios simultáneos, usando un esquema SDMA de cuatro usuarios en cuatro diferentes frecuencias.
- Diseñar en forma física controlador para el arreglo de la radio base y usuario final planteado en este trabajo y hacer pruebas para verificar el desempeño del esquema propuesto.

# REFERENCIAS

---

Reza Abdolee, Member, IEEE, Department of Electrical & Computer Engineering, Concordia University Montréal, Québec, Canada Email: [reza.ab@ieee.org](mailto:reza.ab@ieee.org) Wei-Ping Zhu, Senior Member, IEEE Department of Electrical & Computer Engineering, Concordia University, Montréal, QC, Canada [weiping@concordia.ca](mailto:weiping@concordia.ca) Mohammad Sawan, Fellow IEEE Department of Electrical Engineering, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada [mohamad.sawan@polymtl.ca](mailto:mohamad.sawan@polymtl.ca). Digital Beam-forming Implementation for Downlink Smart Antenna System.

Bashir Alshami, Hassan Aboulmour. Department of Electronics and Communication Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Damascus, SYRIA Email:[shami.bashir@gmail.com](mailto:shami.bashir@gmail.com) Email:[anruniv@gmail.com](mailto:anruniv@gmail.com) Mohamad Dib Department of Telecommunications Higher Institute of Applied Sciences and Technology Damascus, SYRIA HIAST, Po. Box: 31983. Design of a Broadband ESPAR Antenna

Veneela Ammula\*, S. M. Rao†, Stuart M. Wentworth ,Auburn University Dept. of ECE, Auburn, Alabama, USA, Naval Research Laboratory, Washington, DC, USA. Dual Excited Planar Circular Array Antenna for Direction Agile Applications.

Marta Arias Campo\*, Ignacio Montesinos Ortego+, José Luis Fernández Jambrina+, Manuel Sierra Pérez, Currently working at IMST GmbH Carl-Friedrich-Gauss-Str. 2, D-47475 Kamp-Lintfort, Germany [marta.arias@imst.de](mailto:marta.arias@imst.de), Grupo de Radiación, Departamento de Senales y Sistemas de Comunicación, Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Complutense 30, 28040 Madrid, Spain nacho, jambrina, [m.sierra.perez}@gr.ssr.upm.e](mailto:m.sierra.perez}@gr.ssr.upm.e). T/R module design for GEODA antennas.

Arranz de la Peña, Jorge. Universidad Carlos III. Parra Truyol, Antonio. Universidad Carlos III. ALGORITMOS GENÉTICOS

Syed Azhar Hasan, Institute a/Space Technology (SUPARCO) Karachi, Pakistan [syed\\_azhar\\_hasan@yahoo.com](mailto:syed_azhar_hasan@yahoo.com). Highly Reliable & Adaptive SMART Phased Array Antenna with Gain Adjustment & Beam Forming Capabilities for Space Applications.

Fulvio Babich, Massimiliano Comisso, Marco D'orlando (member IEEE), Performance Evaluation of Distributed Wireless Networks Using Smart Antennas in Low Rank channel (Transactions Communications IEEE July 2007 volume 55)

M. Benedetti, G. Oliveri, P. Rocca, and A. Massa Department of Information Engineering and Computer Science University of Trento Via Sommarive 14, I-38050 Trento, Italy Progress In Electromagnetics Research, PIER 96, 173-191, 2009. A fully-adaptive smart antenna prototype: Ideal model and experimental validation in complex interference scenarios.



Marek E. Bialkowski 1, Feng-Chi E. Tsai 2, Yu-Chuan Su, 2 Kai-Hong Cheng 2. 1 School of ITEE, University of Queensland St Lucia, Brisbane, QLD 4072, Australia, meb@itee.uq.edu.au 2 Antenna Design Department, Wistron NeWeb Corporation No. 10-1, Li-Hsin Road 1, Hsinchu Science Park, Hsinchu 300, Taiwan R.O.C., eddie\_tsai, vincent\_su, [kh\\_cheng@wneweb.com.tw](mailto:kh_cheng@wneweb.com.tw). Design of Fully Integrated 4x4 and 8x8 Butler Matrices in Microstrip/Slot Technology for Ultra Wideband Smart Antennas

Oscar Calvo, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 1900.Int. J. Bifurcation and Chaos, to appear 1998. FUZZY CONTROL OF CHAOS CICpBA, L.E.I.C.I.

Angel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca, Juan Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert, Sebastian Blanch Boris. Antenas EDICIONS UPC 2000

Ricky chunn presentation: University of California, Los Angeles Cooperative MIMO Communications over Wireless Networks Advisor: Professor Ali Sayed.

Rodrigo Coelho Barros, M´arcio Porto Basgalupp, Andr´e C. P.L. F. de Carvalho, and Alex A. Freitas A Survey of Evolutionary Algorithms for Decision-Tree Induction

Sudipta Das and Durbadal Mandal Department of Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology, Durgapur, West Bengal, India sudipta.sit59@gmail.com, durbadal.bittu@gmail.com. Synthesis of Broadside Uniform Circular Antenna Array with low on-Surface Scanning

Bonifacio Martin del Brio y Alfredo Sanz Molina. Redes Neuronales y Sistemas Borrosos 3 edición.

Sener Dikmese<sup>1</sup>, Adnan Kavak<sup>1</sup>, Suhap Sahin<sup>1</sup>, Kerem Kucuk<sup>2</sup>, and Hasan Dincer<sup>3</sup> <sup>1</sup>Kocaeli University, Dept. of Computer Engineering, Izmit, 41040 Turkey <sup>2</sup>Kocaeli University, Dept. of Electronics and Computer Education, Izmit, 41380 Turkey <sup>3</sup>Kocaeli University, Dept. of Electronics and Communication Engineering, Izmit, 41040 Turkey { sener.dikmese, akavak,suhapsahin, kkucuk, hdincer} @kou.edu.tr. Evaluation of FPGA-based Software Radio Beamformers for 3G Wireless.

Ambedkar Dukkipati and M. Narasimha Murty Department of Computer Science and Automation Indian Institute of Science Bangalore-5600 12, India Email: {ambedkar, mnm}@csa.iisc.ernet.in Selection by Parts: ‘Selection in Two Episodes’ in Evolutionary Algorithms.

Autor: Perla Espinosa Díaz, Carlos Villarroel González. Proposición y simulación de un algoritmo adaptativo para sistemas de antenas inteligentes.

Trabajo de: miguel gabal lanau Director: juan carlos martín Licenciatura: física Departamento de física aplicada. Facultad de ciencias, universidad de Zaragoza. Agrupaciones de antenas: agrupaciones adaptativas y algoritmo genéticos

Alexis Paolo García A.\*,\*\* y Lorenzo Rubio A.\*algarar4@iteam.upv.es, lrubio@dcom.upv.es \* Dpto. de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia – iTEAM, Grupo de Comunicaciones Móviles - MCG, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España \*\* Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Análisis de Capacidad de un Sistema MIMO en Entornos Indoor

Philipp K. Gentner<sup>1</sup>, Wolfgang Gartner<sup>1</sup>, Geoff Hilton<sup>2</sup>, Mark E. Beach<sup>2</sup>, Christoph F. Mecklenbräuer<sup>1</sup>; Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, Vienna University of Technology Gusshausstrasse 25/389, 1040 Wien, Austria , Centre for Communications Research, University of Bristol, Merchant Venturers Building, Woodland Road, Bristol, United Kingdom , Christian Doppler Laboratory for Wireless technologies for sustainable mobility, philipp.gentner@nt.tuwien.ac.at. Towards a Hardware Implementation of Ultra-Wideband Beamforming.

Lal Chand Godara. Smart Antennas. CRC PRESS 2004

Fran B. Gross, Phd Smart Antennas for Wireless Communications with MATLAB McGraw-Hil 2005.

T.J. Harrold, D.C. Kemp† , M.A. Beach\*, C. Williams\*, M. Philippakis† and M.W. Shelley† \*Centre for Communications Research, University of Bristol Woodland Road, Bristol, BS8 1UB, United Kingdom Email: Tim.Harrold@bris.ac.uk†ERA Technology Limited Cleve Road, Leatherhead, Surrey, KT22 7SA, United Kingdom Evaluation of a Novel Low Complexity Smart Antenna for Wireless LAN Systems

Víctor Hermides Pino de los Reyes Master en Matemática Aplicada e Informática para la Administración. Profesor Auxiliar del Departamento de Informática de la Facultad de Ciencias Técnicas del Centro Universitario de Las Tunas. ALGORITMOS GENÉTICOS CON CODIFICACIÓN REAL EN LA OPTIMIZACIÓN DE FUNCIONES DE UNA VARIABLE REAL

Autor: Hu, Honglin; Zhang, Yan; Luo, Jijun. Distributed antenna systems : open architecture for future wireless communications (1. ed) (2007). Hottinen, Ari; Kuusela, Markku; Hugi, Klaus; Zhang, Jianzhong (Charlie); Raghoehtaman, Balaji En: IEEE Wireless Communications, Vol.13, no.4 (ago. 2006)/IEEE Wireless Communications, 8-16 Industrial embrace of smart antennas and MIMO

Yuguan Hou<sup>1</sup>, Jian Kang<sup>2</sup>, Yiyi Shen, Chengyu Hou School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology 92 West Dazhi Street , Nan Gang District, Harbin, China 1yuguanhou@yahoo.com.cn 2547626624@qq.com A Thinning Method of Conformal Non-concentric Circular Array Using Genetic Algorithm

Yikun Huang, Montana State University. WiMAX Dynamic Beamforming Antenna.

Florin HUTU, David CORDEAU and Jean-Marie PAILLOT, LAII, EA 1219, IUT Angoulême, 4 av. de Varsovie, 16021 Angoulême Cedex, France A 2.4 GHz active phase shifter architecture for smart antennas control

Jan Jantzen    jj@iau.dtu.dk:1 Design of Fuzzy Controllers

(Jin et. al, 2008) Liu Jin, Li li, Huazhi Wang, School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876, China liujin\_0926@yahoo.com.cn, lili@bupt.edu.cn, cgliang@bupt.edu.cn. Investigation of Different Types of Array Structures for Smart Antennas.

David Kabáth MASARYKOVA UNIVERZITAFAKULTA INFORMATIKY. Tutorial demo of neural networks and genetic algorithms MASTER THESIS Brno, spring 2010

John G. Kuschewski, Student Member, IEEE, Stefen Hui, and Stanislaw H. Zak, Member, IEEE. Application of Feed forward Neural Networks to - Dynamical System Identification and Control

Haitao Liu#1, Tian Hong Loh \*2, Steven Gao#3 # Surrey Space Centre, University of Surrey, UK. Compact Low-Cost Smart Antenna for Wireless Communications.

A. Mahanfar, C. Menon and R.G. Vaughan. Smart antennas using electro-active polymers for deformable parasitic elements.

Li-Xin, Wang Adaptive Fuzzy Systems and Control, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994

V. A. Manasson, L. S. Sadovnik, WaveBand Corporation, 375 Van Ness Ave, Suite 1105 Torrance, CA 9050. Monolithic Electronically Controlled Millimeter-Wave Beam-Steering Antenna.

Autor: Martin Javier Martinez Silva. Diseño de Arreglos de Antenas con Aplicación en Sistemas de Antenas Inteligentes.

Atindra Mitra<sup>1</sup>, Colin Hu<sup>1</sup>, Connor Johnson<sup>2,1</sup> Air Force Research Lab, Dayton, Ohio, 45433, USA  
<sup>2</sup>Louisiana Tech University, Ruston, Louisiana, 71272, USA Email: atindra.mitra@wpafb.af.mil. Closed-Loop Smart Antenna Systems With Controllable Metamaterial Lattice Interactions

Nurul H. Noordin, Virgilio Zuniga, Ahmed O. El-Rayis, Nakul Haridas, Ahmet T. Erdogan, Tughrul Arslan Advanced Smart Antenna Technologies Research Group, School of Engineering, The University of Edinburgh, EH9 3JL, UK N. Noordin, V. Zuniga, A. El-rayis, N. Haridas, Ahmet.Erdogan, [T.Arslan}@ed.ac.uk](mailto:T.Arslan@ed.ac.uk). Uniform Circular Arrays for Phased Array Antenna

Costas P. Pappis. University of Piraeus Piraeus, Greece Constantinos I. Siettos National Technical University of Athens School of Applied Mathematics and Physics Athens, Greece. FUZZY REASONING

Daniele Piazza, Student Member, IEEE, John Kountouriotis, Student Member, IEEE, Michele D'Amico and Kapil R. Dandekar, Senior Member, IEEE. A Technique for Antenna Configuration Selection for Reconfigurable Circular Patch Arrays

Pawel A. Stefanski H. Hadon Nash Computer Science Department George Mason University. An Object-Oriented Toolkit for Evolutionary Algorithms

Monthippa Uthansakul and Peerapong Uthansakul, School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 .Email: {mtp, uthansakul}@sut.ac.th.2.4 GHz DOA Finder using Modified ButlerMatrix for 2×2 Array Antennas

Zi-Qin Wang, Member, IEEE, Michael T. Manry, Senior Member, IEEE, and Jeffrey L. Schiano, Member, IEEE LMS Learning Algorithms: Misconceptions and New Results on Convergence

BERNARD WIDROW, FELLOW, IEEE, AND MICHAEL A. LEHR. 30 Years of Adaptive Neural Networks: Perceptron, Madaline and Backpropagation

F. Yaman<sup>1</sup> , A. E. Yilmaz<sup>\*2</sup> Impacts of Genetic Algorithm Parameters on the Solution Performance for the Uniform Circular Antenna Array Pattern Synthesis Problem

Xin Yao Computational Intelligence Group, School of Computer Science University College, The University of New South Wales Australian Defence Force Academy, Canberra, ACT, Australia 2600Email: xin@csadfa.cs.adfa.oz.au, URL: <http://www.cs.adfa.oz.au/~xin> Global Optimisation by Evolutionary Algorithms.

Wenle Zhang Dept of Engineering Technology University of Arkansas at Little Rock Little Rock, AR 72204Email: wxzhang@ualr.edu A Generalized ADALINE Neural Network for System Identification

# APÉNDICE

---

## **APENDICE A**

Algoritmo ADALINE LINEAL UNIFORME en visual BASIC para un usuario (ver carpeta de ANEXO)

## **APENDICE B**

Algoritmo DIFUZO LINEAL UNIFORME en visual BASIC para un usuario (ver carpeta de ANEXO)

## **APENDICE C**

Algoritmo EVOLUTIVO-MUTACION ELITISTA LINEAL UNIFORME en visual BASIC para un usuario (ver carpeta de ANEXO).

## **APENDICE D**

Un desfasador ref. MAPCG M0003 (ver carpeta de ANEXO)

## **APENDICE E**

Un combinador de 8 puertos ref. SEPS-ED14112/1 (ver carpeta de ANEXO)

## **APENDICE F**

Microprocesador PIC16(L)F1454/5/9 (ver carpeta de ANEXO)

## **APENDICE G**

Un combinador de 4 puertos (ver carpeta de ANEXO)

## **APENDICE G**

Artículos y ponencias generados con el trabajo de investigación.