



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO RLS PARA  
BEAMFORMING EN LA BANDA DE 28 GHz”

**INFORME DE MATERIA INTEGRADORA**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

LUIS RAÚL PÉREZ LEÓN

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

## **AGRADECIMIENTO**

Mis más sinceros agradecimientos principalmente a Dios, que me ha permitido culminar mis estudios y a mis padres amados que siempre me enseñaron a ser fuerte y seguir adelante sin mirar atrás. Agradezco a mis padres, a mi esposa Jessica y a mi hijo Ezequiel que me han enseñado a no desfallecer y seguir mis sueños, a mi abuelita María de Lourdes y a mis hermanos Lorena y Gustavo que incondicionalmente me alentaron a seguir. También agradezco a la Sra. Jovita por aconsejarme sabiamente para que tome buenas decisiones y prosperar.

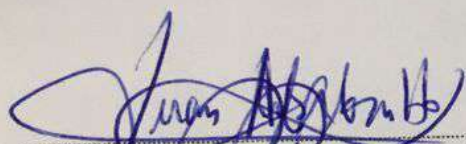
A los amigos, gracias por compartir buenos y malos momentos.

## DEDICATORIA

A mi esposa e hijo por su lealtad, amor y paciencia durante este reto. A mis padres Lorenzo y Karin, a mi hermana Lorena, a mi hermano Gustavo y toda mi familia por su apoyo y estímulo durante estos años de estudio.

**Luis Raúl Pérez León**

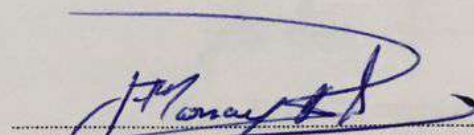
## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



---

**Msc. Juan Carlos Avilés Castillo**

PROFESOR EVALUADOR



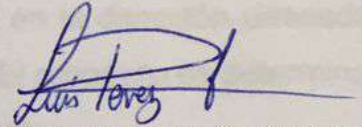
---

**Msc. José Félix Moncayo Rea**

PROFESOR EVALUADOR

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Luis Raúl Pérez León

## RESUMEN

El presente trabajo determina las prestaciones del algoritmo adaptativo Mínimos Cuadrados Recursivo (Recursive Least Square - RLS) para formar un haz de irradiación en una dirección determinada bajo condiciones de potencia reducida la cual se relaciona con la distancia entre el usuario y la estación de base. Para este efecto se crea un ambiente de simulación usando el software Matlab en el que se varía la longitud del enlace actuando en la banda de 28 GHz (banda milimétrica).

La ejecución del algoritmo incluye la variación de vectores de pesos aplicables a un arreglo uniforme de antenas (ULA) que modifica el patrón de irradiación en cada iteración hasta alcanzar una máxima ganancia de arreglo en la dirección deseada, esto es, el usuario recibe la máxima potencia de recepción. El propósito es determinar el número de iteraciones y su relación con la potencia recibida.

El presente trabajo se enfoca en simular un sistema de antenas inteligentes que permita irradiar hacia un usuario específico de manera de que el mismo sea el único que reciba los datos. La transmisión debe realizarse con una máxima ganancia de antenas y considerar la existencia de otros usuarios que pudieran crear interferencias.

Al inicio de este trabajo, se describen los antecedentes necesarios para la ejecución del proyecto con las herramientas proporcionadas por el software Matlab; además, se detalla el funcionamiento del algoritmo y de los escenarios donde se ejecuta el mismo.

En el capítulo dos se definen todos los conceptos teóricos como el arreglo lineal uniforme, algoritmos adaptativos, la ecuación de Friis, la ecuación de pérdida de paso (Path Loss) , la potencia de recepción, la potencia de transmisión, ganancia de la antena, entre otros.

Asimismo, en el capítulo tres se determinan los alcances de la variación de la distancia del enlace y su efecto sobre el número de iteraciones del algoritmo.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN .....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA .....	v
RESUMEN .....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
INDICE DE TABLAS .....	x
CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema .....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivo Especifico .....	2
1.4 Resultados Esperados .....	3
CAPÍTULO 2.....	4
2. ASPECTOS TEÓRICOS. ....	4
2.1 Antenas Omnidireccionales.....	4
2.2 Antenas Direccionales.....	4
2.3 Arreglos ULA .....	5
2.4 Ganancia de un arreglo de antenas .....	6
2.5 Beamforming .....	6
2.6 Algoritmo adaptivos .....	8
2.7 Algoritmos adaptativos ciegos.....	9
2.8 Algoritmo RLS .....	9
2.9 Path Loss.....	12

2.10	Ecuación de FRISS.....	13
2.11	Sensibilidad del receptor .....	14
2.12	Potencia de Transmisión.....	14
2.13	Potencia Recibida .....	14
CAPÍTULO 3.....		15
3.	METODOLOGÍA.....	15
3.1	Parámetros de simulación .....	15
3.2	Método Propuesto .....	16
3.3	Implementación del Algoritmo .....	18
3.3.1	Escenario.....	18
BIBLIOGRAFÍA.....		28
ANEXOS.....		30



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Antena Omnidireccional.....	4
Figura 2.2: Antenas Direccionales. ....	5
Figura 2.3: Patrón de Irradiación con un ULA de 7 elementos. ....	6
Figura 2.4: Beamforming .....	7
Figura 2.5: Formación de un Beamforming a 0° grados .....	7
Figura 2.6: Estructura del Algoritmo adaptativo. ....	9
Figura 2.7: Diagrama de flujo del Algoritmo RLS.....	11
Figura 2.8: Comunicación de Tx y Rx.....	13
Figura 3.1: Diagrama del método propuesto.....	17
Figura 3.2: Escenario del usuario y estación de base.....	19
Figura 3.3: Patrón de irradiación de 10m y 20m. ....	20
Figura 3.4: Patrón de irradiación en 30m y 40m. ....	21
Figura 3.5: Patrón de irradiación de 50m y 60m. ....	22
Figura 3.6: Patrón de irradiación a una posición de 70m.....	23
Figura 3.7: Valor de $\alpha$ igual a 1 y en 0.995.....	24
Figura 3.8: Ganancia de la antena transmisora a 0 dB.....	25
Figura 3.9: Valor de Ganancia de la antena a 5 dB. ....	25
Figura 3.10: Interacciones vs. Distancia. ....	26

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Exponente de pérdida de paso para diferentes ambientes.....	12
Tabla 2: Parámetros de la Antena .....	16

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes.

En estos tiempos, el acceso a sistemas inalámbricos se encuentra aun creciendo de manera exponencial, lo que provoca que los sistemas existentes se encuentren saturados debido a la capacidad de los mismos. Todo esto a su vez, ocasiona que los usuarios no puedan acceder siempre ni con facilidad a aplicaciones actuales que requieren incorporar servicios que necesitan de mayor velocidad de transmisión de datos.

Para poder satisfacer estas necesidades, se ha tomado como reto de investigar la posible implementación de las redes de quinta generación (5G) en las bandas milimétricas (mmW) de 10-300 GHz y en especial en la banda de los 28 GHz que es la recomendada para enlaces exteriores (outdoor) , y de esta manera brindar un mejor servicio a los usuarios [1].

Las características de propagación mmW son un tanto diferente respecto de las actuales ondas microondas, especialmente al tipo de conexión que corresponden al tipo de No línea de vista (NLOS). La mayoría de las conexiones se implementan en forma de rebotes con poca difracción vertical y horizontal. Se pueden usar mediciones de los mismos parámetros [2] que en la banda de microondas en el estudio de las bandas mmW.

Dado que la conexión en la banda mmW son muy direccionales y se requiere un control del patrón de irradiación de la antena, aplicando los conceptos de beamforming se torna importante en estas aplicaciones. El beamforming es una técnica avanzada que procesa las señales que llegan a un arreglo de antenas formando un haz muy direccional que envía la señal hacia un punto específico dentro un entorno dinámico.

En el presente trabajo, el formado del haz se lo realiza aplicando el algoritmo adaptativo de Mínimos Cuadrados Recursivos (Recursive Least Square - RLS).

El algoritmo se ejecuta usando la herramienta Matlab que nos permite observar como el patrón de haz se relaciona con las diferentes iteraciones, distancias y direcciones de ubicación de un usuario. El entorno de simulación es ideal para estudiar el comportamiento del algoritmo frente a las variaciones de los principales parámetros de operación.

Los arreglos de antenas y sus algoritmos de control son claves en los sistemas de ondas milimétricas que logran que se reduzca los impactos de interferencia y se incremente la potencia de recepción de los usuarios. Los algoritmos facilitan la adaptación de los patrones de irradiación mediante los cuales se prestan servicios a usuarios móviles.

## **1.2 Definición del problema**

Se requiere implementar un entorno de simulación que permita analizar cómo se afecta la operación de un algoritmo RLS a medida que la potencia de recepción disminuye, esto es cuando el usuario se aleja de la estación base.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Ejecutar el algoritmo interactivo RLS en un sistema formado por una estación de base equipado con una ULA y usuario con una antena omnidireccional en donde la potencia de recepción disminuye. Se debe evidenciar la variabilidad de los pesos del arreglo y el número de iteraciones.

### **1.3.2 Objetivo Especifico**

- Determinar la convergencia del algoritmo interactivo RLS a medida que el receptor se va desplazando sobre una trayectoria manteniendo un número máximo de iteraciones fijas.
- Evidenciar bajo qué condiciones el algoritmo presenta dificultades a medida la distancia aumenta entre la antena transmisora y receptora.
- Observar el comportamiento de la alineación del patrón de irradiación en el ULA mediante gráficas de vectores de pesos donde el algoritmo

itera y se estabiliza.

#### **1.4 Resultados Esperados**

Con el desarrollo de este proyecto, se espera tener una demostración gráfica y encontrar los parámetros de ejecución cuando afecta a la convergencia al momento que el usuario varié su posición y dirección. Al trabajar con algoritmos iterativos, la ganancia inicial es muy baja.

## CAPÍTULO 2

### 2. ASPECTOS TEÓRICOS.

La presente capítulo se describe los conceptos relacionados con el algoritmo adaptativo, generación de patrones de irradiación bajo la implementación del algoritmo RLS, arreglos ULA, antenas direccionales y omnidireccionales y su ganancia. Adicionalmente se explica la pérdida de paso o trayectoria (Path Loss), ecuaciones de Friis, sensibilidad de receptor, potencias de transmisión y recepción.

#### 2.1 Antenas Omnidireccionales

En la Figura 2.1, se muestra una antena Omnidireccional que “envía” la información teóricamente a los 360 grados por lo que es posible establecer comunicación independientemente del punto en el que se esté, ya que no requieren orientarlas. En contrapartida, el alcance de estas antenas es menor que el de las antenas direccionales [3].



**Figura 2.1: Antena Omnidireccional.**

#### 2.2 Antenas Direccionales.

Una antena direccional como se muestra en la Figura 2.2, es capaz de concentrar la mayor parte de la energía radiada de manera localizada, aumentando así la potencia emitida hacia el receptor o desde la fuente deseada y evitando interferencias introducidas por fuentes no deseadas [4].



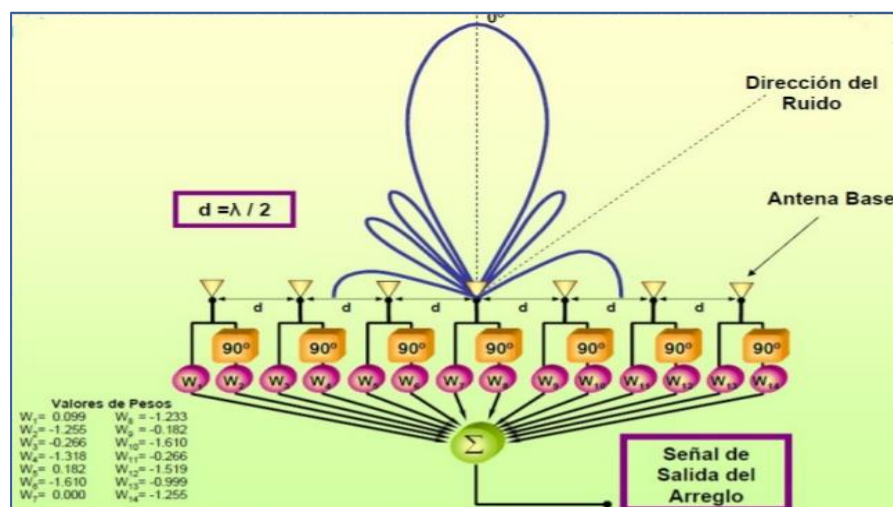
**Figura 2.2: Antenas Direccionales.**

### **2.3 Arreglos ULA**

Un arreglo de antenas es un conjunto de antenas simples que son capaces de concentrar la radiación en las direcciones deseadas. El campo eléctrico total está determinado por la suma vectorial de los campos radiados de los elementos individuales [5, 6].

Los arreglos de antenas tienen cinco parámetros de control que se utilizan para dar forma al patrón de irradiación [5, 6].

- ❖ Configuración geométrica, lineal, plana o circular
- ❖ Distancia de separación entre los elementos
- ❖ Amplitud de excitación de cada elemento
- ❖ Fase de excitación de cada elemento
- ❖ Patrón relativo de cada elemento



**Figura 2.3: Patrón de Irradiación con un ULA de 7 elementos.**

Se muestra la Figura 2.3, el arreglo lineal está compuesto de varios elementos colocados en línea recta, que lo conforman con corriente de igual magnitud, con desfase uniforme y progresivo a lo largo de la línea. La separación entre elementos sea asume igual a  $\lambda/2$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda [7].

## 2.4 Ganancia de un arreglo de antenas

La ganancia máxima del arreglo lineal de la antena viene dado por la expresión:

$$G_{\text{rmax}} = 10 \cdot \log_{10}(N) \quad (2.1)$$

Donde N es el número de elementos del arreglo. En consecuencia la ganancia total del arreglo está dado por:

$$G_r = G_{ri} + G_{\text{arreglo}} \quad (2.2)$$

Para el caso de una antena isotrópica  $G_r=1$ . En nuestro caso, se asume que el arreglo lineal de las antenas (ULA) está formado por N antenas isotrópicas.

## 2.5 Beamforming

Es una técnica avanzada que procesa las señales que llegan a un arreglo de antenas formando un haz muy direccional [8]. La formación de haz se utiliza para detectar y estimar la señal de interés a la salida de un conjunto de sensores mediante filtrado espacial y rechazo de interferencias (ej.: mínimos cuadrados) [8]. Existen un incontable número de aplicaciones de beamforming



en radar, sonar, sismología, comunicaciones inalámbricas, radioastronomía , acústica, etc [8].

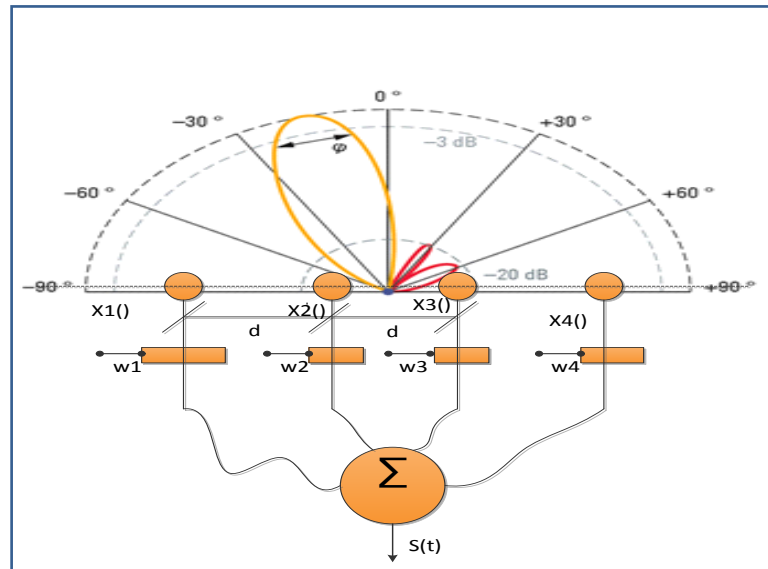


Figura 2.4: Beamforming

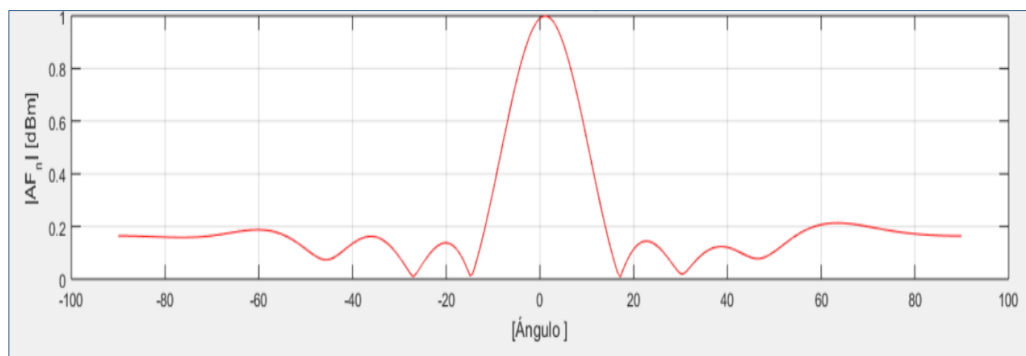


Figura 2.5: Formación de un Beamforming a  $0^\circ$  grados

La Figura 2.4 muestra la aplicación de un vector de pesos  $\mathbf{w}(k)$  sobre el vector de entrada  $\mathbf{x}(k)$ , este último generalmente formado por la suma de la señal original  $s(k)$  más el ruido  $n(k)$  que existe en el canal de comunicaciones y que se lo asume como ruido blanco gaussiano.

$$\mathbf{y}(k) = [\mathbf{w}_1^*(k) \quad \mathbf{w}_2^*(k) \quad \dots \quad \mathbf{w}_N^*(k)] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_N(k) \end{bmatrix} = \mathbf{w}^H \mathbf{x} \quad (2.3)$$

La Figura 2.5 muestra el patrón de irradiación generado por el arreglo que está orientado en la dirección de cero grados.

Esta técnica de beamforming se complica por dos factores [8]:

- La señal objetivo se origina de una dirección desconocida.
- No existe información a priori disponible de las señales de interferencia.

El beamforming cumple con este diagrama de bloque donde, la señales  $x_n(t)$  llega al arreglo de antena y esta se multiplica al conjunto de pesos, que al sumar esta combinación obtendremos la señal deseada  $d(n)$ , Una matriz de bloqueo de señal  $C_a$ , cuya función es cancelar la interferencia y Un bloque de red neuronal que está compuesta por la señal de error ( $e(n)$ ), La salida  $y(n)$  se denotada por la sumatoria de  $d(n)$  y  $e(n)$  , dando como resultado un formador de haces [8].

## 2.6 Algoritmo adaptivos

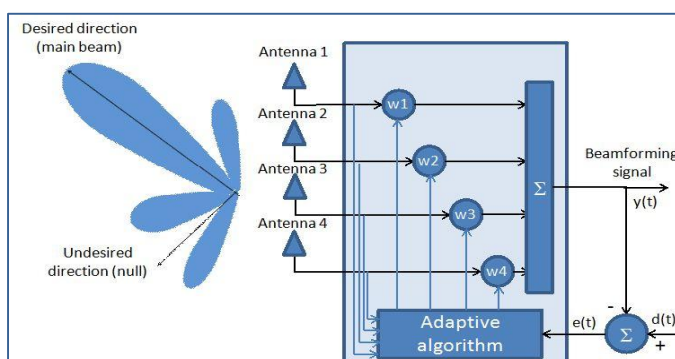
Los algoritmos adaptivos son técnicas que manejan a los arreglos de antenas logrando una recepción máxima en una dirección específica, estimando la señal de llegada en la dirección deseada, mientras que las señales provenientes de otras direcciones son rechazadas. Los pesos óptimos se calculan iterativamente.

Los algoritmos adaptivos pueden ser clasificados en condiciones, basándose en diferentes procesos que se indican a continuación [5]:

Algoritmos basados en la señal de referencia. Este tipo de algoritmos se basa en la minimización del error mínimo cuadrado entre la señal aceptada y una señal de referencia. La señal de referencia generalmente tiene alta correlación con la señal deseada. Ejemplos son el algoritmo de matriz inversa simple (SMI), el mínimas medias cuadráticas (LMS) y el algoritmo mínimos cuadrados recursivos (RLS). “La señal de referencia no es la verdadera señal deseada, de hecho, es una señal que tiene una alta correlación con ésta” [5].

En la estructura del algoritmo adaptativo se conformada por  $n$  elementos del arreglo de la antena, por donde salen la señal de transmisión al usuario deseado, es representando en un bloque conformado por los vectores de pesos

$(w_1, w_2, \dots, w_N)$ , a la salida de este bloque es realimentado con la señal de error  $e(t)$  que es resultado de la diferencia entre la señal beamforming  $y(t)$  y la señal de referencia  $d(t)$ , es decir que el algoritmo adaptivo es un proceso matemático como se muestra en la Figura 2.6.



**Figura 2.6: Estructura del Algoritmo adaptativo.**

## 2.7 Algoritmos adaptativos ciegos.

Estos algoritmos no requieren de una señal de referencia; generan por sí mismos la señal de referencia pedida usando las señales recibidas. Un ejemplo es el algoritmo Modulación Constante (CMA) [5].

## 2.8 Algoritmo RLS

El algoritmo RLS (Recursive Least Square) se usa como filtro adaptativo para encontrar la matriz de correlación de la señal de entrada en forma recursiva que permite formar el haz (beamforming) en la dirección deseada. Para el efecto, el algoritmo RLS varía iterativamente los pesos aplicados a los elementos del arreglo de la antena que para el presente trabajo es una ULA (Uniform Linear Array) de  $N$  antenas. El número de iteraciones varía dependiendo de las condiciones del canal de comunicaciones [10].

Asumiendo que al tiempo discreto  $k$ ,  $\bar{x}(k)$  es el vector de las señales de entrada al arreglo ULA de  $N$  antenas,  $\alpha$  es un factor de olvido y  $d(k)$  la señal de referencia, se tiene que [10]:

$$\hat{R}_{xx}(k) = \sum_{i=1}^k \alpha^{k-i} \bar{x}(i) \bar{x}^H(i) \quad (2.4)$$

$$\hat{\mathbf{r}}(\mathbf{k}) = \sum_{i=1}^{\mathbf{k}} \alpha^{k-i} \mathbf{d}^*(i) \bar{\mathbf{x}}(i) \quad (2.5)$$

Las ecuaciones 2.4 y 2.5 ( $\hat{\mathbf{R}}_{xx}, \hat{\mathbf{r}}$ ) son las aproximaciones de  $\bar{\mathbf{R}}_{xx} = E(\bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{x}}^H)$  y  $\bar{\mathbf{r}} = E(\mathbf{d}^*\bar{\mathbf{x}})$ , donde  $E$  representa la función de valor esperado, las cuales se actualizan recursivamente en cada iteración de la siguiente forma [10]:

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx}(\mathbf{k}) = \alpha \hat{\mathbf{R}}_{xx}(\mathbf{k}-1) + \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k})\bar{\mathbf{x}}^H(\mathbf{k}) \quad (2.6)$$

$$\hat{\mathbf{r}}(\mathbf{k}) = \alpha \hat{\mathbf{r}}(\mathbf{k}-1) + \mathbf{d}^*(\mathbf{k})\bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k}) \quad (2.7)$$

Usando las ecuaciones 2.6 y 2.7, se realiza una averiguación iterativa por la matriz del vector de pesos óptimos tomando como referencia los valores anteriores influenciados por el parámetro  $\alpha$  que es el factor de olvido que toma valores entre 0 y 1 [10].

$$\bar{\mathbf{g}}(\mathbf{k}) = \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(\mathbf{k})\bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k}) \quad (2.8)$$

$$\bar{\mathbf{w}}(\mathbf{k}) = \bar{\mathbf{w}}(\mathbf{k}-1) + \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{k}) (\mathbf{d}^*(\mathbf{k}) - \bar{\mathbf{x}}^H(\mathbf{k}) \bar{\mathbf{w}}(\mathbf{k}-1)) \quad (2.9)$$

La señal de salida se calcula usando la solución óptima de Wiener, esto es:

$$\mathbf{y}(\mathbf{k}) = (\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(\mathbf{k}) * \hat{\mathbf{r}}(\mathbf{k}))^H \mathbf{x}(\mathbf{n}) = \bar{\mathbf{w}}^H \bar{\mathbf{x}}(\mathbf{k}) \quad (2.10)$$

Los vectores de ponderación óptima y la ganancia de Kalman (ecuación 2.8 y 2.9) se van adaptando frente a las modificaciones del medio. El algoritmo RLS es de rápida estabilidad y tiene una mayor complejidad debido a una mayor carga de desarrollo de datos comparado con otros algoritmos tales como el LMS, SMI [10].

El método de mínimos cuadrados lleva a estimar la matriz  $\mathbf{R}_{xx}$  asociada con la señal de entrada y el vector de correlación  $\mathbf{r}$ . El producto de ambos crea el vector de pesos ( $\mathbf{w}$ ) de dimensión  $N \times 1$  que da la selectividad del arreglo.

La Figura 2.7 se observa el diagrama de flujo que detalla la operación del algoritmo.

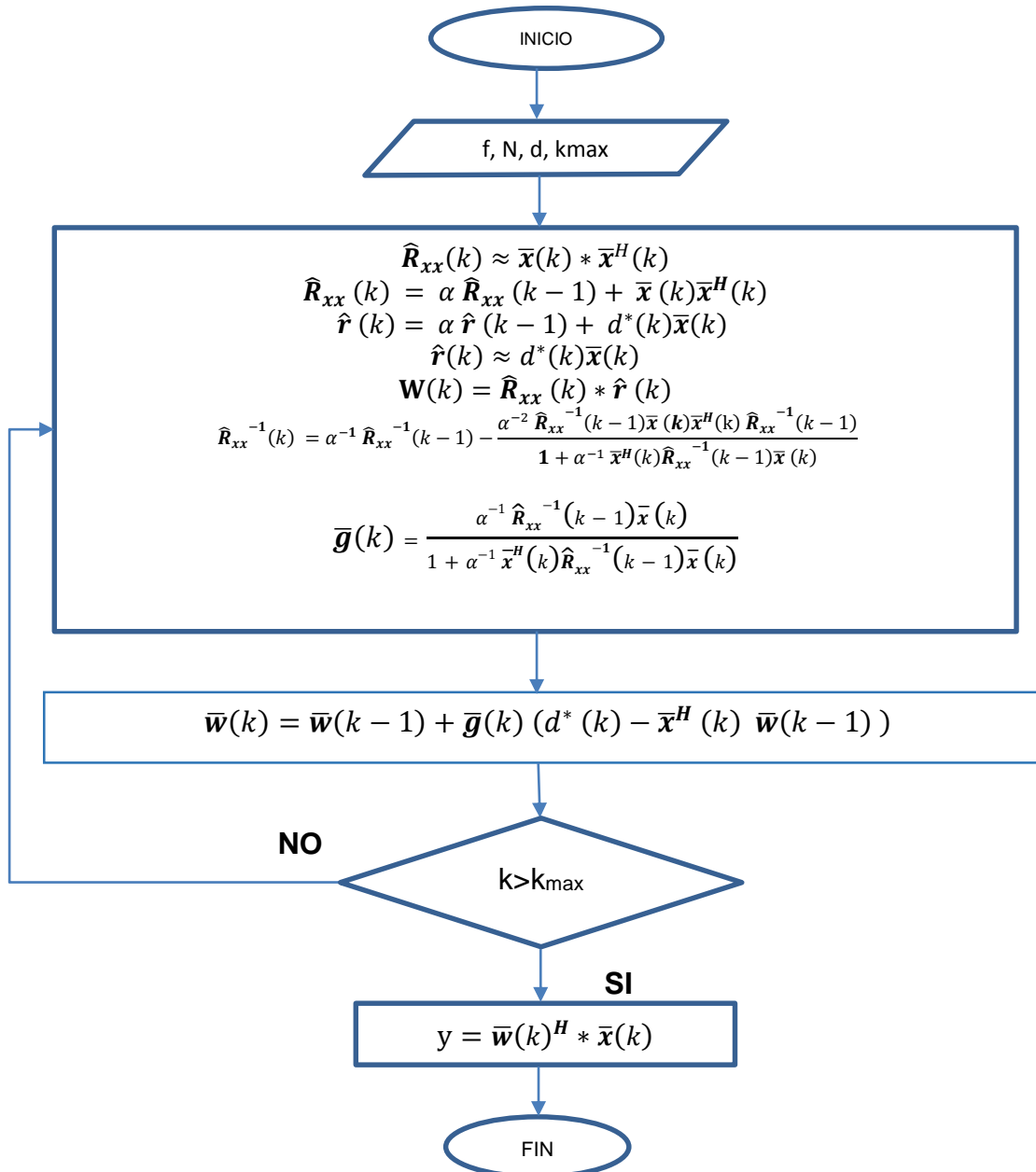


Figura 2.7: Diagrama de flujo del Algoritmo RLS

## 2.9 Path Loss

Las pérdidas del trayecto (Path Loss) son aquellas relacionadas con la pérdida de potencia que experimenta una onda electromagnética al viajar desde el transmisor (Tx) hasta el receptor (Rx). La pérdida de trayecto en el espacio libre viene dada por la siguiente expresión:

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2 \quad (2.11)$$

$$FSPL_{dB} = 20 \log\left(\frac{4\pi f}{c}\right) + 20 \log(d) \quad (2.12)$$

Generalmente la pérdida de potencia en el paso de propagación se expresa en función de la distancia y el exponente  $n$ . [11]

$$\overline{P}l(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (2.13)$$

Donde  $d$  es distancia entre Tx y Rx y  $d_0$  la medición en una distancia de referencia donde cumple las condiciones de “Espacio Libre”; toma un valor típico de un metro.

En la Tabla 1 se indica valor de  $n$  se utiliza para cada escenario, pero para este trabajo utilizaremos  $n = 2$ . Se debe indicar, sin embargo, que el exponente cuadrático no es el mejor ajuste a los datos en muchos ambientes de propagación reales [8].

Espacio libre	2
Área urbana de radio celular	2.7 a 3.5
Área urbana	3 a 5
Construcción de línea de vista	1.6 a 1.8
Obstrucción de edificio	4 a 6
Obstrucción de fabrica	2 a 3

**Tabla 1: Exponente de pérdida de paso para diferentes ambientes.**

## 2.10 Ecuación de Friis

La ecuación de Friis se utiliza a menudo en un sistema de comunicaciones inalámbricas para calcular la potencia promedio de recepción. Asumamos (Figura 2.8) dos antenas orientadas una hacia la otra para la máxima potencia transmitida y recibida [12].

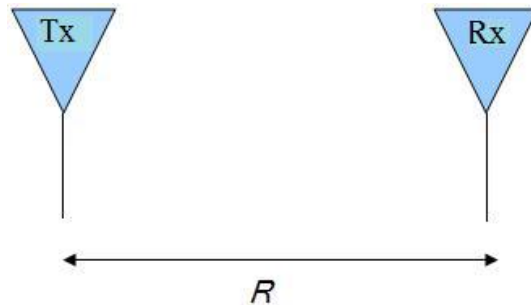


Figura 2.8: Comunicación de Tx y Rx

La potencia irradiada es igual a:

$$P = P_t * G_t \quad (2.14)$$

$$G_t = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.15)$$

Donde  $P_t$  es la potencia del Tx y  $G_t$  la ganancia de antena transmisora en este caso una antena de alta directividad,  $\eta$  es el rendimiento de irradiación,  $D$  es la directividad y  $\lambda$  es la longitud de onda [12].

La potencia recibida viene dada por la fórmula de Friis: [5, 13]

$$P_r = \frac{G_r P}{4\pi d^2} A_e = \left[ \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \right] \left[ \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \right] = \frac{G_r P_t G_t \lambda^2}{(4\pi d)^2} = \frac{G_r P_t G_t c^2}{(4\pi f)^2 d^2} \quad (2.16)$$

Expresando la ecuación en decibelios, se tiene:

$$P_{r_{dBm}} = P_{t_{dBm}} + G_{t_{dBi}} + G_{r_{dBi}} - FSPL_{dB} \quad (2.17)$$

$$P_{r_{dBm}} = P_{t_{dBm}} + G_{t_{dBi}} + G_{r_{dBi}} - 20 \log \left( \frac{4\pi f}{c} \right) - 20 \log(d) \quad (2.18)$$

Donde  $P_r$  y  $P_t$  son medidos en dBm,  $G_t$  y  $G_r$  están en dBi,  $d$  es la distancia entre antenas medida en metros,  $f$  es la frecuencia de la señal portadora medida en Hertz y  $c$  es la velocidad de la luz en m/s [12].

### **2.11 Sensibilidad del receptor**

La sensibilidad de un receptor es un parámetro muy importante en un radioenlace, ya que identifica el valor mínimo de potencia necesario para poder decodificar o extraer la información.

### **2.12 Potencia de Transmisión**

Es la potencia de salida del equipo transmisor sin incluir la ganancia de la antena. El máximo valor de potencia depende de las regulaciones vigentes en cada país, dependiendo de la frecuencia de operación y puede cambiar al variar el marco regulatorio.

### **2.13 Potencia Recibida**

La potencia recibida por el equipo Rx viene dado por la ecuación de Friis [12].



## CAPÍTULO 3

### 3. METODOLOGÍA

Después de analizar la teoría en el capítulo anterior, y entender sobre la generación de un patrón de radiación usando un arreglo de antenas, se procede a estudiar la implementación del algoritmo de Mínimos cuadrados recursivo (RLS) para irradiar la máxima intensidad de potencia hacia la dirección de un usuario.

Para la ejecución del algoritmo se contará con un usuario equipado con una antena omnidireccional (isotrópica) que radiará una señal de referencia de forma sinusoidal, donde la estación de base captará dicha señal por medio de un arreglo ULA de ocho antenas con separación  $\lambda/2$ .

Para el análisis del desempeño del algoritmo se contará con un escenario en el que el usuario aumenta su distancia de separación respecto de la estación de base. Se considerará inicialmente una distancia de 20m que irá en aumento a medida que el usuario se desplaza en la trayectoria.

En esta sección se definen los parámetros y condiciones de ejecución del algoritmo con la finalidad de analizar el comportamiento del RLS cuando la potencia de recepción es cada vez menor cuando el usuario se aleja de su estación base, y además de como varía el número de iteraciones.

La implementación y simulación del escenario se lo realiza aplicando el programa de desarrollo Matlab.

#### 3.1 Parámetros de simulación

La característica de nuestro escenario en el que evaluaremos el algoritmo se ejecutará con una estación de base proporcionada con un arreglo de 8 antenas. La Tabla 2 a continuación especifica los parámetros más importantes para la simulación.

Parámetros	Referencias
Potencia de Transmisión	30 dBm
Ganancia de Transmisión	0 dB
Ganancia de Recepción	Variable. Inicial 0 dB
Número de antenas en el arreglo	8
Frecuencia de operación	28 GHz
$\lambda/2$	5.35 mm
Ancho de Banda	1 GHz

Tabla 2:

### Parámetros de la Antena

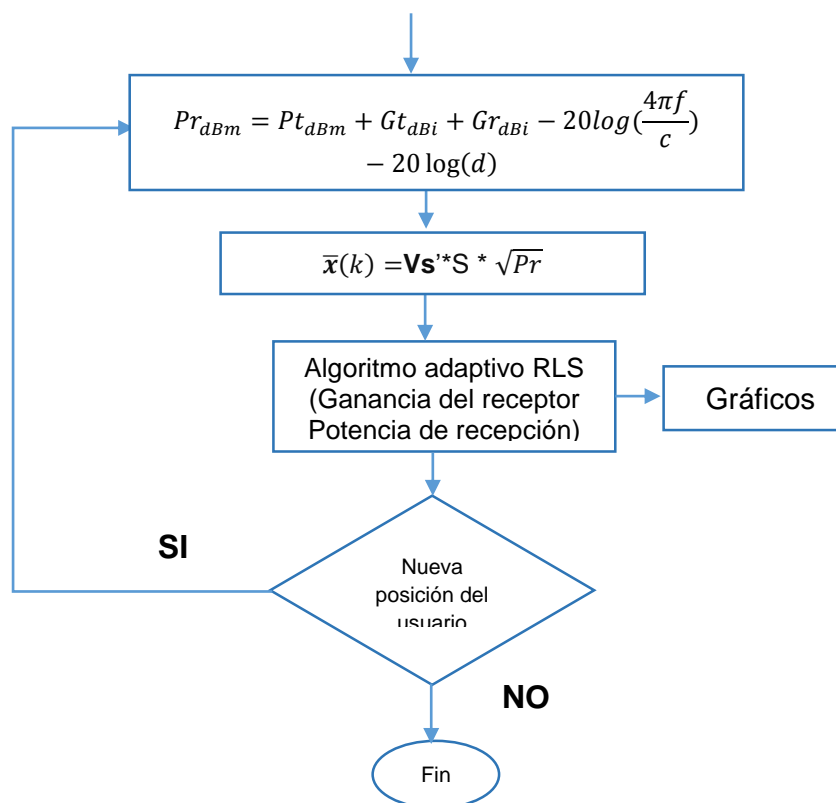
La ganancia de la antena Tx varía con cada iteración y tiene un máximo de 9.03 dB obtenida al resolver  $(10 \log_{10}(8))$ .

### 3.2 Método Propuesto

A medida que el algoritmo va iterando, actualiza un vector de pesos para el ULA. Este proceso continúa hasta alcanzar su óptimo valor. En cada iteración el patrón de irradiación es cada vez más direccional en la línea de trayectoria que une el transmisor con el receptor, esto es, su ganancia aumenta.

La potencia de recepción varía en función de la posición del usuario por lo que en general se aplica la ecuación de Friis para su aproximación. Sin embargo, la ganancia de la antena cambia con cada iteración del algoritmo. La ganancia del arreglo varía hasta que el lóbulo principal del patrón de radiación alcanza el valor máximo en la dirección deseada. El número de iteraciones se aproxima observando la variabilidad de los pesos aplicados a cada una de las antenas y la ganancia del arreglo. Las distancias de separación entre Tx y Rx consideradas son entre 20m hasta 70m.

Generador de parámetros:  
 Frecuencia  
 Distancia  
 Potencia de transmisión  
 Ganancia de la antena Tx



**Figura 3.1: Diagrama del método propuesto.**

Cabe mencionar que como se trata es un escenario de espacio libre (enlace con línea de vista), se escoge como parámetros el valor de  $n=2$ , como está indicado en la Tabla 1. Al ingresar el valor de la distancia y frecuencia se obtienen valores en la ecuación de Path Loss y así mismo obtendremos la potencia de recepción usando la ecuación de Friis. Por cada posición se determina el número de iteraciones que necesita el algoritmo hasta estabilizar visiblemente el vector de pesos que se aplican a cada antena, se pregunta si hay nueva ubicación del usuario se reinicia el proceso y si no hay una nueva ubicación del usuario se termina mostrando las gráficas, como se describe en la Figura 3.1.

Lo cual tiene una directa incidencia en la ganancia del arreglo. Dado que se usa una antena omnidireccional en el lado del usuario y un arreglo con pocas antenas en la estación de base, la ganancia total del sistema de antenas es

pequeño. Dicha ganancia no compensa suficientemente la disminución de la potencia recibida, lo que a su vez genera un aumento en el número de iteraciones necesario en el algoritmo. En la implementación se asume que se conoce el ángulo de arribo para tener un valor de arranque inicial.

La base receptora capta la señal radiada por el usuario en dirección de la línea que une el Tx y Rx (enlace tipo línea de vista) por lo que la señal recibida tiene una intensidad  $S(k)\sqrt{P_r}$ . La potencia de recepción varía con cada iteración en razón de la variación de la ganancia del arreglo. Una vez que ya se calcula un valor inicial del vector de pesos, este proceso continúa de manera iterativa hasta que el algoritmo aproxima los valores óptimos.

### **3.3 Implementación del Algoritmo**

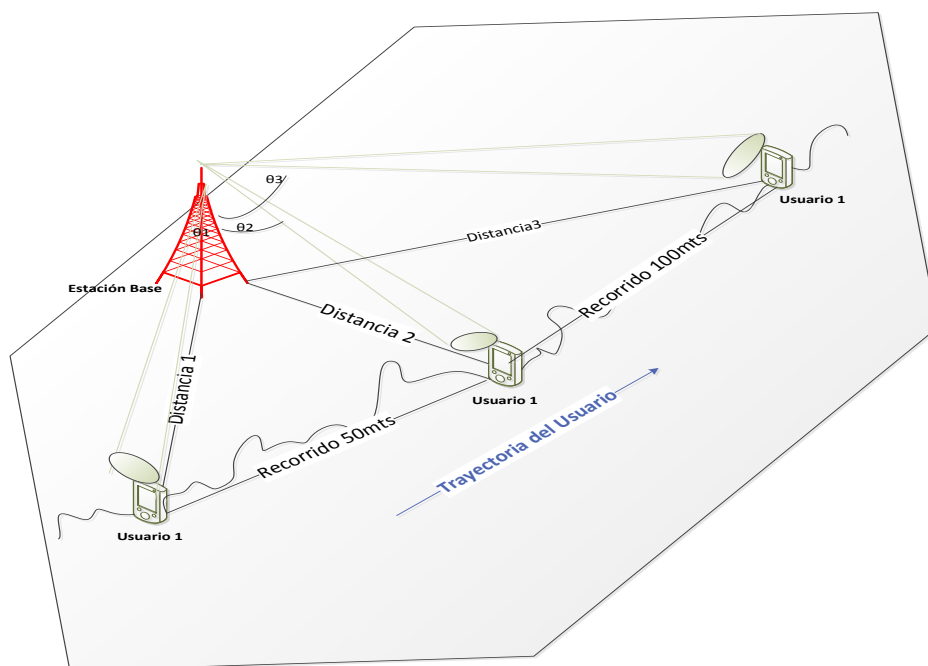
En esta sección se analiza como el rendimiento del algoritmo describiendo la estabilidad de los vectores de pesos, la forma de patrón de irradiación del arreglo lineal de antenas (ULA) para el área de cobertura considerada.

#### **3.3.1 Escenario**

Usando el programa de Matlab se simula un escenario, donde el usuario se mueve en posiciones diferentes con respecto de la estación de base como se aprecia en la Figura 3.2. Se examina el beamforming generado por el ULA dando la máxima potencia en la dirección que se encuentre el móvil. Este proceso se repite a medida que la distancia del usuario respecto de la estación de base aumenta en línea recta.

Adicionalmente se estudia el efecto de la variación del valor de factor de olvido y de la ganancia de la antena transmisora de 0 dB a 5 dB para

diferentes posiciones. En cada caso se obtienen gráficos del patrón de irradiación y los vectores de pesos.



**Figura 3.2: Escenario del usuario y estación de base.**

El primer desplazamiento considerado es de 10m obteniéndose 1280 iteraciones. Para una distancia de 20m aumenta el número de iteraciones del algoritmo hasta alcanzar un valor de 1390 iteraciones, lo cual se observa la gráfica del comportamiento del patrón de irradiación de ambas distancia, a una dirección de  $30^\circ$  con 8 antenas del arreglo ULA y la máxima ganancia de 9.03 dB [ver Figura 3.3].

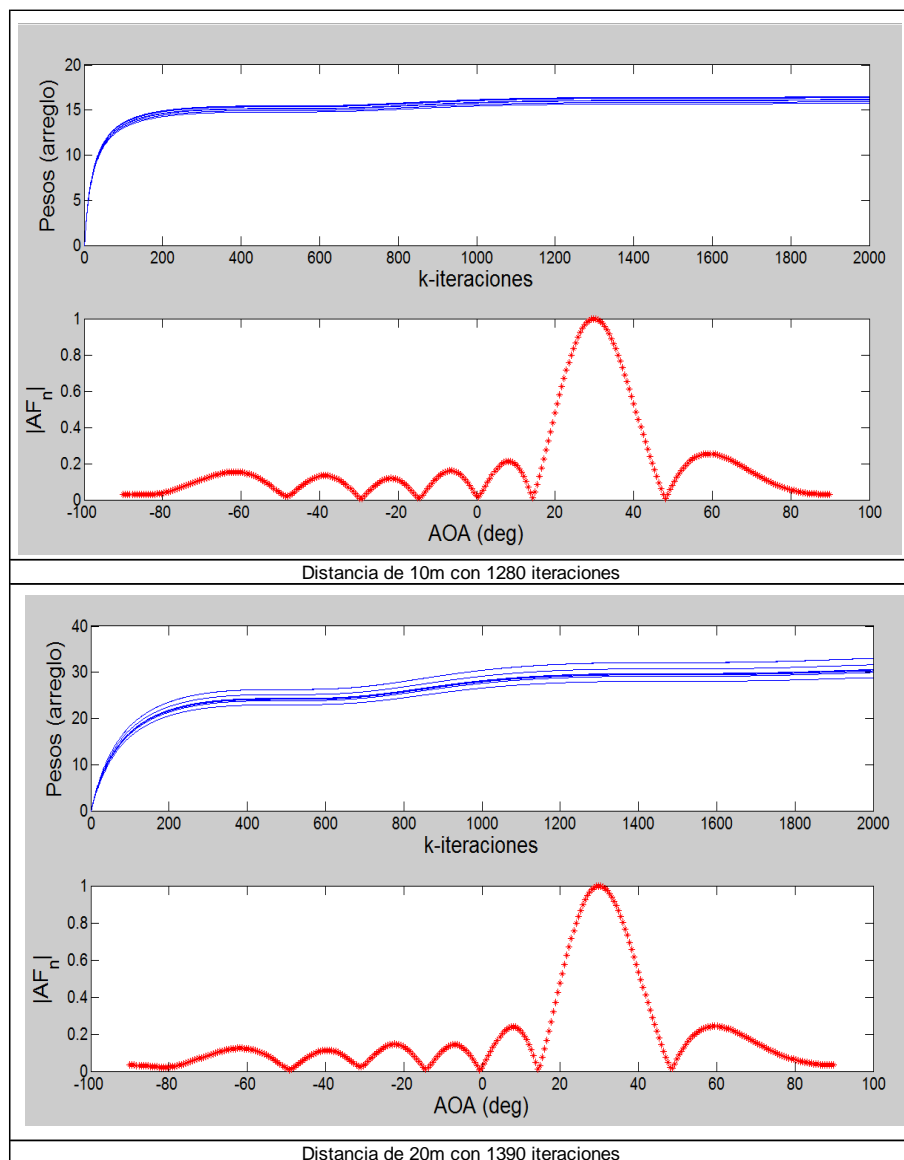
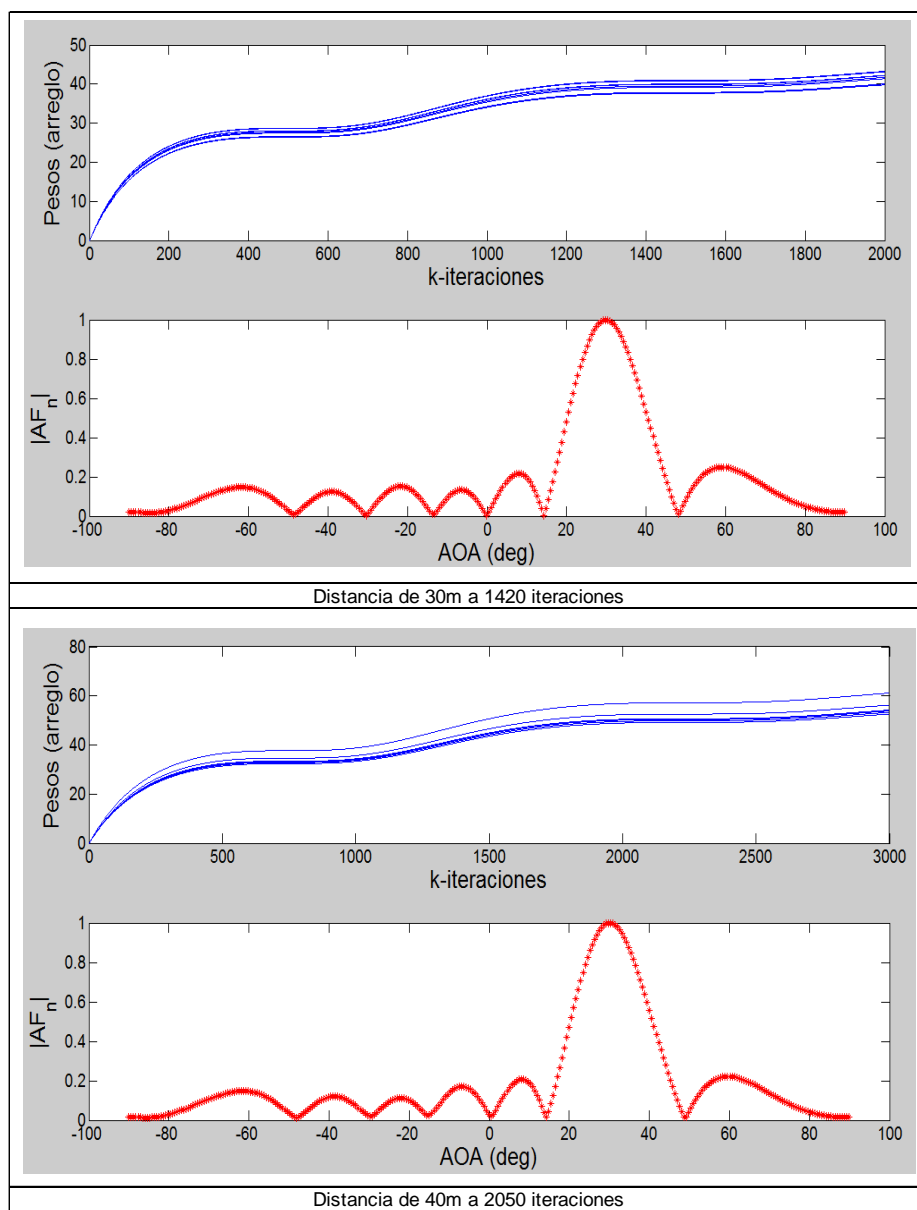
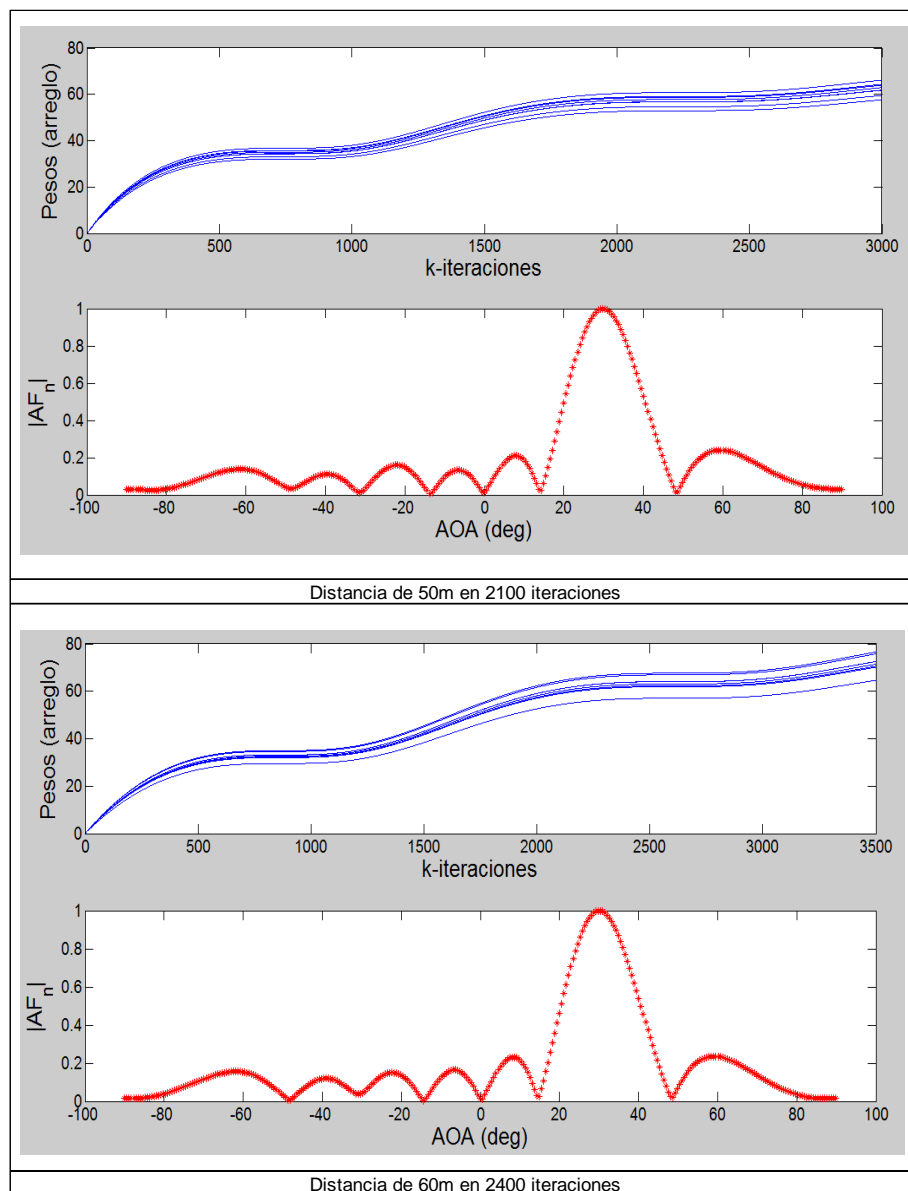


Figura 3.3: Patrón de irradiación de 10m y 20m.



**Figura 3.4: Patrón de irradiación en 30m y 40m.**

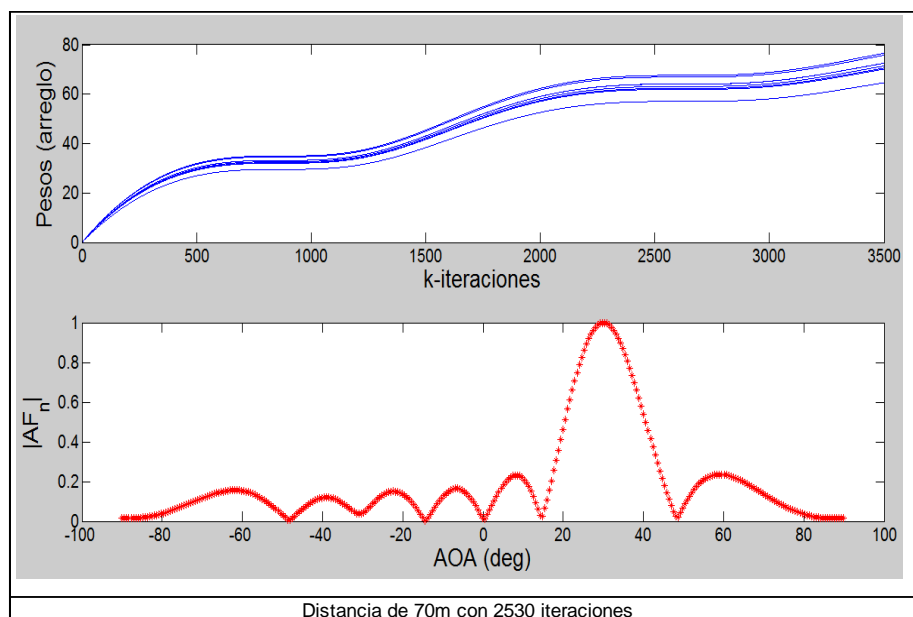
En la Figura 3.4, se observa los efectos sobre el algoritmo RLS cuando cambiamos el valor de la distancia a 30 y 40 metros. La matriz de pesos hasta alcanzar una estabilidad alrededor de 1420 a 2050 iteraciones.



**Figura 3.5: Patrón de irradiación de 50m y 60m.**

En la Figura 3.5 se observa que para distancias de 50m a 60m, el vector de pesos no varía mayormente en el número de iteraciones.

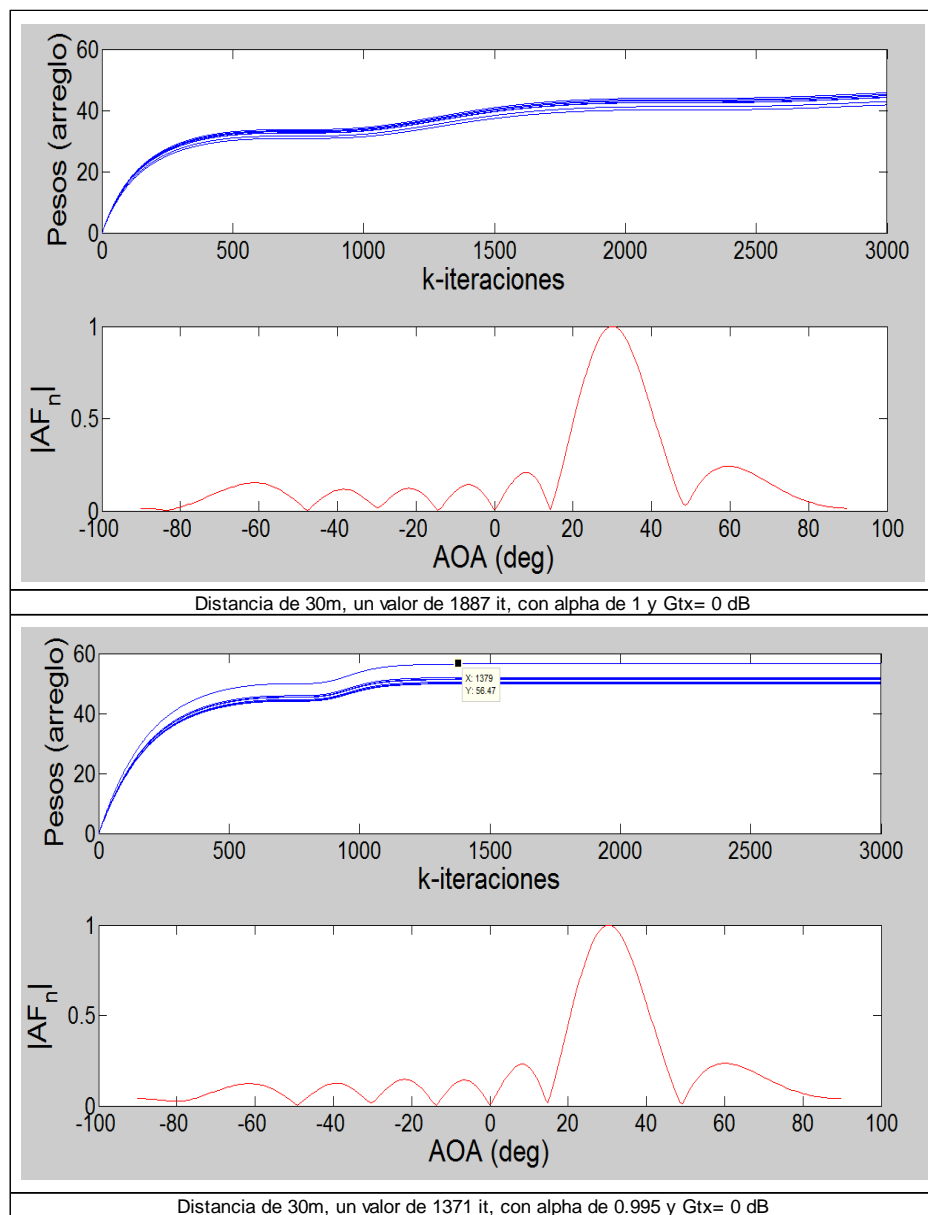




**Figura 3.6: Patrón de irradiación a una posición de 70m.**

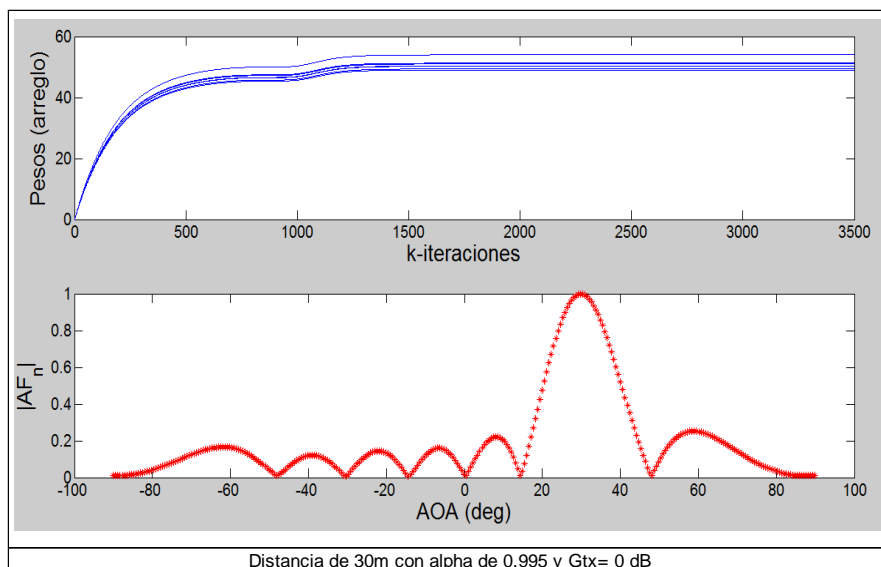
Para una distancia de 70m con respecto a la estación de base, se requieren alrededor de 2530 iteraciones, pero al final de este tramo vemos que tiende a subir lo que es necesario agregar más valor de iteración en nuestro algoritmo y así apreciar en qué valor se estabiliza para esta situación [ver Figura 3.6].

A continuación se modifica el valor de  $\alpha$  de  $\alpha = 1$  a  $\alpha = 0.995$  en la operación del algoritmo; la distancia se mantiene fija. Se desea observar la estabilidad del vector de pesos con dichos cambios ya que este factor es importante. La ganancia de la antena transmisora se mantiene en 0 dB. Se observa que disminuye el número de iteraciones como se observa en la Figura 3.7.

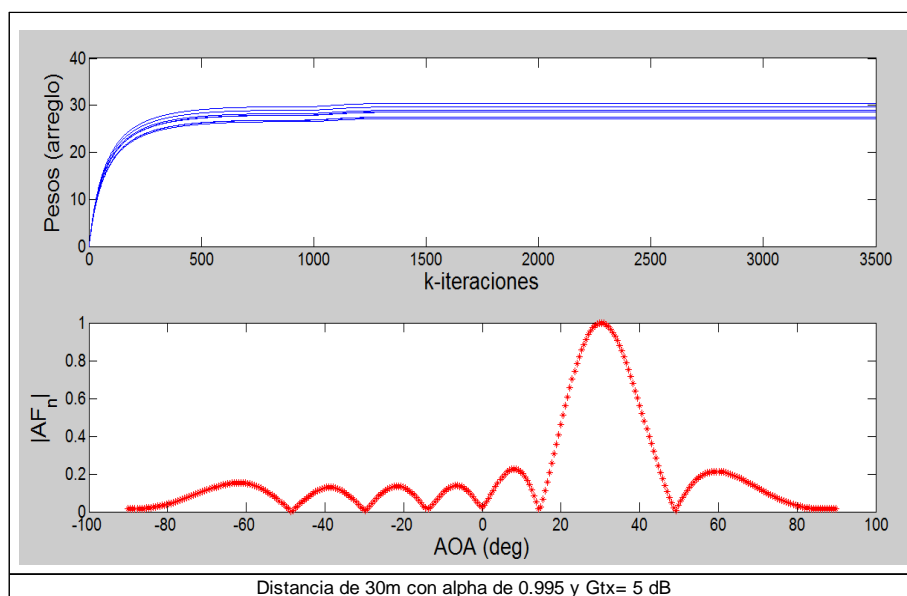


**Figura 3.7: Valor de  $\alpha$  igual a 1 y en 0.995.**

Al variar las ganancias de la antena transmisora de 0 dB a 5 dB, se observa como se reduce el número de iteraciones de 1430 a 1230 porque está en función la potencia recibida (ver en las Figuras 3.8 y 3.9). El path loss es un valor grande que no cambia en esta modificación.

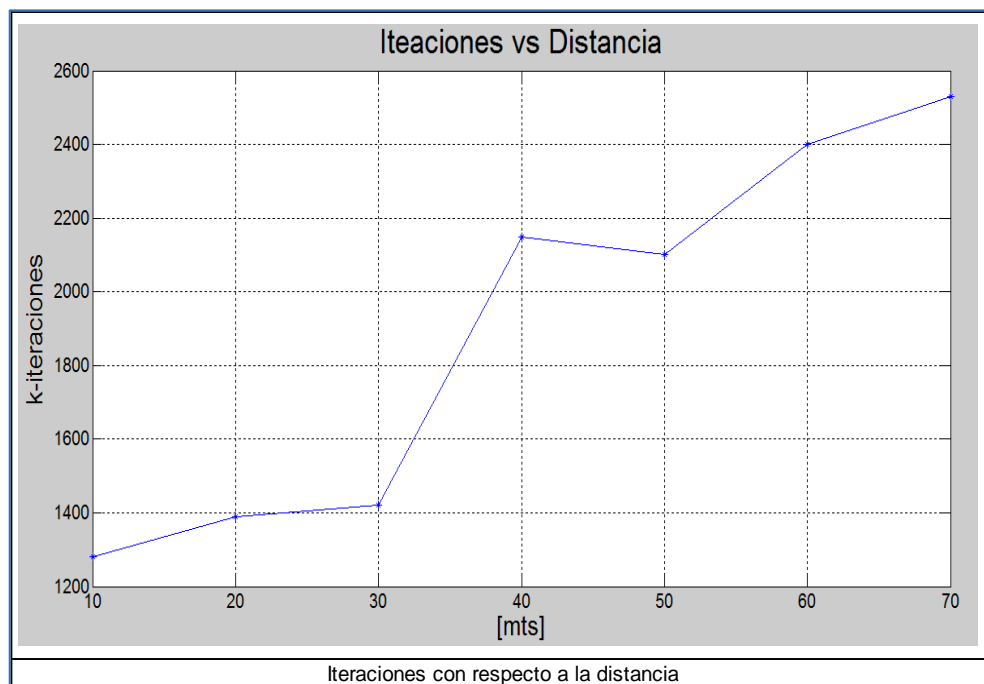


**Figura 3.8: Ganancia de la antena transmisora a 0 dB.**



**Figura 3.9: Valor de Ganancia de la antena a 5 dB.**

Se puede notar que, efectivamente si disminuye el número de iteraciones variando tanto el factor de olvido y la ganancia de la antena transmisora. En el segundo caso aumenta la potencia recibida.



**Figura 3.10: Interacciones vs. Distancia.**

En la Figura 3.10, se muestra la relación entre el número de iteraciones y la distancia entre el usuario y estación de base. Se aprecia que la curva tiene un comportamiento creciente, es decir, cada vez que aumenta la distancia, el algoritmo requiere más iteraciones para estabilizarse.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La intensidad de potencia de recepción se reduce a medida que el usuario se aleja del receptor lo que reduce la potencia que recibe el arreglo y dificulta la operación del algoritmo que actúa para formar el patrón de irradiación de la antena receptora.

El algoritmo requiere de un notable número de iteraciones a medida que la distancia entre el usuario y el transmisor aumente por lo que en las simulaciones se observó que para una distancia entre 10m a 70m en línea de vista, el algoritmo requiere alrededor de 1000 a 3000 iteraciones para estabilizar completamente los pesos de la ULA..

El algoritmo crea vectores de pesos para el ULA, que los actualiza a medida que ejecuta una nueva iteración hasta alcanzar el valor óptimo. En cada iteración el patrón de irradiación se vuelve más direccional en la línea que une al usuario con la estación base. Una vez que se estabiliza, el lóbulo principal del patrón de radiación presenta una máxima ganancia de  $10\log_{10}(8) = 9.03$  dB.

El factor de olvido es un factor importante y es recomendable escogerlo apropiadamente ya que produce un menor número de iteraciones en el vector de pesos al momento de ejecutar el algoritmo en la misma distancia de 30 m el  $\alpha = 1$  nos da el valor de iteración de 1390 y con  $\alpha = 0.995$  el valor es de 1230 iteraciones.

Se recomienda una mejor preparación de los estudiantes en el manejo de la herramienta Matlab que facilite la implementación de entornos de simulación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. S. Rappaport (Febrero 2017). "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!" [Online]. Disponible en: <http://www.5gamericas.org>.
- [2] Juha Okkonen, "Uniform linear adaptive antenna array beamforming implementation with a wireless open-access research platform", Tesis de Maestría, Dept. de Ciencias Computacionales e Ingeniería, Univ. de Oulu, Finlandia, 2013.
- [3] Anónimo. (2009). "Ecuación de Friis" [online]. Disponible en: <http://www.antenna-theory.com/spanish/basics/friis.php>.
- [4] Anónimo. (2009). "Antenas Direccionales" [online]. Disponible en: [https://www.ecured.cu/Antena\\_direccional](https://www.ecured.cu/Antena_direccional).
- [5] P. Espinosa, C. Villaroel . "Proposición y Simulación de una Algoritmo Adaptativo para Sistemas de Antenas Inteligentes", Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 15 N°3, 2007.
- [6] D. B. Van Veen and K. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," IEEE ASSP, vol. 5 no. 2, pp. 4-24, 1998.
- [7] C. Useche, A. Rodríguez. (2011). "Antenas inteligentes" [online]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/alcajo2011/presentacion-antenas-inteligentes>.
- [8] Anónimo. (2013). "Beamforming que es y cómo funciona" [online]. Disponible en: <http://distribucion.itsitio.com/ar/beam-forming-que-es-y-como-funciona/>.
- [9] M. Moreira. (2016). "tipos de antenas" [online]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/seguimosenlineaporti/los-tipos-de-antenas-wifi>.
- [10] Gross Frank .B, "Smart Antennas" en el Smart Antennas Wireless Communications With MATLAB, Ed, USA. The McGraw-hill Companie: 2005, ch. 8, pp.207-234.
- [11] T. Rappaport, "Wireless Communications", Ed. Prentice Hall, 1996.
- [12] Anónimo. (2001). "ecuación de perdida de camino" [online]. Disponible en: <http://www.antenna-theory.com/spanish/basics/friis.php/>

- [13] J. L. Vázquez y E. Rajo. (2010). "Campos Electromagnéticos" [online]. Disponible en: <https://www.geekmag.es/tecnologia/la-ecuacion-de-friis-la-base-de-las-telecomunicaciones/>.
- [14] H. L. Van Trees, "Adaptive Beamforming" en el Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2002, ch. 7, pp. 752-768.
- [15] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter wave cellular wireless networks: Potentials and challenges," Proc. IEEE, vol. 102, no. 3, pp. 366-385, Marzo, 2014.
- [16] Anónimo (2009). "Arreglo de Antenas" [Online]. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/electronica/catedras/mediosdetransmision>.
- [17] S. Buettrich. (2007). "Cálculo de Radioenlace" [Online]. Disponible en: <http://www.analfatecnicos.net/archivos/24.CalculoDeRadioenlace> 2007.
- [18] David k, Campbell. Adaptive Beamforming Using a Microphone Array for Hands-Free Telephony. Phd thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [19] Harkirat Singh and Suresh Singh. "A mac protocol base don adaptive beamforming". Technical report, Portland State University, 2003.
- [20] S. Kutty. (2015, Dic, 1). "Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey", Student Member, IEEE, Debarati Sen, Member, IEEE.
- [21] J. L. Besada, M. Sierra. (2008-2009). "Ecuación de Friis" [online]. Disponible en: <http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiacion-y-propagacion/contenidos/apuntes/presentaciones/rdpr1.pdf>.

## ANEXOS

### ABREVIATURAS

Ae	Apertura efectiva
c	Velocidad de la luz
CMA	Algoritmo modular constante
dBi	Decibelios de ganancia
dBm	Decibelios miliwatt
D	Distancia
f	Frecuencia
k	Valor de iteración
Gt	Ganancia de transmisión
mmW	Bandas milimétricas
LMS	Algoritmo mínimas medias cuadráticas
SMI	Matriz inversa simple
R	Matriz de covarianza
r	Matriz de correlación cruzada
Pt	Potencia de transmisión
RLS	Mínimos cuadrados recursivos
$\lambda$	Lambda
W	Vector de pesos
ULA	Arreglo lineal de antenas
Tx	Transmisor
Rx	Receptor
$\alpha$	Alpha