



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

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO LMS PARA
BEAMFORMING EN LA BANDA DE 28 GHZ”**

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

BRYAN ALEXANDER SANGUCHO VIVANCO
EDISSON FERNANDO PAREDES NACIPUCHA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTO

¡Gracias por estar ahí siempre! Es lo mínimo que podría decir a cada una de las personas que conocí en mi formación personal y académica, gracias a muchos amigos, profesores y familiares pude llegar hasta este punto y al fin cosechar los frutos que he sembrado a lo largo de estos años.

Con el tiempo escuche muchos consejos, ayuda de personas que nunca pensé llamar amigos, y así mismo afronte muchas desilusiones y malos ratos donde pude mirar su lado positivo y convertirlos en una experiencia más de vida.

Finalmente, quiero dar las gracias a mi amigo el Ing. Kevin Arteaga Yela por aportar con su experiencia y conocimientos, pues pude dar otro enfoque a mis ideas y objetivos para desarrollar algunos ítems del proyecto.

Bryan Alexander Sangucho Vivanco

Eternamente agradecido al padre celestial por la vida y el entusiasmo que me dio día tras días para no desmayar y las innumerables veces que me permitió levantarme luego de pensar que estaba todo perdido, a mis padres hermanos y familiares por su infinito amor y apoyo, nada de esto sería posible si la ayuda de ellos, el éxito del camino culminado fue la acumulación de muchos consejos de familiares, amigos y conocidos que aprecio mucho.

Edisson Fernando Paredes Nacipucha

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mi madre, gracias a su paciencia, amor y sabios consejos pude mantenerme firme y con perseverancia en mi vida universitaria, no fue fácil, sinceramente fue uno de mis retos más difíciles, conllevó consigo mucha responsabilidad, dedicación, y esfuerzo. Deje de lado muchas cosas para concentrarme en mis estudios, llego la hora de dar paso a una nueva etapa en mi vida, y lo hare con el mismo ánimo y ganas.

Nota: Madre de mi alma estarás siempre en mi corazón, ya nos veremos pronto.

Bryan Alexander Sangucho Vivanco

Este proyecto lo dedico a mi Madre Roció y mi Padre Luis, por sacrificar sus comodidades y recursos con el fin de darme la educación que es el regalo máspreciado que puedo tener. Dedico este trabajo a mi hermana Jamileth mis hermanos Carlos, Jonathan, demás familiares que están aún conmigo en especial y de gran manera a mis familiares que ya no están en esta vida, a ellos toda mi gratitud y mi amor. Dedico este proyecto a mis amigos, conocidos que siempre me brindaron su ayuda sin importar nada a cambio, y como fin de mi dedicatoria debo expresar mucha gratitud a mi esposa Carolina por su infinito amor gracias por cumplir tu promesa.

Edisson Fernando Paredes Nacipucha

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Msc. Juan Carlos Avilés

PROFESOR EVALUADOR

.....
Msc. Felix Moncayo

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro 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"

.....
Bryan Alexander Sangucho Vivanco

.....
Edisson Fernando Paredes Nacipucha

RESUMEN

Actualmente los problemas de comunicación provocados por el retraso en una señal son muy comunes, por esto se pretende dar paso al estudio de las bandas milimétricas (e.g. banda de 28GHz) pero uno de los problemas en la utilización de algoritmos iterativos es la poca ganancia inicial presente al comienzo de la operación; esto hace que sea interesante estudiar y diseñar un entorno en donde se permita observar el comportamiento del algoritmo cuando la potencia de recepción disminuye.

Con la finalidad de entender cómo afecta el aumento de la distancia entre la base transmisora y receptora en la banda milimétrica, se utiliza el programa Matlab para simular el recorrido de un usuario que envía una señal por medio de una antena omnidireccional. Dicha señal es captada por un arreglo de 5 antenas en donde se implementa la técnica del formador de haz (beamforming) para focalizar la energía en la antena receptora basado en el algoritmo de mínimos cuadrados (LMS). El patrón de radiación formado ilumina a un usuario (antena transmisora) por medio del lóbulo principal para las diferentes posiciones que tome. Se considera un ambiente con pérdidas, razón por la cual se utiliza la ecuación de Friis (ecuación 3.2) para calcular la potencia de recepción a medida que el usuario se va alejando de la base receptora.

Basándonos en los resultados del algoritmo estudiado, se puede constatar que se requiere de un valor de ganancia grande (e.g. 100 dBm) para que el número de iteraciones que necesite el algoritmo al momento de su ejecución sea lo más mínimo, logrando así optimizar el algoritmo y poder iluminar un punto de interés con un enlace más robusto y confiable desde la estación base, minimizando así las pérdidas de potencia de recepción presentes en la banda de 28 GHz a medida que la antena transmisora se aleja de la estación base.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Descripción del Problema.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Resultados esperados.....	2
CAPÍTULO 2.....	3
2. ASPECTOR TEÓRICOS.....	3
2.1 Banda de 28GHz.....	3
2.2 Bandas milimétricas.....	3
2.3 Antena.....	3
2.3.1 Parámetros de una antena.....	4
2.3.2 Antena omnidireccional.....	5
2.3.3 Arreglo de antenas.....	5

2.3.4	Antenas inteligentes.	5
2.3.5	Arreglo lineal uniforme.	6
2.4	Beamforming.	6
2.5	Algoritmo LMS.	6
CAPÍTULO 3.		9
3.	METODOLOGÍA.	9
3.1	Configuración del escenario.	9
3.2	Parámetros de simulación.	9
3.3	Configuración del escenario.	10
3.4	Cálculo de potencia de recepción.	11
3.5	Funcionamiento del algoritmo en el escenario considerado.	11
3.6	Gráficas resultantes.	14
3.6.1	Gráficas de actualización de peso del arreglo.	14
3.6.2	Gráficas de patrón de radiación.	17
3.6.3	Gráficas de señal de salida.	17
3.6.4	Gráficas del error cuadrático medio.	18
BIBLIOGRAFÍA.		21
ANEXO.		22

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN.

En el mundo de las telecomunicaciones, existe gran demanda por utilizar bandas que permitan transmitir grandes cantidades de información, las cuales puedan llegar al usuario de una manera ágil y directa sin que le afecte los fenómenos naturales o algún fenómeno físico. Un ejemplo es la banda de 1.9GHz que cumple este propósito y logra cubrir la demanda de cobertura de los usuarios y sus requerimientos sin ningún problema por medio de antenas omnidireccionales en la base de recepción.

Las actualizaciones de software y hardware en el mundo de las comunicaciones inalámbricas dan pasos agigantados, por lo tanto, ya no solo hay que mejorar los equipos y diseñar antenas, sino que también hay que buscar nuevas bandas de frecuencia y abrirse al campo de las frecuencias más allá de 28Ghz.

Tomando en cuenta este argumento, hoy por hoy las bandas milimétricas llaman mucho la atención de las confraternidades de telecomunicaciones por su aplicación en el beamforming, logrando crear enlaces más robustos aprovechando las pérdidas de camino como un medio de retrasmisión de la señal evitando pérdidas significativas. De hecho, muchas empresas privadas y públicas están incursionando en el estudio de las bandas milimétricas para en un futuro lograr aprovechar su utilidad.

1.1 Planteamiento del Problema.

Al trabajar con bandas milimétricas, ya no se puede considerar una antena omnidireccional para la formación de un enlace ya que presentaría gran pérdida de la señal, como solución se considera un arreglo para formar una antena direccional y así radiar la máxima potencia en dirección del usuario.

1.2 Descripción del Problema.

El problema se basa en analizar el comportamiento del algoritmo de mínimos cuadrados considerando un escenario en donde su potencia de recepción va disminuyendo a medida que la distancia entre el usuario y la base receptora aumenta.

Mediante la simulación del algoritmo, se obtendrán las siguientes gráficas: gráfica del error cuadrático medio, patrón de radiación y gráfica del comportamiento del peso del arreglo, con la finalidad de conocer la relación que tiene la distancia y el número de iteraciones en la ejecución del algoritmo.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Analizar el algoritmo LMS en la banda de 28GHz, para determinar los efectos que tiene la distancia en los enlaces de comunicaciones inalámbricas usando beamforming.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Evidenciar como se ajusta la señal de salida respecto a la señal referencia a medida que aumenta la distancia entre el transmisor y receptor.
- Observar el comportamiento del peso del arreglo, a medida que el algoritmo aumenta el número de iteraciones.
- Analizar el comportamiento del algoritmo al variar la ganancia del arreglo de antenas.

1.4 Resultados esperados.

Con el análisis de este proyecto, se espera analizar la ejecución de un algoritmo iterativo para un rango de distancias comprendido entre 10 a 80 metros, y así poder profundizar en el estudio de las bandas milimétricas por medio de la técnica del beamforming y el uso de arreglo de antenas inteligentes.

CAPÍTULO 2

2. ASPECTOR TEÓRICOS.

La presente sección describe conceptos relacionados con la banda de 28 GHz. Además, define lo que es un arreglo de antenas y sus características junto a la formación del beamforming bajo la implementación del algoritmo LMS.

2.1 Banda de 28GHz.

Debido al avance de la tecnología, se han establecido nuevos requerimientos para la futura generación de redes inalámbricas, motivo por el cual, en los últimos tiempos se ha visto la necesidad de explorar nuevas regiones de investigación para el espectro de radio frecuencia. En virtud de esto, el estudio de la banda de 28GHz procura brindar más área de cobertura, por ende, las bandas milimétricas han llamado la atención de las fraternidades de investigación puesto que, al utilizarlas en las comunicaciones inalámbricas, brindan gran ventaja al momento de formar enlaces más robustos debido al gran ancho de banda de canal [1].

2.2 Bandas milimétricas.

Actualmente existen 3 frecuencias de interés por parte de los miembros de la Unión Internacional De Telecomunicaciones (UIT): 28 GHz, 39 GHz y 73GHz. De las cuales solo la banda de 28GHz ha mostrado un apoyo crucial por parte de investigadores para su estudio, es más, países como Estados Unidos, Corea y Japón se encuentran trabajando para mostrar las primeras impresiones de lo que sería el 5G. La ventaja que tiene esta banda respecto a las demás, es que funciona bien en entornos multicamino y puede implementarse en comunicaciones sin línea de vista [2].

2.3 Antena.

La telefonía móvil, transmisión de audio y video, comunicación satelital y bluetooth son algunas aplicaciones en donde se evidencia que la comunicación inalámbrica es una tecnología que está presente en todo el mundo. Para lograrlo

se necesita estudiar al elemento principal que permite que las ondas electromagnéticas viajen por el espacio. La antena es cualquier conductor eléctrico cuyo tamaño y forma le permita transmitir o captar ondas electromagnéticas en el espacio, sin importar el tipo de antena que sea, todas convierten las ondas electromagnéticas en voltajes para así radiar energía hacia un punto de interés mediante sus bordes externos [3] [4].

2.3.1 Parámetros de una antena.

Las antenas poseen una serie de parámetros, de los cuales se detallan los más frecuentes a continuación.

Diagrama de radiación.

Es la representación gráfica de energía radiada por una antena, particularmente dichas gráficas se las puede representar mediante una vista de perfil o mediante una vista superior. La manera más común en representar dichas gráficas es mediante una representación tridimensional que depende de la dirección angular de la señal [5] [6].

Polarización.

Al momento que se transmite una señal, la magnitud de onda al ser un vector, es muy importante que las antenas transmisora y receptora tengan la misma polaridad puesto que las ondas al salir de la antena cambian su orientación según como hayan sido polarizadas, sean estas de tipo lineal o circular. Cabe mencionar que el parámetro de la polarización es muy importante puesto que, si se quiere obtener un máximo rendimiento, las antenas deben tener la misma polaridad [7].

Ganancia.

Una antena que radia su energía de manera continua en todas las direcciones es conocida como una antena isotrópica, la relación de la potencia que entra y sale de la antena se la conoce como ganancia, en la práctica, una antena presentará zonas en donde se dirija su señal con poca o mucha intensidad, por este hecho es común que la ganancia se la mida tomando como referencia una antena isotrópica. La ganancia

de una antena es muy importante pues mientras mayor sea su valor, más receptiva se vuelve [8].

Directividad.

Es la habilidad que tiene una antena para enfocar la energía que se irradia en una dirección específica, por definición la directividad es la relación de la densidad de potencia radiada y la potencia que radiará la antena en una misma dirección con una antena isotrópica [9].

2.3.2 Antena omnidireccional.

Es un tipo de antena que, al emitir una señal, las ondas se dirigen en todas las direcciones logrando cubrir un área específica de manera eficiente, aunque no posee mucho alcance, según su forma puede concentrar mayor parte de su energía y abarcar áreas con gran directividad.

Gracias a su simple construcción, estas antenas proporcionan un patrón de radiación horizontal de 360 grados [10].

2.3.3 Arreglo de antenas.

Es el conjunto de una o más antenas simples ubicadas en una posición determinada con la finalidad de concentrar la máxima radiación de señal en una dirección deseada, dependiendo de cómo estén orientadas las antenas, las configuraciones más comunes son de tipo: lineal, circular o plana [11].

2.3.4 Antenas inteligentes.

Al hablar de “inteligencia” en una antena, se refiere a la manera como su sistema puede interactuar con el medio. Las antenas inteligentes son el conjunto de un arreglo de antenas que al manipular los elementos que conforman el arreglo por medio de excitaciones de voltaje, permite cambiar la orientación de las antenas para variar la forma del patrón de radiación en tiempo real [12].

Una de las maneras de conseguirlo, es mediante la técnica de haz adaptativo, una técnica de nivel alto de inteligencia que se puede aplicar en un arreglo de antenas.

2.3.5 Arreglo lineal uniforme.

Es un arreglo compuesto de varios elementos situados en línea recta, esta configuración permite que el arreglo lineal actúe como un filtro, dando paso a las señales orientadas en una dirección específica y a su vez rechazando toda señal que no esté direccionada.

2.4 Beamforming.

Existen tecnologías que ayudan a mejorar las transmisiones inalámbricas. El beamforming es una de ellas, logrando que una antena transmisora focalice su energía hacia el receptor aumentando la relación señal ruido (SNR) y la velocidad de transmisión, gracias a su versatilidad esta técnica puede implementarse en la antena receptora logrando una formación de enlaces más robustos gracias al manejo de arreglos de antenas que permiten modificar el patrón de radiación de manera dinámica, pues con las antenas simples el patrón de radiación es fijo [13].

2.5 Algoritmo LMS.

Con el objetivo de determinar o adaptar los pesos de un arreglo, el algoritmo LMS considera el error $e(k)$ de la señal de salida $y(k)$ entre la señal de entrada $s(k)$ y una señal referencia $d(k)$. Una vez transmitida la señal $s(k)$, a medida que esta va llegando al arreglo, la señal se convierte en un vector $x(k)$ que multiplica a un vector de pesos $w(k)$ mediante el cual se calcula la señal recibida, y esta señal se resta de la señal de salida $y(k)$. El algoritmo trabaja de manera iterativa y de esta manera el peso se va actualizando hasta encontrar su punto de estabilidad [14].

Mediante la figura 2.1 se explica el funcionamiento del LMS y la solución óptima de Wiener (w_{opt}) usada en el algoritmo.

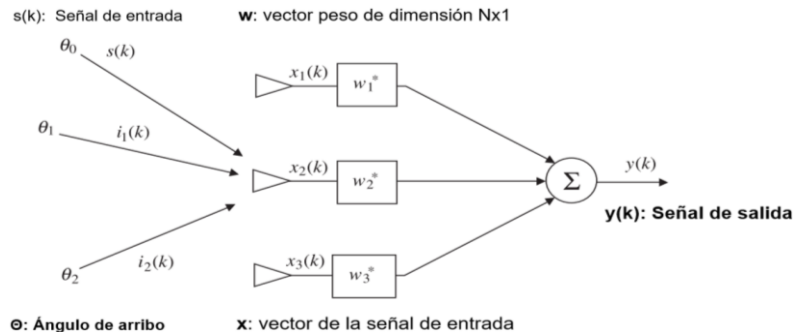


Figura 2.1: Gráfica de un arreglo de antena captando una señal $s(k)$ [14].

La señal de entrada $s(k)$ al llegar al arreglo de antenas se transforma en un vector $x(k)$ por medio de los retardos de fase que maneja el vector steering (V_s) para luego calcular la matriz de correlación (R_{xx}) de la señal de entrada por medio del valor esperado $E[x]$ del producto entre el vector $x(k)$ y su transpuesta $x(k)^t$ más la matriz de correlación del ruido gaussiano (R_{nn}) como se muestra en las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$x(k) = s(k) \cdot V_s \quad (2.1)$$

$$R_{xx} = E [x(k) \cdot x(k)^t] + R_{nn} \quad (2.2)$$

En la ecuación 2.3 se obtiene el error $e(k)$ de la señal de salida $y(k)$ del algoritmo mediante la diferencia entre la señal de referencia $d(k)$ y la transpuesta del peso del arreglo w^t y el vector $x(k)$.

$$e(k) = d(k) - w^t \cdot x(k) \quad (2.3)$$

La solución óptima de Wiener (w_{opt}) mostrada en la ecuación 2.4 es el producto de la inversa de la matriz de correlación ($R_{xx})^{-1}$ multiplicado por el ruido interno $r(k)$ de la señal de entrada $s(k)$.

$$w_{opt} = (R_{xx})^{-1} \cdot r(k) \quad (2.4)$$

Como se muestra en la ecuación 2.5 el ruido interno $r(k)$ es el resultado del valor esperado $E[x]$ de la multiplicación entre el vector $x(k)$ y la transpuesta de la señal de referencia $d(k)^t$.

$$r(k) = E [d(k)^t \cdot x(k)] \quad (2.5)$$

Se halla la constante de ajuste (μ) mediante el valor real de la traza de la matriz de correlación ($\text{tr } R_{xx}$) como se muestra en la ecuación 2.6.

$$\mu = \frac{1}{4 \cdot \text{real}(\text{tr } R_{xx})} \quad (2.6)$$

Finalmente, en la ecuación 2.7 se calcula el peso $w(k)$ del arreglo de manera iterativa, por ende, dicho valor se va actualizando mediante la diferencia entre peso actual del arreglo $w(k)'$ y el producto entre la constante de ajuste, el error de la señal de salida $e(k)$ y el vector $x(k)$.

$$w(k) = w(k)' - (\mu) \cdot e(k) \cdot x(k) \quad (2.7)$$

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA.

Teniendo en claro los conceptos de un arreglo lineal de antenas y conocer sobre la técnica del beamforming, se procedió a la implementación del algoritmo LMS para radiar la máxima señal de potencia a un usuario que se moverá en diferentes posiciones.

Se contará con un arreglo lineal de cinco antenas separadas $\lambda/2$, y una antena omnidireccional ubicada en el usuario que enviará una señal sinusoidal. Se ha considerado un escenario de análisis en donde el usuario se moverá en ocho posiciones diferentes para así analizar el comportamiento de la estabilidad del peso del arreglo a medida que la distancia de separación entre la base transmisora y receptora aumente.

Una vez establecidos los parámetros necesarios para la simulación, por medio de las gráficas resultantes se analizará de mejor manera como es el comportamiento del algoritmo al momento que el usuario va cambiando su posición.

La implementación y graficas del algoritmo empleado fue desarrollado y simulado en Matlab.

3.1 Configuración del escenario.

El ambiente que se está simulando cuenta con las siguientes características: las distancias de separación entre el usuario y la base receptora irán aumentado hasta un máximo de 80 metros, y la antena receptora captará un ángulo de arribo fijo de 30 grados.

3.2 Parámetros de simulación.

Al momento de ejecutar el algoritmo considerando el escenario propuesto, hay que tener en cuenta ciertos parámetros al momento de la simulación, los más relevantes son los detallados en la tabla 1.

Parámetros	Argumentos
Frecuencia de portadora (f_c)	28 GHz
$\lambda/2$	5.35 mm
Potencia de transmisión	30 dBm (*)
Ganancia de transmisión	0 dBi
Ganancia de recepción	7dBi
Número de posiciones	8
Número de arreglos de antenas	1
Número de elementos por arreglo	5

(*) Potencia grande debido a la ganancia pequeña de la antena de recepción.

Tabla 1: Parámetros de simulación.

3.3 Configuración del escenario.

Mediante el programa MATLAB se ejecutará el algoritmo LMS para analizar cómo se comporta su respuesta. El usuario equipado con una antena omnidireccional irradia una señal hacia al receptor variando su distancia respecto a la estación base. La distancia varía desde un valor inicial de 10 metros hasta un máximo de 80 metros.

El usuario se moverá en ocho posiciones diferentes, lugares donde la base receptora captará la señal del usuario y su respectivo ángulo de arribo. La figura 3.1 indica la ubicación espacial de la trayectoria del usuario.

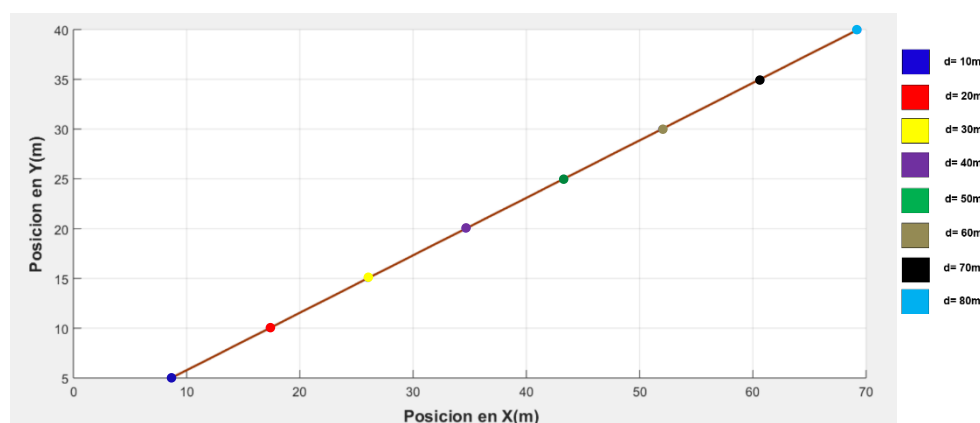


Figura 3.1: Ubicación del usuario respecto a la base receptora.

Una vez establecido los parámetros para la ejecución del algoritmo, al momento que el receptor capta una señal proveniente del usuario, este empieza a formar un vector de pesos para el arreglo lineal de antenas (ULA); para así ir actualizando sus valores a medida que avanza el número de iteraciones y poder iluminar al usuario con un patrón de irradiación.

3.4 Cálculo de potencia de recepción.

En la ecuación 3.1 se muestra el cálculo para hallar la pérdida de paso (Pl), la cual depende de la distancia del usuario (d) y la frecuencia λ .

$$Pl [db] = 20 * \log\left(\frac{4\pi \cdot (d)}{\lambda}\right) \quad (3.1)$$

La potencia de recepción (Pr) irá variando a medida que los pesos del algoritmo se van actualizando con cada iteración. Esta potencia depende de la potencia de transmisión (Pt), la ganancia del transmisor (Gt), la ganancia del receptor (Gr) y la pérdida de paso como se muestra en la ecuación 3.2 (ecuación de Friis).

$$Pr [db] = Pt + Gt + Gr - Pl \quad (3.2)$$

Se consideró un valor alto para la potencia del transmisor (80dBm), debido a que las ganancias de las antenas son bajas (menos de 0dBm). En condiciones normales se podría esperar una ganancia combinada de unos 40 dBm (100 antenas en cada lado del enlace).

La ganancia de recepción para cada iteración, será el punto máximo del patrón de radiación en la dirección de la línea que une la base transmisora con la base receptora. Una vez obtenida la ganancia de recepción, se calcula la potencia de recepción y dicho valor será utilizado para variar el valor de amplitud de la señal referencia $d(k)$.

3.5 Funcionamiento del algoritmo en el escenario considerado.

Al momento que el algoritmo empieza a iterar, esta forma un vector de pesos $w(k)$ que se irán actualizando. En cada iteración el patrón de radiación se vuelve cada vez más direccional, de tal manera que el algoritmo se estabiliza y el lóbulo principal del patrón de radiación presenta una máxima ganancia en la dirección

de interés. En la figura 3.2 mostrada a continuación se muestra las etapas de ejecución del algoritmo.

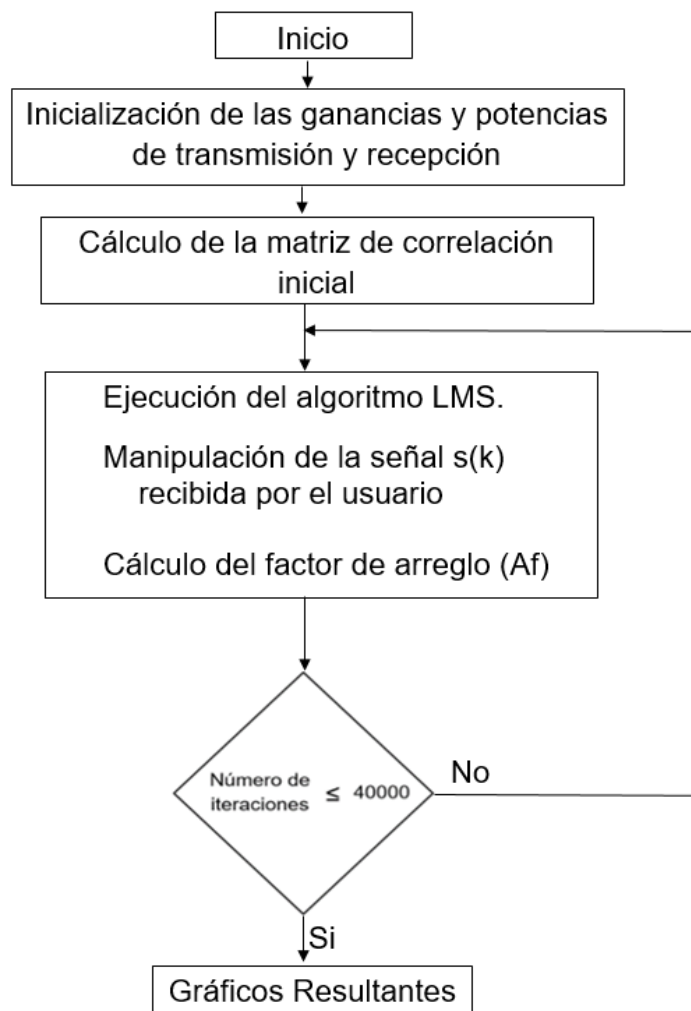


Figura 3.2: Ejecución del LMS.

Se inicializan las variables a trabajar y se establece los valores de: $G_t = 0$ dBm, $P_t = 30$ dBm y un vector V_s con un ángulo de 30° . La señal sinusoidal (S_n) será usada como señal de referencia para cada una de las distancias (d) que recorrerá el usuario. Se calcula la matriz de correlación inicial (R_{xx_0}) mediante el producto del vector V_s y su transpuesta (V_s^t) como se muestra en la ecuación 3.3, luego se halla la matriz de correlación (R_{xx}) por medio de la suma de R_{xx_0} y la matriz de correlación del ruido gaussiano (R_{nn}) tal como se muestra en la ecuación 3.4.

$$R_{xx_0} = V_s \cdot V_s^t \quad (3.3)$$

$$R_{xx} = R_{xx_0} + R_{nn} \quad (3.4)$$

La base receptora capta la señal $S(k)$ radiada por el usuario en dirección de la línea de transmisión, donde internamente el arreglo de antenas toma esta señal $S(k)$ y la multiplica por la raíz cuadrada de la potencia de recepción para manipularla como un vector $x(k)$ para así variar la amplitud de la señal $S(k)$ al momento de la formación del patrón de radiación tal como se muestra en la ecuación 3.5

$$x(k) = S(k) \sqrt{P_r} \quad (3.5)$$

Como se mencionó. El algoritmo al trabajar de manera iterativa busca siempre la estabilización del peso $w(k)$ del arreglo, para lograrlo, la señal de salida $y(k)$ que es el producto de la transpuesta del vector peso (w^t) con el vector $x(k)$ tal como se muestra en la ecuación 3.6 tendrá que ser comparada con la señal referencia $d(k)$. El error de la señal de salida $e(k)$ será resultado de la resta de la conjugada de la señal referencia $d(k)^*$ y la conjugada de la señal de salida $y(k)^*$ como se muestra en la ecuación 3.7

$$y(k) = w^t \cdot x(k) \quad (3.6)$$

$$e(k) = d(k)^* - y(k)^* \quad (3.7)$$

Al principio de la ejecución del algoritmo, al estar recién empezando a funcionar, se tendrá un porcentaje de error muy grande (mayor al 5%), así que por facilidad de cálculo se asignará el valor de 30° al ángulo de arribo para no tener un error inicial presente al momento de ejecutar el algoritmo.

El peso de la antena ira actualizando sus valores a medida que se desarrolla el algoritmo y se ira calculando el factor de arreglo (A_f) para de esta manera hallar el valor de la potencia de recepción en cada iteración. Este proceso se realiza de manera iterativa para cada nueva posición del usuario por lo que el algoritmo acaba su procedimiento una vez que llega a 70000 iteraciones.

Gráficas resultantes.

3.5.1 Gráficas de actualización de peso del arreglo.

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento de uno de los vectores de la matriz peso $w(k)$ para las cuatro primeras distancias que recorrió el usuario respecto a la base receptora comprendidas entre 10 y 40 metros respectivamente.

Cabe mencionar que se considera solo una gráfica de la matriz del vector peso $w(k)$, puesto que el resto de pesos del arreglo varia de forma similar.

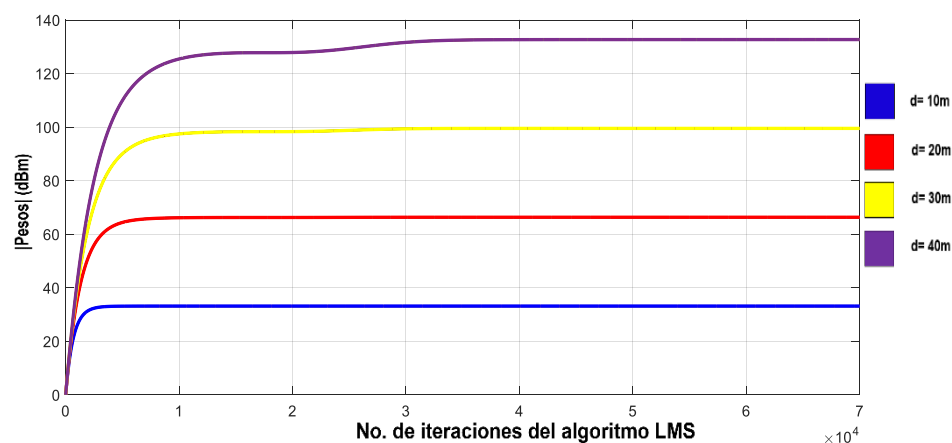


Figura 3.3: Gráfica del peso $w(k)$ vs No. de iteraciones para las cuatro primeras posiciones del usuario.

Para el rango de distancias comprendidas entre 10 a 30 metros, se observa que el peso de la antena se estabiliza a partir de 5000 iteraciones con valores entre 30 a 70dBm respectivamente, pero para la distancia de 40m este valor se estabiliza a partir de 30000 iteraciones con 130dBm.

En la figura 3.4 se muestran ahora las distancias recorridas por el usuario entre 50 a 80 metros respectivamente.

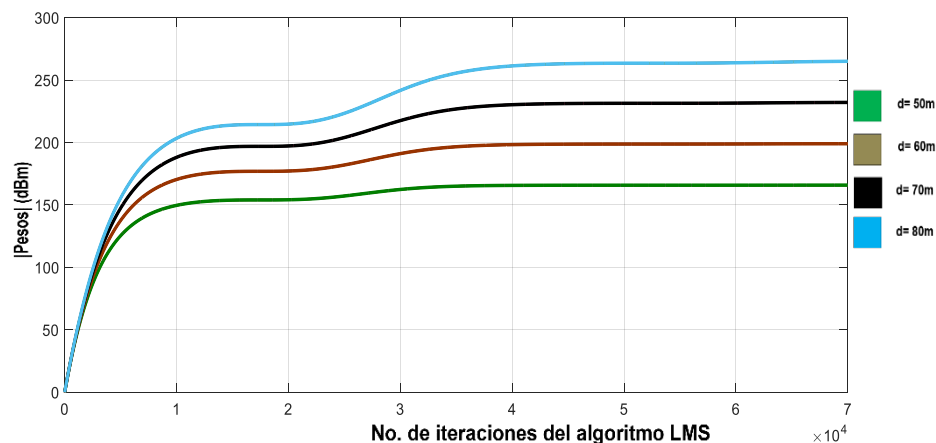


Figura 3.4: Gráfica del peso $w(k)$ vs número de iteraciones para las cuatro últimas posiciones del usuario.

Se observa que los rangos de distancias comprendidos entre 50 a 80 metros, el número de iteraciones que requiere el algoritmo LMS para estabilizar los pesos del arreglo ULA aumenta, comenzando por: 150dBm para 50m de distancia con 33000 iteraciones hasta un valor de 270dBm para 80m de distancia con 40000 iteraciones. En la figura 3.5 se muestra cada una de las gráficas del peso $w(k)$ para las diferentes ubicaciones del usuario, donde se puede observar de manera más detallada como el peso se va estabilizando conforme el número de iteraciones aumenta.

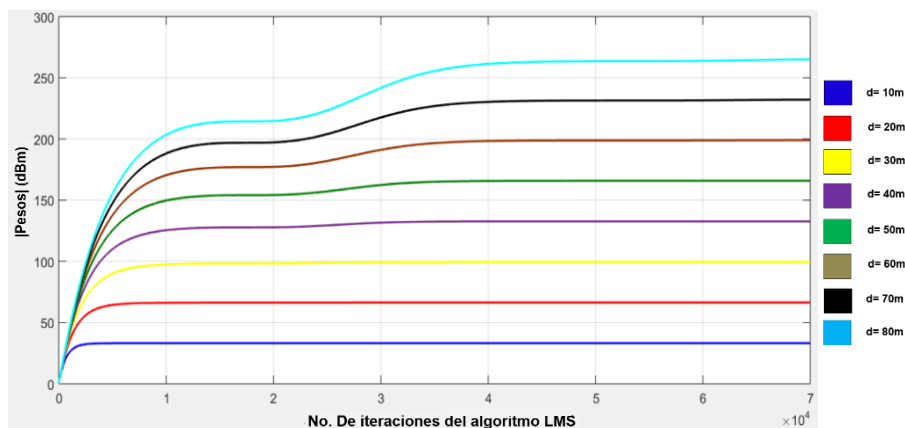
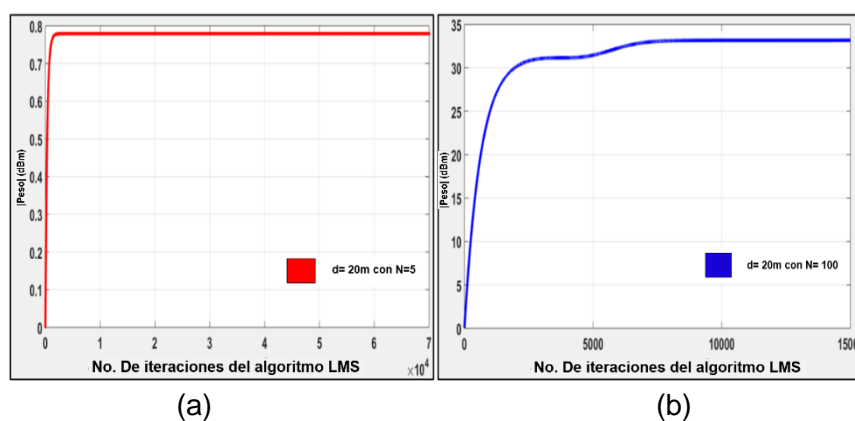


Figura 3.5 Gráfica del peso $w(k)$ vs No. de iteraciones para las ocho posiciones del usuario.

Como se puede observar de una manera más detallada, el peso $w(k)$ del arreglo necesita de un mayor número de iteraciones a medida que

aumenta la distancia del usuario respecto a la base receptora para estabilizarse.

Considerando el hecho que al aumentar la distancia entre el transmisor (Tx) y receptor (Rx) el número de iteraciones crece significativamente, se optó por trabajar con un número de antenas mayor a 5, donde la señal $s(k)$ se vea afectada por la presencia del ruido gaussiano. De esta manera se realizaron dos gráficas del comportamiento del peso del arreglo donde se aumentó el número de antenas ($N=100$) para una de las distancias del usuario (20m) a fin de observar que pasa con la estabilidad del peso $w(k)$ y el número de iteraciones.



**Figura 3.6 Gráfica de peso $w(k)$ vs No. de iteraciones para $d=20m$.
(a) $N=5$ antenas sin ruido en $s(K)$
(b) $N=100$ antenas más ruido gaussiano en $s(k)$**

Como se esperó, en la figura 3.6 (a) al aumentar el número de antenas, el peso del arreglo se estabiliza a un menor número de iteraciones, pasando de 13000 iteraciones con un valor de 33dBm a 3000 iteraciones con un valor de 0.78dBm debido a que se trabajó con un valor más grande de ganancia (40dBm) por el aumento del número de antenas.

Al considerar el ruido gaussiano en la ejecución del algoritmo en la figura 3.6 (b) se evidencio que el número de iteraciones aumentó su valor de 3000 a 8000 iteraciones con un valor de 33dB para encontrar la estabilidad del vector peso $w(k)$. Por tal motivo es mejor no considerar el ruido gaussiano a la entrada $S(k)$ puesto que el algoritmo se tornaría ineficiente

ya que necesitaría un mayor número de iteraciones (8000) para el arranque inicial del algoritmo y además la potencia de recepción P_r que llegaría al arreglo de antenas sería muy baja (0dB) e implicaría que el valor μ sea diferente a 0.8 al momento de calcular la matriz de correlación R_{xx} de la ecuación 3.4.

Se debe indicar, que se asume que el nivel de ruido no cambia durante las iteraciones del algoritmo.

3.5.2 Gráficas de patrón de radiación.

Una vez estabilizada la gráfica del vector peso $w(k)$, se muestra la gráfica del patrón de radiación donde el receptor R_x ilumina al usuario. Cabe mencionar que se considera solo una gráfica del patrón de radiación, puesto que el resto de gráficas varía de forma similar.

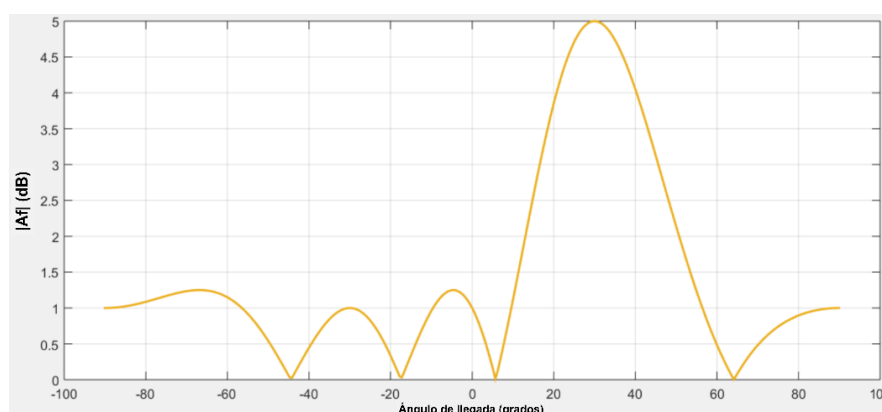


Figura 3.7 Gráfica del patrón de radiación vs ángulo de llegada.

En la gráfica 3.7 se muestra el patrón de radiación formado por el ULA que ilumina al usuario a una intensidad de 5dB con un ángulo de 30° .

3.5.3 Gráficas de señal de salida.

Una vez que el algoritmo termino su proceso, se muestra la gráfica de la señal de salida versus el número de iteraciones para todas las posiciones del usuario.

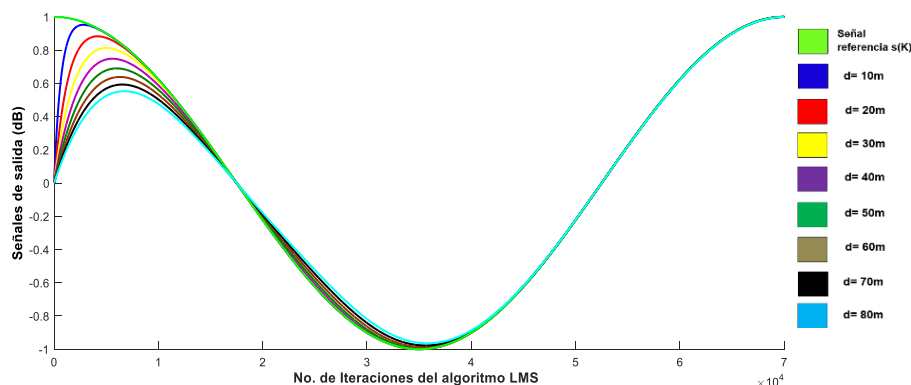


Figura 3.8 Gráfica de la señal de salida vs No. de iteraciones para las ocho posiciones del usuario

En la figura 3.8 Se observa como la señal de salida $y(k)$ cambia; a una distancia corta (10m) la señal de salida se parece más a la señal referencia $s(k)$ ya que su amplitud es cercana a 1dB, pero a medida que la distancia aumenta (80m), tal similitud disminuye.

3.5.4 Gráficas del error cuadrático medio.

A continuación, se muestra las gráficas del comportamiento del error $e(k)$ de la señal de salida $y(k)$ para cada una de las posiciones del usuario.

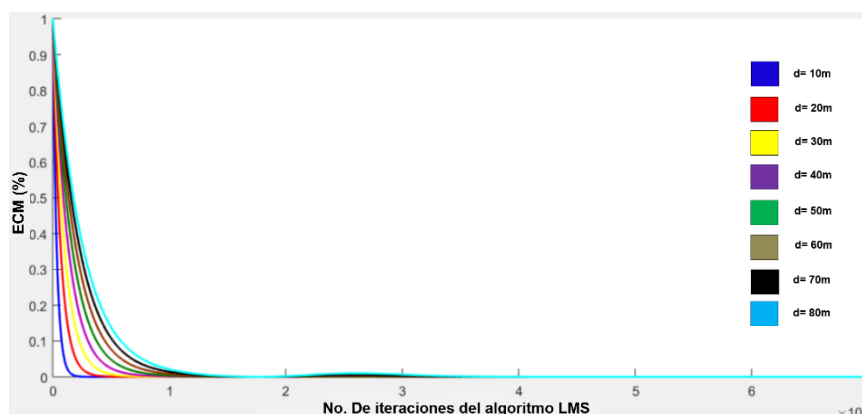


Figura 3.9 Gráfica de error cuadrático medio.

En la figura 3.9 se muestra el comportamiento del error cuadrático medio (ECM) para el rango de distancias comprendidas entre 10 a 80 metros de separación respecto a la base receptora del usuario en donde se observa que las gráficas decrecen a medida que aumenta el número de iteraciones hasta que se estabilizan con un valor del 0% de error, para la distancia de

10 metros el error se estabiliza en 5000 iteraciones y a medida que la distancia aumenta la gráfica decrece de manera más lenta a un mayor número de iteraciones, por ejemplo, para una distancia de 80 metros el error se estabiliza en 40000 iteraciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La intensidad de potencia de recepción disminuye en consecuencia del aumento de distancia del usuario respecto al receptor.

El algoritmo necesita de un mayor número de iteraciones a medida que el usuario se va alejando del receptor puesto que al disminuir la potencia de recepción aumenta el error entre la señal original y la calculada por el algoritmo.

A medida que el usuario se va alejando de la estación base, la pérdida de potencia de recepción es cada vez más grande. Si la antena del usuario fuera muy direccional (e.g. 20 dBm de ganancia), el número de iteraciones se reduciría drásticamente.

Las pérdidas a 28GHz son realmente grandes con la distancia, por consecuencia la potencia de recepción del ULA es baja. Una solución para este problema es considerar como mínimo un número de 100 antenas para reducir drásticamente el número de iteraciones para la ejecución del algoritmo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Shajahan, "Beamforming for Milimeter Wave Communications: An inclusive Survey," 2016.
- [2] J. Kirmery, "El espectro mmWave abre el 5G" - Revista Española de Electrónica, ISSN 0482-6396, N° 739, pp. 80-82, marzo 2016.
- [3] Universitat Politècnica de València - UPV, *Antenas radioaficionado. Fundamentos 1ª parte: Definición de Antena | Curso Antenas (6-7) | UPV*. 2011.
- [4] J. Anguera and A. Pérez, *Teoría de antenas*, 1st ed. Barcelona: Luís Vicent, 2008.
- [5] M. Ferrando and A. Valero, *Parámetros de antenas*. Valencia, 2017.
- [6] F. Pimentel, "Tipos de Antenas y Funcionamiento", *Wni.mx*. [Online]. Disponible en: http://wni.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=62:antenasosporte&catid=31:general&Itemid=7. [Accessed: 22- Oct- 2017].
- [7] F. Curotto, S. Espinosa and M. Vergara, "Antenas, Polarización y Diagramas de Radiación", Santiago, 2012.
- [8] 2013. [Online]. Disponible en: <http://hamtennas.com/docs/Ganancia.pdf>. [Accessed: 22- Oct- 2017].
- [9] E. Monachesi, A. Frenzel, G. Chaile, A. Carrasco and F. Gómez, *Efecto de la Foresta en las Transmisiones electromagnéticas dentro de una WLAN (LAN inalámbrica)*, 1st ed. Tucumán: edUTecNe, 2011.
- [10] 2016. [Online]. Disponible en: <https://goo.gl/zagkcd>. [Accessed: 22- Oct- 2017].
- [11] M. Martín, P. Contreras and M. Díaz, "Presentación Arreglo de Antenas", *Es.slideshare.net*, 2011. [Online]. Disponible en: https://es.slideshare.net/Antenas_propagacion/presentacin-arreglo-de-antenas. [Accessed: 21- Oct- 2017].
- [12] J. Alvarez and M. Chuez, "Implementaciones en Matlab de los Algoritmos Adaptativos para los Sistemas de Antenas Inteligentes", 2011.
- [13] M. Jaramillo, "Estudio de las técnicas de Beamforming en el estándar 802.11ac", Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2015.
- [14] F. Gross, *Smart Antennas for Wireless Communications*. Virginia: McGraw Hill, 2017.

ANEXO

ABREVIATURAS

UIT	Unión Internacional De Telecomunicaciones.
ULA	Arreglo lineal uniforme.
ECM	Error cuadrático medio.
LMS	Algoritmo de mínimos cuadrados.
BEAMFORMING	Técnica de formador de haz.
SNR	Relación señal ruido.
MU	Constante de ajuste del algoritmo LMS.
Tx	Antena transmisora.
Rx	Antena receptora.
dBm	Decibelio-milivatio.
dB	Decibelio.