



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

“IMPLEMENTACIÓN DE UN ESQUEMA DE  
MITIGACIÓN DE INTERFERENCIA EN ENLACES CON  
LÍNEA DE VISTA (LOS) EN LA BANDA DE 28 GHZ”

**INFORME DE MATERIA INTEGRADORA**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

CHRISTIAN LEONARDO CÁRDENAS ARIAS

KEVIN EFREN ARTEAGA YELA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

## AGRADECIMIENTOS

Nuestros sinceros agradecimientos al Msc. Juan Carlos Avilés Castillo y Ph.D. Germán Ricardo Vargas López.

Gracias a Dios y a la Virgen del Cisne por brindarme la oportunidad de finalizar una de mis metas forjadas en la vida, y a mis padres por el apoyo incondicional que me han dado, pues son el pilar fundamental para lograr lo que soy y he alcanzado. Gracias por los sacrificios y esfuerzos que han realizado para formar una persona de bien.

Gracias a mis profesores por formarme día a día como profesional y a la vez inculcarme valores de ética y moral para ser una persona de bien, estos valores que fueron y son importantes para mí.

Gracias a mi pareja y amigos quienes han estado en este proceso brindando su apoyo y ayuda en lo personal y profesional.

Christian Leonardo Cárdenas Arias.

## DEDICATORIA

A mis padres Efrén y María, a mi hermana Ariana, mi tía Luisa y toda mi familia por su apoyo y estímulo durante estos años de estudio. A mi esposa e hija por su lealtad, amor y paciencia durante esta secuencia de retos.

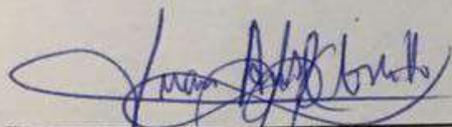
Kevin Efrén Arteaga Yela

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Olimpo Cárdenas y Noemí Arias, a mi hermana Viviana, quienes han sido mi guía, mi inspiración, mi apoyo, y fortaleza.

Día a día pedía a Dios la oportunidad para poder alcanzar esta meta, compartirla, dedicársela y decir que sus esfuerzos jamás fueron ni serán en vano.

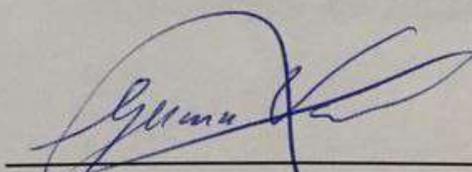
Christian Leonardo Cárdenas Arias

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



---

**Juan Carlos Ávilés Castillo Msc.**  
PROFESOR EVALUADOR

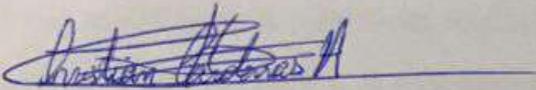


---

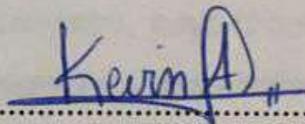
**Germán Ricardo Vargas López Ph.D.**  
PROFESOR EVALUADOR

## 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"



.....  
**CHRISTIAN CARDENAS ARIAS**



.....  
**KEVIN EFREN ARTEAGA YELA**

## RESUMEN

La interferencia es un factor clave en el diseño de redes de comunicaciones móviles. En este trabajo se realiza el estudio de su efecto entre múltiples haces directivos de antenas que sirven simultáneamente a un grupo definido de usuarios, ubicados en un área de cobertura con un radio máximo de 200 metros en la banda de 28GHz.

Para cumplir el objetivo se estudia el efecto de potencias no deseadas utilizando dos métodos. En el primero, se obtiene el valor de la relación de señal a interferencia más ruido (SINR) directamente mediante simulación, calculando la potencia no deseada, esto es, midiendo la potencia recibida de lóbulos laterales, cuyo lóbulo principal está dirigido a otros usuarios. En el segundo, se implementa un desarrollo matemático de un estudio ya realizado, con el cual nuevamente se determina mediante simulación el valor de SINR, calculando la potencia no deseada a través de la técnica de forzamiento a cero (zero forcing). Finalmente, se propone un algoritmo que reduce las emisiones no deseadas usando una combinación de recurso espacio-tiempo; se determina que el algoritmo propuesto permite un potencial beneficio de 6.81dB comparado con una medición de SINR sin ningún procesamiento.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN .....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
CAPÍTULO 1 .....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Problemática.....	3
1.3 Justificación .....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Generales.....	4
1.4.2 Específicos .....	4
1.5 Metodología.....	4
1.6 Alcance.....	5
CAPÍTULO 2.....	6
2. ASPECTOS TÉCNICOS.....	6
2.1 Antena .....	6
2.2 Arreglo Lineal Uniforme .....	7

2.3	Beamforming .....	9
2.4	Bandwidth.....	10
2.5	Línea de vista .....	10
2.6	Radioenlace.....	11
	2.6.1 Potencia de transmisión .....	11
	2.6.2 Path Loss.....	12
	2.6.3 Sensibilidad del receptor .....	12
2.7	Interferencia.....	12
2.8	Ruido .....	13
2.9	SINR.....	13
2.10	Zero Forcing.....	14
CAPÍTULO 3.....		15
3.	METODOLOGÍA.....	15
3.1	Parámetros de simulación .....	15
3.2	Modelo referencia.....	16
	3.2.1 Formación de haz con arreglos lineales uniformes .....	16
	3.2.2 Creación de usuarios.....	18
	3.2.3 Potencia de trasmisión, recepción y pérdida de camino... 18	
3.3	Diagrama de flujo modelo referencia.....	21
3.4	Modelo matemático .....	22
	3.4.1 Algoritmo del modelo matemático .....	23
3.5	Múltiples beams por grupos de usuarios .....	24
	3.5.1 Sectorización .....	24
	3.5.2 Calculo de potencias de transmisión y recepción.....	27

3.5.3 Algoritmo del modelo sectorizado.....	28
CAPITULO 4.....	29
4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN .....	29
4.1 Análisis de valores de SINR .....	29
4.2 Curvas de función de distribución acumulada .....	31
4.3 Capacidad .....	34
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	36
BIBLIOGRAFÍA.....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Interferencia de un patrón de radiación de un ULA sobre otro. ....	3
Figura 2.1: Diferentes antenas de estación de base.....	7
Figura 2.2: Patrón de Radiación de un ULA de 7 elementos.....	8
Figura 2.3: Beamforming con 2 usuarios y 4 antenas.....	9
Figura 2.4: Bandwidth de una señal.....	10
Figura 2.5: Interferencia entre dos usuarios.....	13
Figura 3.1: Arreglo uniforme lineal con 30 elementos.....	17
Figura 3.2: Patrón de haz de un arreglo lineal uniforme.....	17
Figura 3.3: Patrón de haz de un arreglo lineal uniforme a -12 grados.....	18
Figura 3.4: Esquema general.....	19
Figura 3.5: Esquema Referencial.....	21
Figura 3.6: Esquema Matemático.....	23
Figura 3.7: División por grupos de usuarios en el área de servicio.....	25
Figura 3.8: Grupo de usuarios A en una representación en forma polar de sus ULA's a una frecuencia de 28GHz.....	26
Figura 3.9: Grupo de usuarios B en una representación en forma polar de sus ULA's a una frecuencia de 28GHz.....	26
Figura 3.10: Esquema Sectorizado.....	28
Figura 4.1: Mediciones de SINR para el modelo referencia.....	30
Figura 4.2: Mediciones de SINR para el modelo Zero Forcing.....	30
Figura 4.3: Mediciones de SINR para el modelo Múltiples por Grupos de Usuarios.....	30
Figura 4.4: Distribución SINR para una red con 30 usuarios de los tres modelos implementados.....	32
Figura 4.5: Distribución potencias interferentes para una red con 30 usuarios de los modelos implementados.....	33

Figura 4.6: Distribución SINR para una red con 30 usuarios con 30, 40, 50 y 60 elementos del ULA.....	34
Figura 4.7: SINR versus rendimiento del modelo propuesto.....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potencia de transmisión de una tarjeta inalámbrica IEEE 802.11a/b típica .....	11
Tabla 2: Parámetros de simulación.....	16
Tabla 3: Intervalo angular por grupo de usuario .....	24
Tabla 4: Tabla Media y desviación estándar de SINR .....	31

# CAPÍTULO 1

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

### 1.1 Antecedentes

El crecimiento acelerado del uso de dispositivos móviles inteligentes ha originado un aumento excesivo en el ancho de banda móvil. Millares de aplicaciones con alto consumo de ancho de banda, como la transmisión de video en alta definición y la transferencia de archivos multimedia, están provocando que las redes celulares actuales se enfrenten a una demanda de capacidad abrumadora. El video es la principal fuente de tráfico de datos y se pronostica que se incremente a 67% en el año 2017 [1].

Actualmente, para satisfacer el incremento en la demanda de ancho de banda, los sistemas de comunicación inalámbrica de cuarta generación (4G LTE) están siendo desplegados en todo el mundo. 4G LTE fue diseñado para cumplir con los requerimientos de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales Avanzadas (IMT-A por sus siglas en inglés) emitidos por la UIT-R de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en el año 2008. Los sistemas 4G pueden soportar tasas de datos pico de 1Gbps en movilidad baja y 100 Mbps en movilidad alta [2] y se espera que el número de suscriptores alcance los 1.36 billones a fines del 2018 [3]. En Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) publicó la cantidad de líneas activas por operador y tecnología LTE en el cual se observa un total de 2,246,814 de suscriptores en noviembre del 2016 [2].

A pesar de la alta tasa de datos de la tecnología celular actual, varios trabajos de investigación coinciden en que nuevas aplicaciones con videos de alta definición completa (Full HD) y ultra HD (UHD), contenido de video 3D, videojuegos, realidad aumentada, e-health, voz sobre IP (VoIP) no podrán ser soportadas por las redes celulares debido al aumento de 1000 veces su capacidad y con una velocidad de datos pico de 10 Gbps por enlace inalámbrico para el 2020 [3].

Estos nuevos retos en las comunicaciones móviles han despertado el interés de la industria y de los investigadores en la nueva generación de telefonía móvil en el mundo, 5G. Actualmente la UIT no ha emitido un documento oficial sobre las especificaciones y definiciones de las redes 5G, sin embargo, este organismo ya se encuentra desarrollando la norma IMT-2020 [4].

La quinta generación de sistemas celulares operará en la banda de frecuencias de ondas milimétricas (mm-wave) de 10-300GHz que cuenta con un amplio espectro disponible y de poco uso. De esta manera se aumenta las bandas del espectro radioeléctrico para las comunicaciones inalámbricas de 700 MHz a 2.6 GHz que actualmente se encuentran saturadas. Las frecuencias portadoras mm-wave permiten una asignación de ancho de banda mucho mayor que los canales existentes de 20 MHz para los usuarios de LTE-4G, en efecto, la velocidad de datos también aumenta considerablemente mientras que la latencia para el tráfico digital disminuye y el acceso a internet se mejora [5].

Las bandas de frecuencia 28-30GHz, 38 GHz, 60GHz, 71-76GHz, 81-86 GHz y 92-95 GHz son utilizados para diversos estudios y pruebas de simulaciones en diferentes entornos con línea de vista o sin línea de vista, al parecer, son las bandas más prometedoras [6].

La propagación en ondas milimétricas no es muy diferente a las actuales ondas microondas, puesto que, mediciones indican que estas frecuencias presentan características generales similares, esto es pérdida de trayectoria en función de la distancia y posibilidad de comunicación con línea de vista.

En comparación, varios trabajos de investigación coinciden que los arreglos de antenas son características claves en sistemas de ondas milimétricas y que arreglos adaptativos con haces estrechos reducen el impacto de la interferencia.

## 1.2 Problemática

El patrón de radiación generado al iluminar a un usuario contiene lóbulos laterales que interfieren la señal recibida por otro equipo. Se define como interferencia a la potencia recibida por el equipo de usuario desde otros haces direccionados a usuarios diferentes.

En la Figura 1.1 se muestra que el lóbulo principal del ULA de color azul se dirige a un usuario ubicado a un ángulo de  $-18$  grados y el lóbulo principal naranja a un ángulo de  $18$  grados, mostrando como los lóbulos laterales de cada ULA interfieren con el otro.

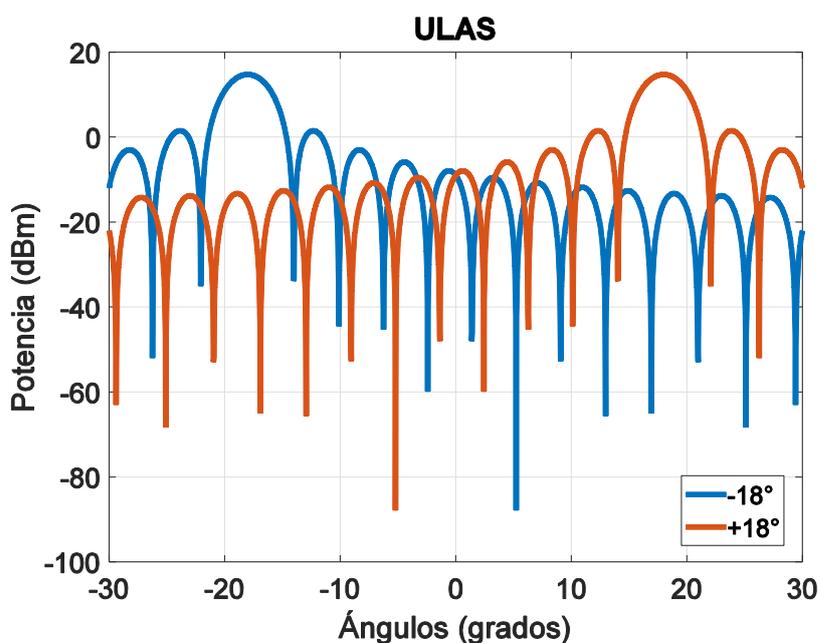


Figura 1.1: Interferencia de un patrón de radiación de un ULA sobre otro.

## 1.3 Justificación

El uso de múltiples antenas de transmisión y recepción proveen alta eficiencia espectral y rentabilidad para comunicaciones punto a punto en entornos de desvanecimiento.

Los diseños de sistemas en comunicaciones deben de proveer una alta tasa de datos, que se relaciona con una capacidad de canal, minimizando la probabilidad

de error y resolviendo problemas reales tales como el consumo de batería de los terminales, minimizar el ancho de banda usado y la potencia de transmisión requerida traducido en relaciones de potencia señal ruido.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Generales**

Implementar un algoritmo que reduzca la interferencia entre beams en enlaces con línea de vista en la banda de 28 GHz.

### **1.4.2 Específicos**

Estudiar el efecto de la interferencia que se produce en un sistema que consta de un transmisor que ilumina independientemente a un número de usuarios ubicados aleatoriamente en un área de servicio.

Calcular la interferencia máxima que recibe los usuarios iluminando a cada uno con un ULA diferente.

Implementar un modelo matemático para reducir la interferencia en los usuarios bajo el esquema zero forcing.

Implementar una solución que reduzca la interferencia aislando sectores.

## **1.5 Metodología**

Para estudiar y proponer una solución que reduzca la interferencia se desarrolló el siguiente procedimiento:

- 1) Crea el área de servicio en donde se ubican una cantidad finita de equipos de usuarios.
- 2) Se crea un arreglo lineal de antenas con N elementos el cual genera el patrón de radiación definido con cierto ancho de haz.
- 3) Se utiliza varias ULA's para la iluminación de los equipos de usuarios. Debido a que se conoce la ubicación (distancia y ángulo) de cada usuario, se asigna una ULA para cada usuario respectivamente. Este método permite calcular la potencia de recepción deseada para un usuario y las potencias que ocasionan interferencia a este, debido a señales dedicadas a otros usuarios.

- 4) Se calcula el SINR para cada usuario. Este procedimiento se repite 500 veces obteniendo una gran cantidad de valores de SINR, los mismos que se utilizan para realizar un gráfico estadístico que permite analizar el efecto de la interferencia y además verificar que el sistema propuesto reduce la interferencia.

## **1.6 Alcance**

El proyecto en desarrollo tiene como alcance estudiar el efecto de la interferencia entre múltiples beams en la banda de 28GHz y a partir de esta información implementar un algoritmo que mitigue la interferencia ocasionada por este problema en un entorno idealizado en donde los usuarios son ubicados aleatoriamente en el área de servicio, teniendo línea de vista respecto a la estación de base y su posición fija (no hay movilidad entre ellos).

La SINR se calcula utilizando la ecuación de Friss para espacio libre, la pérdida de camino, las ganancias de las antenas de transmisión y recepción y la potencia de transmisión junto con el ruido térmico correspondiente a la frecuencia de operación. En este estudio no se incluye las pérdidas por conectores y otras consideraciones que se consideran en presupuestos de enlaces más sofisticados.

Así mismo, no se incluyen técnicas de modulación para canalizar la información hacia los usuarios como OFDM, TDMA, etc.

## CAPÍTULO 2

### 2. ASPECTOS TÉCNICOS

Tomando en consideración lo expuesto en el capítulo I sobre la problemática que causa la interferencia al propagar el patrón de irradiación con los otros usuarios ubicados en el rango de cobertura. Es fundamental conocer los conceptos básicos que posteriormente van a permitir desarrollar este proyecto.

#### 2.1 Antena

Es un dispositivo de material conductor que tiene como objetivo emitir y recibir ondas electromagnéticas guiadas en un medio, usualmente en espacio libre. Las antenas funcionan como transductores en los sistemas de comunicación; convierten la energía eléctrica de las ondas electromagnéticas en señales usadas en los radioenlaces [7].

Existen antenas no directivas que se utilizan para emisión de radio comercial o estaciones móviles y directivas que se usa para canalizar la potencia en una dirección específica y no interferir con otros usuarios. En la Figura 2.1, se puede observar los diferentes tipos de antenas de comunicación, instaladas en una estación base.



Figura 2.1: Diferentes antenas de estación de base

## 2.2 Arreglo Lineal Uniforme

En general, los arreglos de antenas o también llamados arreglos son usados para obtener alta directividad, haces angostos, lóbulos laterales bajos, haces dirigibles, patrones con ciertas características, etc., [8].

Dentro del estudio de arreglos, los arreglos lineales ocupan una sección importante en la teoría de arreglos. Un arreglo uniforme lineal (ULA) es un conjunto de elementos idénticos uniformemente espaciados de igual magnitud con fase progresiva de elemento a elemento [9].

El patrón de radiación de los arreglos de antenas puede ser estudiado usando:

$$\text{Patrón de arreglo} = \text{Patrón de elemento del arreglo} * \text{Factor de Arreglo (AF)} \quad (2.1)$$

Asumiendo que los elementos del arreglo son idénticos, el AF no depende del tipo de antena. Para reducir la complejidad del cálculo del patrón de arreglo, se puede utilizar radiadores isotrópicos. La ecuación de un radiador isotrópico localizado en el origen puede ser escrito como:

$$E_{\theta} = I_0 \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (2.2)$$

El factor de arreglo de un ULA a lo largo del eje Z, con espacio entre elementos  $d$ , se presenta en la siguiente ecuación:

$$AF = \sum_{n=1}^N I_n \exp(j(n-1)kdcos\theta) \quad (2.3)$$

En la Figura 2.2 se muestra un arreglo lineal uniforme de 7 elementos, separados una distancia  $d$  entre ellos, generando un lóbulo principal a 0 grados.

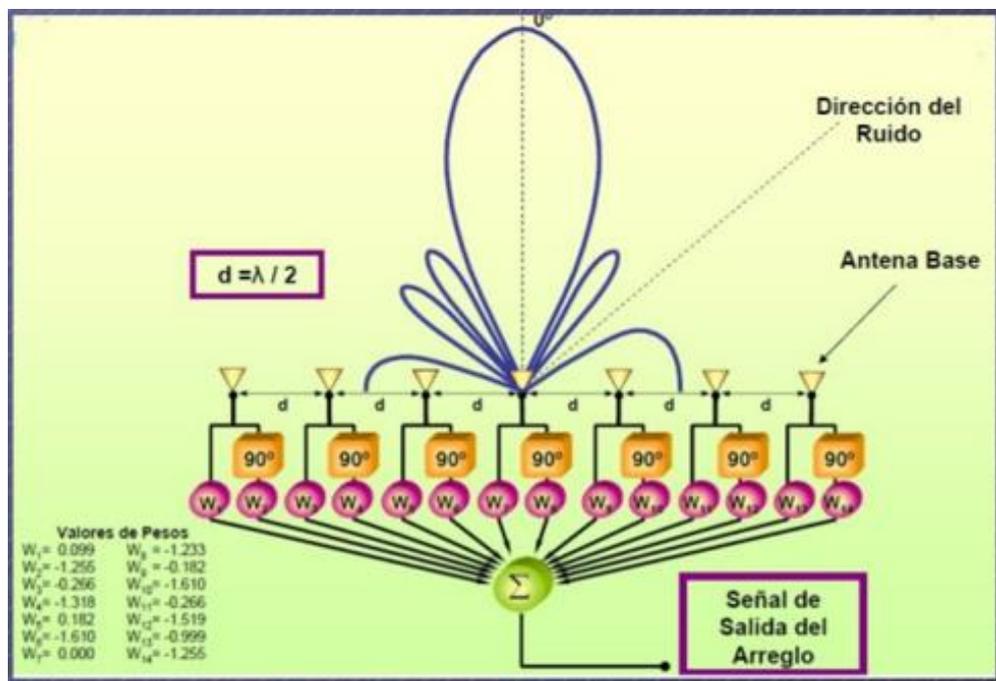


Figura 2.2: Patrón de Radiación de un ULA de 7 elementos

## 2.3 Beamforming

Beamforming es una técnica de procesamiento de señales usado en arreglos de antenas para transmisión o recepción direccional [10]. En el lado del transmisor, se requiere información del canal de comunicaciones para optimizar la iluminación del usuario [11].

Beamforming se puede utilizar para la radio o las ondas de sonido. Se han encontrado numerosas aplicaciones en radar, sonar, sismología, comunicaciones inalámbricas, radioastronomía, acústica y biomedicina. La formación de haz adaptativo se utiliza para detectar y estimar la señal de interés en la salida de un conjunto de sensores mediante óptimo (por ejemplo, por mínimos cuadrados) filtrado espacial y rechazo de interferencias [12].

En la Figura 2.3 se tiene un arreglo de 4 antenas, que forman dos haces, los mismos que dirigen su haz principal en dirección a los usuarios respectivamente.

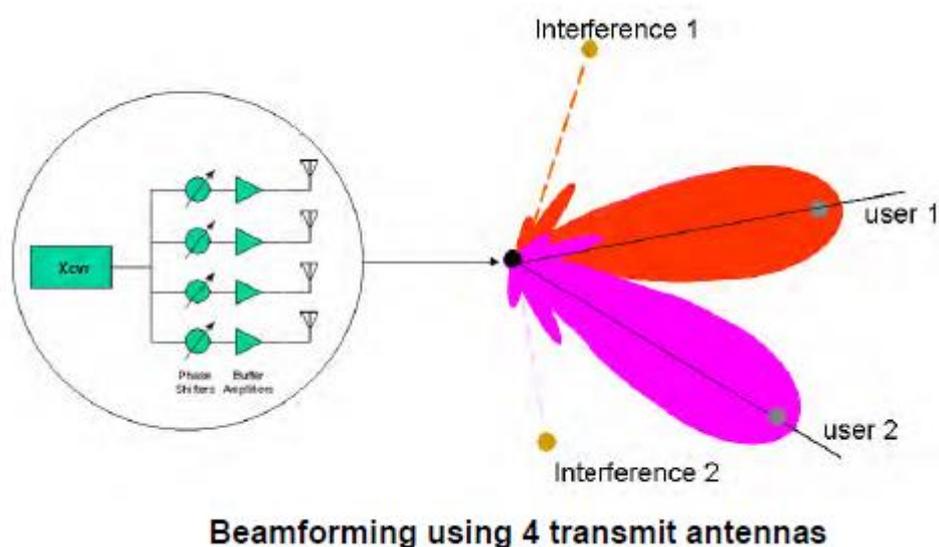


Figura 2.3: Beamforming con 2 usuarios y 4 antenas

## 2.4 Bandwidth

El ancho de banda (bandwidth) de una señal en función de la frecuencia, es representado con un valor distinto de cero y se calcula normalmente con relación al valor máximo de la señal, restando por lo general 3 dB a su valor máximo, que es el punto donde la potencia es la mitad de su valor máximo [13].

En la Figura 2.4 se observa una señal con su valor máximo a una frecuencia  $f_c$ , y para calcular el ancho de banda se resta las frecuencias ( $f_2 - f_1$ ) que se encuentran a -3dB del valor pico de la señal.

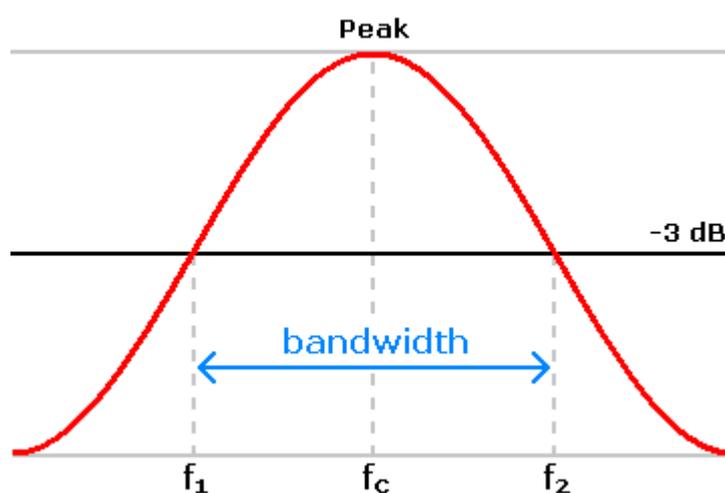


Figura 2.4: Bandwidth de una señal

## 2.5 Línea de vista

Se refiere a un camino limpio sin obstáculos en un enlace de radio que debe tener visibilidad directa entre la antena transmisora y receptora, por tal motivo no debe existir algún elemento que obstaculice su visibilidad. Esto también es conocido como LOS por sus siglas en inglés (Line of Sight).

## 2.6 Radioenlace

Un radioenlace consta de 3 elementos principales que son:

- Transmisor con su potencia de transmisión
- Canal de comunicaciones y su relación con la pérdida en la Propagación (Path Loss)
- Lado del Receptor con la Sensibilidad del Receptor

### 2.6.1 Potencia de transmisión

Es la potencia de salida de la antena transmisora. 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. En general, los enlaces con mayor potencia de salida son más costosos.

La potencia de transmisión de la antena, normalmente se encuentra en las especificaciones técnicas del vendedor. Se debe tener en cuenta que las especificaciones técnicas le darán valores ideales, los valores reales pueden variar debido a los factores como la temperatura y la tensión de alimentación.

La potencia de transmisión típica en los equipos IEEE 802.11 varía entre 15 – 26 dBm (30 – 400 mW).

En la Tabla 1 muestra la hoja de datos de una tarjeta IEEE con sus potencias pico.

Protocolo	Potencia pico [dBm]	Potencia pico [mW]
IEEE 802.11b	18	65
IEEE 802.11a	20	100

Tabla 1: Potencia de transmisión de una tarjeta inalámbrica IEEE 802.11a/b típica

### **2.6.2 Path Loss**

La mayor parte de la potencia de la señal transmisora se perderá en el aire. Aún en el vacío, una onda de radio pierde energía (de acuerdo con los principios de Huygens) que se irradia en direcciones diferentes a la que puede capturar la antena receptora. Debe tener en cuenta que esto no tiene nada que ver con la niebla, la lluvia o cualquier otro elemento que puede adicionar pérdidas.

### **2.6.3 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 en la forma de “bits lógicos” [14].

## **2.7 Interferencia**

Uno de los desafíos claves que enfrentan los diseñadores de redes móviles es la interferencia. La interferencia limita la reusabilidad de recursos de espectro en el espacio (como tiempo, frecuencia, códigos, etc.) impidiendo una mejora en la eficiencia espectral total (bits/s/Hz) en la estación base [15].

En este trabajo, se estudia la interferencia ocasionada entre múltiples beams formados por arreglos de antenas y conocido como interferencia entre beams (IBI). La IBI mide la interferencia experimentada por un usuario que usa un determinado beam cuando al mismo tiempo ocurre una transmisión para otro usuario diferente usando otro beam [16].

La Figura 2.5 ilustra la conexión de dos usuarios a la antena transmisora, con lo que produciría una interferencia de señales entre los usuarios.

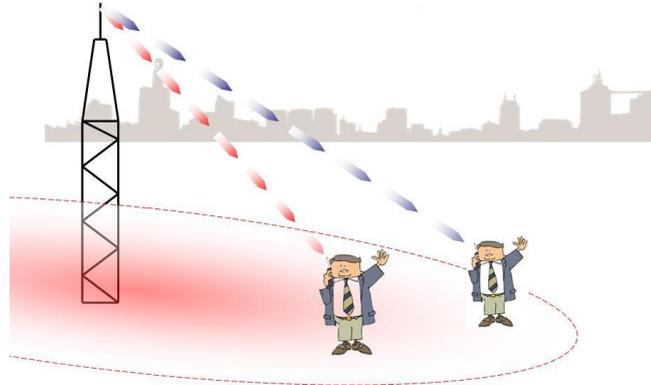


Figura 2.5: Interferencia entre dos usuarios

## 2.8 Ruido

Ruido, toda señal no deseada en un circuito de comunicación y tiene como resultados diversas perturbaciones, que tienden a ocultar información cuando se colocan dentro de su ancho de banda. El ruido puede ser desglosado en cuatro categorías:

- Ruido térmico
- Ruido de intermodulación
- Ruido de Impulso
- Diafonía

Para este trabajo, la potencia de ruido está representada por la ecuación de ruido térmico.

## 2.9 SINR

El nivel de SINR en los receptores es un factor crítico y del cual dependen las redes celulares para su buen funcionamiento [17].

Similar a la SNR, la SINR de un receptor se define como la potencia de la señal deseada ( $P$ ) dividido por la suma de las potencias interferentes ( $I$ ) y la potencia de ruido ( $N$ ). Si la potencia de ruido es cero, entonces la SINR se reduce a la

relación de señal a interferencia (SIR). Por el contrario, si la potencia de interferencia es cero, reduce la SINR a la relación señal-ruido (SNR) [18]. La ecuación de SINR es:

$$SINR = \frac{P}{I+N} \quad (2.4)$$

### 2.10 Zero Forcing

Zero forcing (ZF) es considerada una de las técnicas de selección más simples para canales multiusuarios [19]. Consiste en multiplicar el vector señal a ser transmitido  $\mathbf{x}$  por la pseudoinversa de la matriz de canal  $\mathbf{H}$ .

ZF es una técnica de tratamiento espacial de señal en la que se fuerza a cero todas las potencias de interferencia no deseadas. En otras palabras, en un sistema de comunicaciones inalámbricas con múltiples antenas transmisoras, es capaz de anular las señales de interferencia entre usuarios [20]. Para zero-forcing, la matriz de pre codificación es proporcional a la pseudoinversa de la matriz de canal.

## CAPÍTULO 3

### 3. METODOLOGÍA.

En esta sección, se plantea el proceso de análisis del efecto de la interferencia en el área de servicio y un método de mitigación de interferencia en la banda de 28 GHz en un medio de propagación con línea de vista (LOS). Los dos métodos o experimentos fueron desarrollados y simulados en Matlab.

Se considera una red móvil donde la estación de base y los equipos de usuario son desplegados en un área de servicio con radio 200 metros y un rango angular de 60 grados.

Para obtener los resultados esperados a continuación, se define el modelo referencia, el modelo matemático y el modelo propuesto que se lo denominó Múltiples Beams por Grupo de Usuarios.

El modelo referencia permite analizar la interferencia generada para el caso en que cada ULA irradia a un usuario desplegado en el área de servicio. Gran parte del algoritmo utilizado para el cálculo de SINR fue reutilizado en los diferentes modelos. El modelo matemático se denominó así porque se basó en el esquema de Zero Forcing. La implementación del algoritmo se basa en el modelo de referencia.

#### 3.1 Parámetros de simulación

La frecuencia, la longitud de onda, ganancias, pérdidas y ruido son parámetros fundamentales para la simulación de las soluciones propuestas.

La tabla 2 muestra los parámetros de simulación más importantes con su respectivo valor o argumento.

<b>Parámetros</b>	<b>Argumentos</b>
Frecuencia de portadora (fc)	28 GHz
$\lambda/2$	5.33 mm
Potencia de transmisión	0dBm (1mW)
Ganancia de Tx, Rx	14.7 dBi, 0dBi
Ancho de banda	1GHz
Ruido térmico	-84 dBm
Número de usuarios	30
Número de arreglos de antenas	30
Número de elementos por ULA	30
Radio de cobertura	200 metros

Tabla 2: Parámetros de simulación

## 3.2 Modelo referencia

### 3.2.1 Formación de haz con arreglos lineales uniformes

La formación de haces se implementa con arreglo lineal uniforme (ULA) y elementos isotrópicos. Matlab cuenta con la herramienta Phased Array System Toolbox que provee algoritmos y apps para la simulación de sistemas de arreglos de sensores. Esta herramienta permite generar ULA's. En el presente proyecto, se crean arreglos con 30 elementos isotrópicos separados lambda medio ( $\lambda/2$ ).

El patrón de radiación consta de un lóbulo principal y lóbulos laterales con menor ganancia. Como se menciona en el Capítulo I (sección - 1.2) los lóbulos laterales son los que marginalmente añaden potencia a otros usuarios generando interferencia entre haces (IBI, inter-beam interference).

En la Figura 3.1 se muestra el arreglo lineal uniforme (ULA) de 30 elementos isotrópicos separados  $\lambda/2$ .

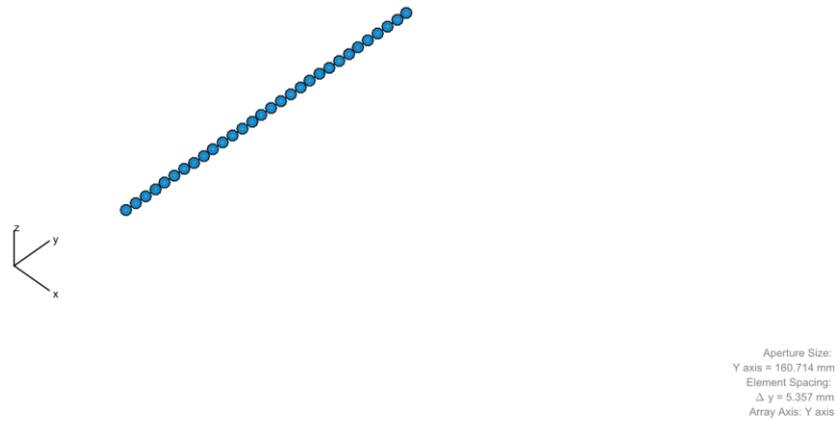


Figura 3.1: Arreglo uniforme lineal con 30 elementos

En la Figura 3.2 se muestra el patrón de radiación generado a un ángulo de dirección de cero grados.

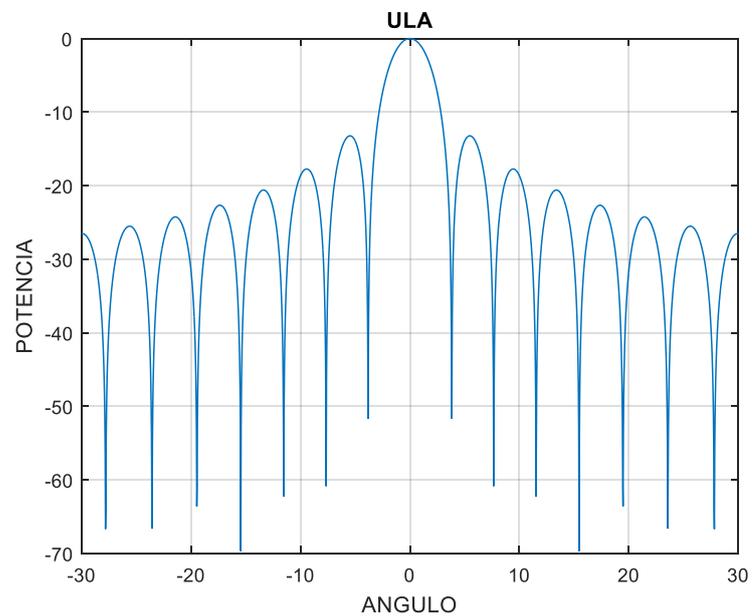


Figura 3.2: Patrón de haz de un arreglo lineal uniforme

En la Figura 3.3 se muestra el patrón de radiación generado a un ángulo de dirección de -12 grados.

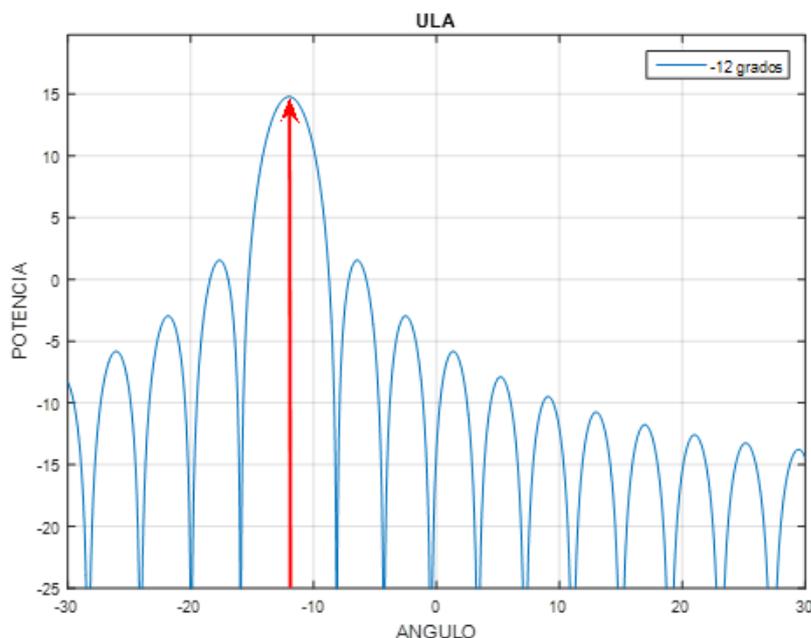


Figura 3.3: Patrón de haz de un arreglo lineal uniforme a -12 grados

### 3.2.2 Creación de usuarios

Luego de que se genera un beamforming esto se replica para crear 30 ULA's e iluminar 30 usuarios colocados en posiciones aleatorias dentro del área de servicio. La generación de los ángulos entre -30 y +30 grados está dado por el código  $teta(l) = ((60 * rand) + 30 - 60)$ , y la generación de usuarios por  $m = randi(200, NumUsuarios, 1)$ , donde NumUsuarios define el número de equipos de usuarios desplegados en el área de servicio.

### 3.2.3 Potencia de transmisión, recepción y pérdida de camino

Una vez definido los 30 usuarios dentro del área de cobertura y conociendo sus ángulos y distancias desde la estación base se procede a formar la matriz de potencias de transmisión. El código desarrollado generara una matriz de 30x30 en la que cada elemento de la diagonal principal representa la potencia máxima del patrón de radiación hacia el k-ésimo usuario es decir que se genera 30 potencias de transmisión para

cada ULA en su ángulo correspondiente. Los elementos que no forman parte de la diagonal se consideran potencias interferentes para el usuario. La Figura 3.4 ilustra cómo se iluminan a  $K$  usuarios dentro del área de servicio.

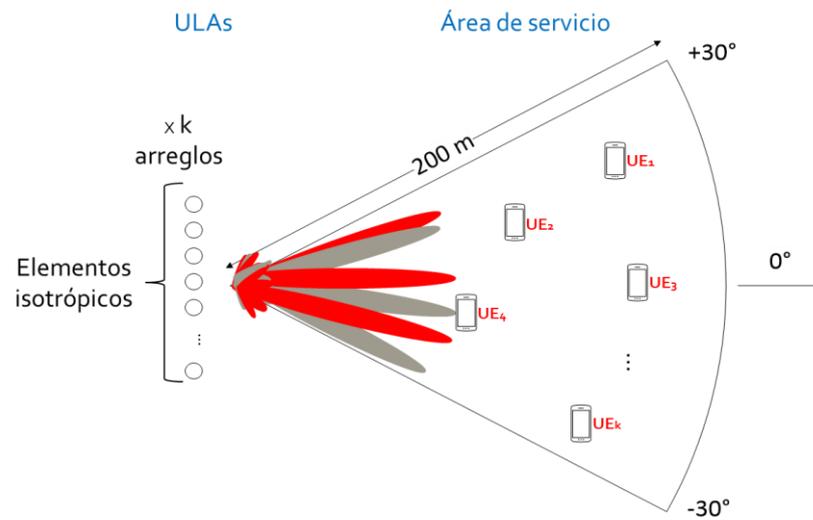


Figura 3.4: Esquema general

Para el cálculo de la potencia de recepción, es necesario calcular la pérdida de camino en el espacio libre con la ecuación de FRISS. La ecuación de pérdida de camino (Path Loss) está definida como:

$$FSL = G_{tx} * G_{rx} * \left( \frac{4\pi f d}{c} \right)^2 \quad (3.1)$$

$G_{tx}$  y  $G_{rx}$  representan las ganancias de las antenas transmisoras y receptoras respectivamente. La frecuencia de operación del sistema se denota como  $f$ ,  $d$  es la distancia de separación entre la estación de base y el equipo de usuario y  $c$  la velocidad de la luz.

La potencia de recepción se calculó como:

$$Pr = \frac{Pt}{Path Loss} \quad (3.2)$$

La potencia de recepción calculada es utilizada tanto para las potencias de usuarios como para las potencias interferentes. De esta forma, se construye la matriz de potencia de recepción, la cual contiene las mismas dimensiones que la matriz de la potencia de transmisión (30x30).

Luego del cálculo de la potencia de recepción de cada usuario y de sus respectivas potencias interferentes, el SINR para el usuario se define como:

$$SINR_k = \frac{Pr_k}{n + \sum_{j \neq k} P_j} \quad (3.3)$$

Finalmente, se generan 30 SINR (uno por cada usuario). Este proceso es repetido 500 veces de tal manera que, se obtiene 15000 valores de datos de SINR.

Los datos generados son utilizados para trazar una curva estadística que representa el comportamiento del sistema y permite observar si la solución propuesta mejora el SINR. Este modelo se ha denominado referencia. El desarrollo de este algoritmo está simplificado en la Figura 3.5.

### 3.3 Diagrama de flujo modelo referencia

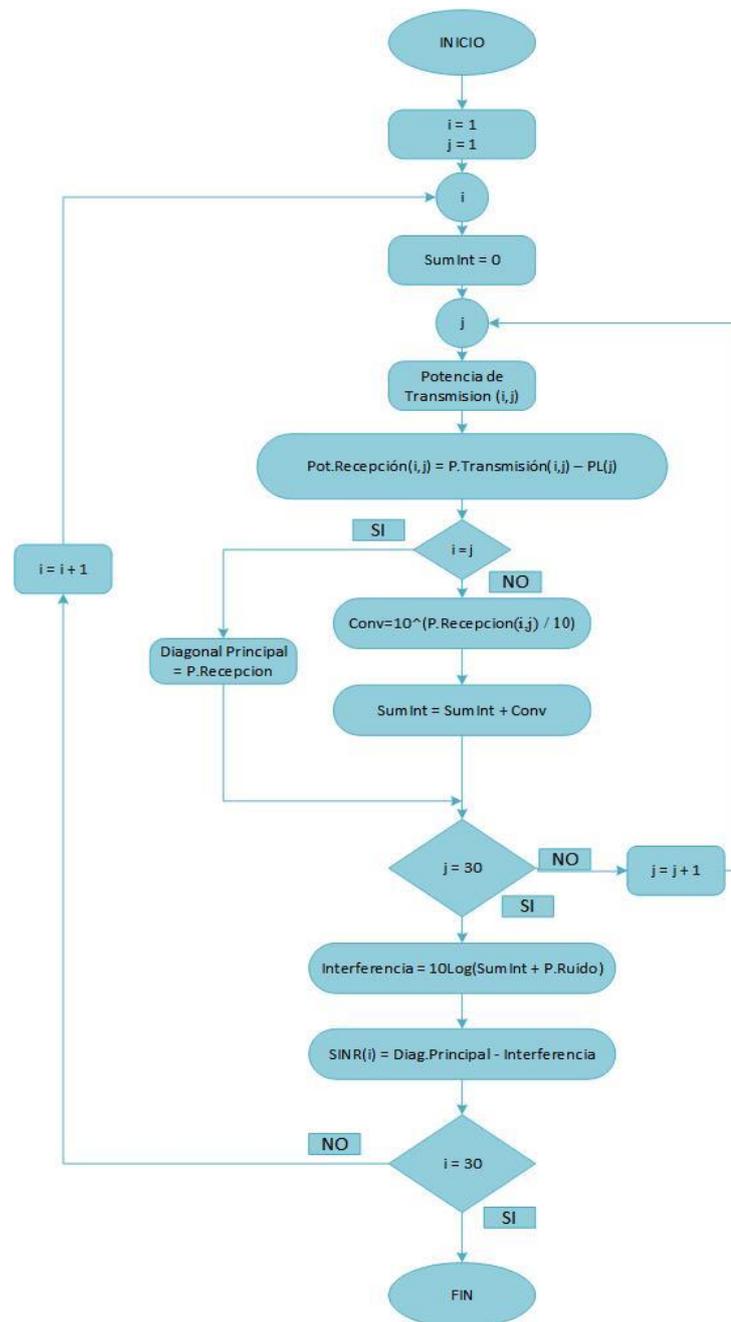


Figura 3.5: Esquema Referencial

### 3.4 Modelo matemático

Con el fin de reducir la interferencia ocasionada por los lóbulos laterales de los ULA's, se aplica la pre codificación zero forcing (ZF). En pre codificación ZF, se busca un vector BF para el usuario  $k$  (definido como  $v_k$ ) que sea ortogonal a los vectores de los otros usuarios. Esto es:

$$h_j v_k = 0, j \neq k \quad (3.4)$$

El vector fila  $v_k$  está contenido en la matriz de pre codificación  $\mathbf{V}$  la cual se obtiene de normalizar todas las columnas de la matriz  $\mathbf{W}$ . La matriz  $\mathbf{W}$  es la pseudoinversa de la matriz de canales de usuarios  $\mathbf{H}$  y se calcula como:

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (3.5)$$

El SINR de este modelo se calculó como:

$$SINR = \frac{P_k |h_k^H \bar{v}_k|^2}{n + \sum_{j \neq k} P_j |h_k^H \bar{v}_j|^2} \quad (3.6)$$

El desarrollo de este algoritmo esta simplificado en la Figura 3.6.

### 3.4.1 Algoritmo del modelo matemático

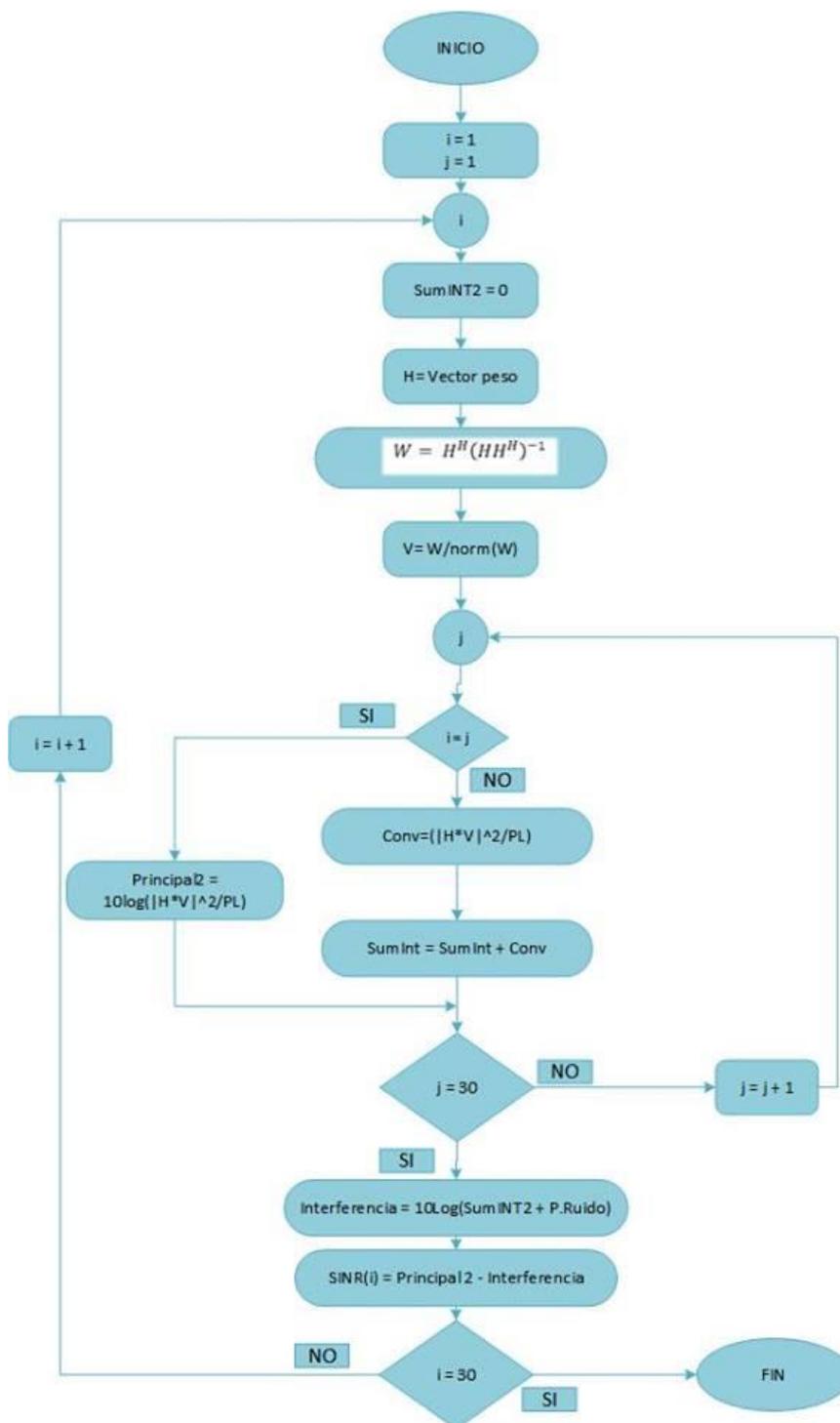


Figura 3.6: Esquema Matemático

### 3.5 Múltiples beams por grupos de usuarios

El modelo de múltiples beams por grupos de usuarios consiste en aislar un grupo de usuarios específicos dentro de regiones de tal manera que, al iluminar únicamente a estos usuarios, la interferencia ocasionada por los niveles de energía de los ULA's que sirven a otros usuarios disminuya (disminuye el número de usuarios en el área de servicio en un momento dado).

Para entender de mejor manera el procedimiento para la medición del SINR se ha dividido esta sección en: sectorización, cálculo de potencia, cálculo de SINR y finalmente se resume el algoritmo de la solución con un diagrama de flujos.

#### 3.5.1 Sectorización

El área de servicio es segmentada en cuatro intervalos. El área posee un rango angular de 60 grados y cada intervalo dentro de la misma tiene un rango angular de 15 grados, estos intervalos resultan en 2 grupos, denominados Grupo A y Grupo B. Los grupos están distribuidos en intervalos de usuarios A, B, A, B. Aquellos UE que se encuentran en el Grupo A serán iluminados durante un tiempo  $t_1$  y después en un tiempo  $t_2$ , los UE que se encuentran en el Grupo B. De este modo se reduce el número de usuarios en un tiempo finito.

En la Tabla 3 se muestra la división de los grupos y a su vez los intervalos del mismo.

Grupo de usuarios	Intervalo angular
Grupo A	$15^\circ < \theta \leq 30^\circ$
	$-15^\circ < \theta \leq 0^\circ$
Grupo B	$0^\circ < \theta \leq 15^\circ$
	$-30^\circ < \theta \leq -15^\circ$

Tabla 3: Intervalo angular por grupo de usuario

En la Figura 3.7 se hace una representación gráfica con los 2 grupos de usuarios (A y B) que se forman en el área de servicio.

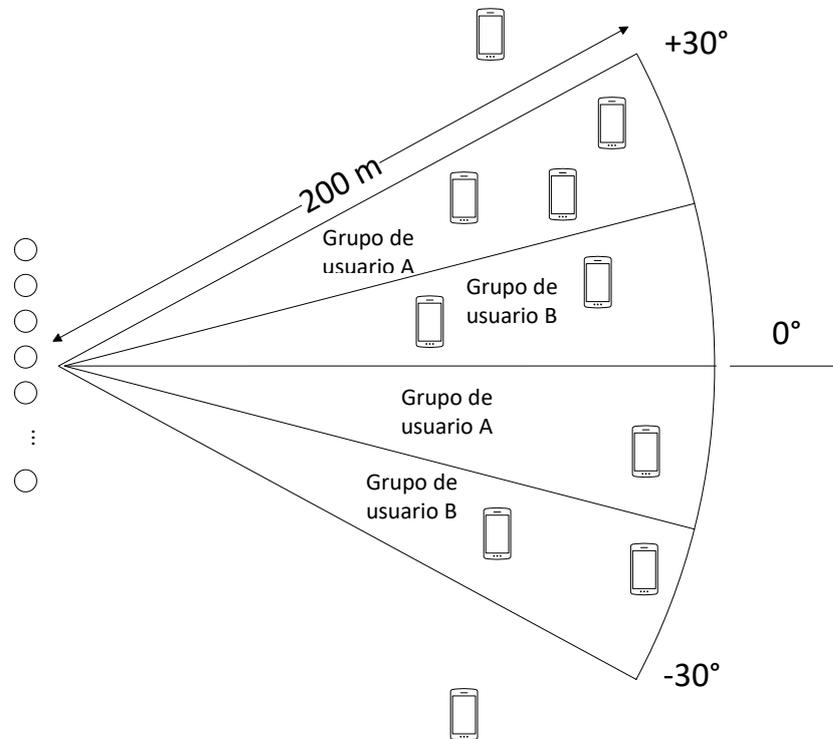


Figura 3.7: División por grupos de usuarios en el área de servicio

En la Figura 3.8 se presenta una simulación en forma polar de los ULA's ubicados en el Grupo de usuarios A, etiquetados en la leyenda con la ubicación angular del lóbulo principal de cada usuario.

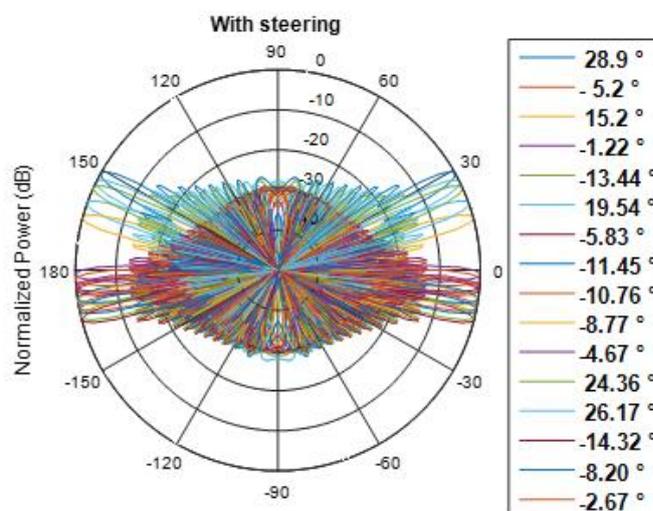


Figura 3.8: Grupo de usuarios A en una representación en forma polar de sus ULA's a una frecuencia de 28GHz

En la Figura 3.9 se presenta una simulación en forma polar de los ULA's ubicados en el Grupo de usuarios B, etiquetados en la leyenda con la ubicación angular del lóbulo principal de cada usuario.

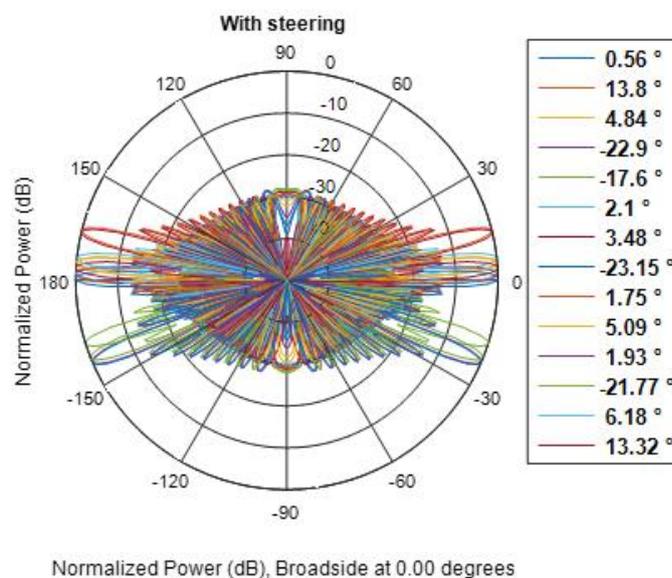


Figura 3.9: Grupo de usuarios B en una representación en forma polar de sus ULA's a una frecuencia de 28GHz

### 3.5.2 Cálculo de potencias de transmisión y recepción

Al igual que el modelo de referencia, la potencia de transmisión para un usuario  $k$  y las potencias interferentes se obtienen de los niveles de potencia del patrón generado por el ULA respectivo en función del ángulo. Con este modelo se aísla el grupo A del grupo B en diferentes tiempos, la matriz de potencia de transmisión también se divide en una matriz para el grupo de usuarios A y otra matriz para el grupo de usuarios B. Ambas matrices conservan las dimensiones de la matriz de potencia de transmisión calculada en el Capítulo 3 (sección - 3.23). Sin embargo, estas matrices contienen filas en cero debido a que ciertos usuarios pertenecientes al otro grupo reciben 0 vatios de potencia, en otras palabras, varios ULAS se encuentran apagados.

Luego se procede al cálculo de las matrices de potencia de recepción de los grupos A y B. Una vez obtenidas las matrices, se suman las mismas para obtener una sola matriz de potencia de recepción; con esta matriz de potencia de recepción se procede al cálculo de SINR. El desarrollo de este algoritmo está simplificado en la Figura 3.10.



## CAPITULO 4

### 4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En este capítulo se provee los resultados de simulación para verificar el algoritmo de Múltiples Beams por Grupos de Usuarios. Las pruebas de funcionamiento del algoritmo constan de:

- Análisis de valores de SINR
- Curvas de función de distribución acumulada
  - o Curvas de distribución acumulada modelo referencia
  - o Curvas de distribución acumulada de pre-codificación Zero Forcing
  - o Curvas de distribución acumulada de modelo propuesto
  - o Comparación de curvas de distribución acumulada

Las curvas de distribución acumulada permiten determinar si el algoritmo propuesto reduce la interferencia y a su vez aumenta la relación señal a ruido más interferencia (SINR) en comparación con el método referencia.

#### 4.1 Análisis de valores de SINR

Luego de 500 iteraciones bajo el escenario de 30 ULAS y 30 usuarios, se generaron 15000 valores de SINR para cada uno de los tres modelos. Todos estos puntos se muestran en la Figura 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente. Dado la gran cantidad de valores presentes en las figuras, no es posible distinguir una diferencia entre ellas. Para resolver esto se calculó la media y la desviación estándar de SINR para los tres modelos. La media para el modelo de referencia fue de -9.9 dB, para el modelo ZF fue de -9.9 dB y para el modelo propuesto de múltiples beam por grupos de usuarios fue de -7.4 dB. Entre el modelo propuesto y el modelo referencia, el valor promedio de SINR aumentó en 2.5dB. Por otra parte, la desviación estándar de los valores de SINR con respecto a su media en los tres modelos esta entre 10.87dB y 10.97dB.

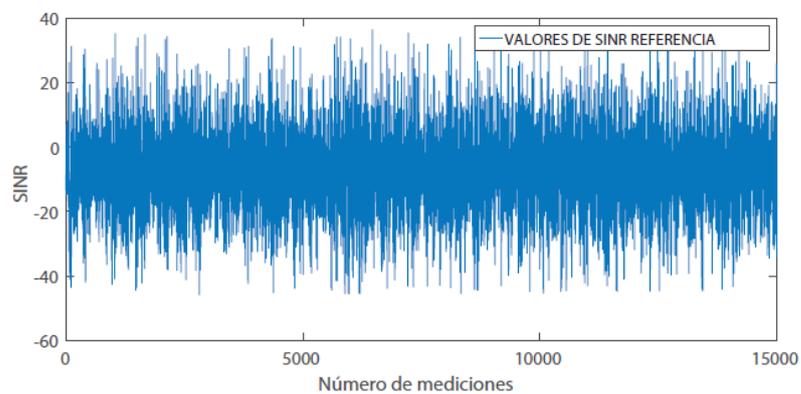


Figura 4.1: Mediciones de SINR para el modelo referencia

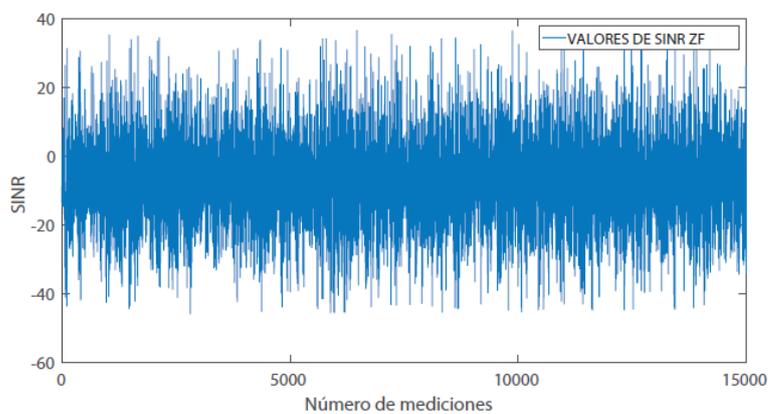


Figura 4.2: Mediciones de SINR para el modelo Zero Forcing

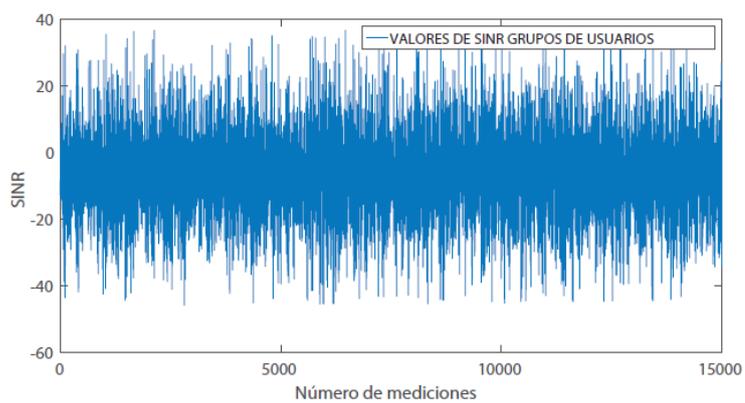


Figura 4.3: Mediciones de SINR para el modelo Múltiples por Grupos de Usuarios

Notar que el valor de SINR resulto negativo cuando en la teoría debería ser mayor que 0 dB (o mayor que 1W), esto se debe a que la potencia de transmisión de 1mW (0 dBm) es muy baja. En [21] muestra que en LTE, las condiciones de radiofrecuencia (RF) para valores de SINR menores o iguales que 0dB se consideran UE en el borde de la celda. Como se desea demostrar que el modelo propuesto reduce la interferencia se realizó el estudio con los parámetros de simulación definidos anteriormente. Si se aumenta la potencia de transmisión, por ejemplo, a 30dBm obviamente la relación SINR incrementará para todos los usuarios 30 dB más.

En la Tabla 4 se muestran los valores de la media y desviación estándar que son obtenidos en la simulación de cada modelo.

<b>Modelo</b>	<b>Media de SINR</b>	<b>Desviación estándar de SINR</b>
Referencia	-9.9001 dB	10.8711 dB
Zero Forcing	-9.9000 dB	10.8713 dB
Grupos de usuarios	-7.4000 dB	10.9739 dB

Tabla 4: Tabla Media y desviación estándar de SINR

#### 4.2 Curvas de función de distribución acumulada

Para estudiar la respuesta del sistema sobre el efecto de las interferencias dentro del área de servicio, en la Figura 4.4 se presenta la función de distribución acumulada (CDF) de la señal a interferencia más ruido (SINR), comparando los resultados que se obtuvo utilizando el modelo referencia, modelo basado en ZF [22] y modelo propuesto basado en múltiples beams por grupos de usuarios.

De la Figura 4.4, se observa que, dado que la curva de SINR de la técnica ZF resulto ser similar a la curva referencia da a entender que la interferencia generada en la pre-codificación es mínima y por esta razón los valores de SINR son bastante cercanos. Sin embargo, en cuanto a la solución propuesta, la CDF de SINR tiende a moverse a la derecha al reducir la interferencia entre los beams.

Entre la CDF del método propuesto y el método de referencia, en el percentil 50 se produce una mejora de SINR de 2.5 dB.

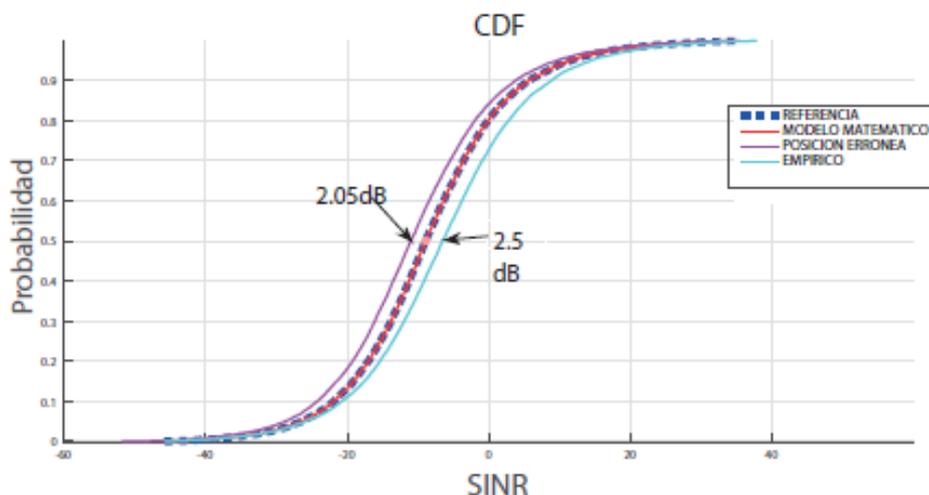


Figura 4.4: Distribución SINR para una red con 30 usuarios de los tres modelos implementados

En la Figura 4.5, se observa el comportamiento de la CDF para las potencias interferentes de los tres modelos y es de notarse que para el modelo propuesto la CDF tiende hacia la derecha, indicando que la interferencia disminuye. El percentil 50 la potencia interferente en el modelo referencia es -76.2dB mientras que en el mismo percentil la potencia interferente para el modelo propuesto es -78.5dB lo que indica que hay una reducción de 2.3dB.

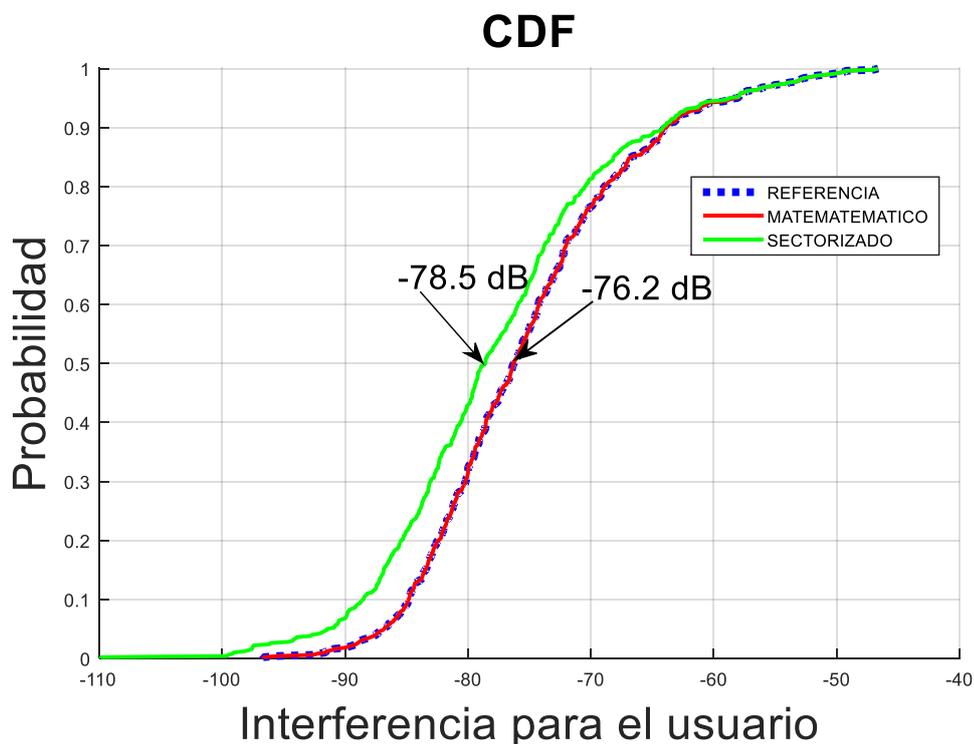


Figura 4.5: Distribución potencias interferentes para una red con 30 usuarios de los modelos implementados

Se puede reducir el efecto de la interferencia aumentando la ganancia de los ULAS (se reduce el ancho del haz). Un modo de aumentar la ganancia es añadiendo más elementos (antenas isotrópicas) al arreglo. Esto produce un aumento en la potencia irradiada por el arreglo de antena, potencia de transmisión más la ganancia del arreglo, que a su vez mejora el SINR máximo para cada usuario,

En la figura 4.6, se muestran los resultados de pasar de un arreglo con 30 elementos a arreglos con 40, 50 y 60 elementos respectivamente. Entre la CDF de la SINR con arreglo 30 ELEMENTOS (ULA-30) y la SINR con arreglo de 60 elementos (ULA-60) en el percentil 50 hay una ganancia de SINR de 4.3139dB.

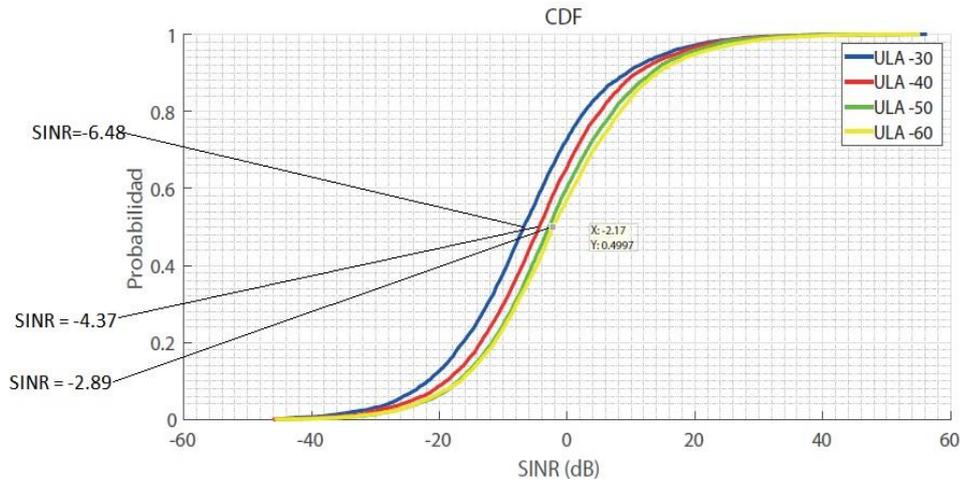


Figura 4.6: Distribución SINR para una red con 30 usuarios con 30, 40, 50 y 60 elementos del ULA

### 4.3 Capacidad

Para estudiar la relación entre la SINR y el rendimiento (Throughput) se ha ordenado los datos de SINR máximo en forma ascendente y luego calculado el rendimiento para cada una de estas mediciones usando la siguiente ecuación:

$$C = W * \log_2(1 + SINR) \quad (4.1)$$

Donde  $W$  es el ancho de banda del canal. La representación gráfica del máximo SINR versus su correspondiente rendimiento usando la ecuación 4.1 es mostrado en la Figura 4.7. En general, el rendimiento aumenta cuando el SINR aumenta.

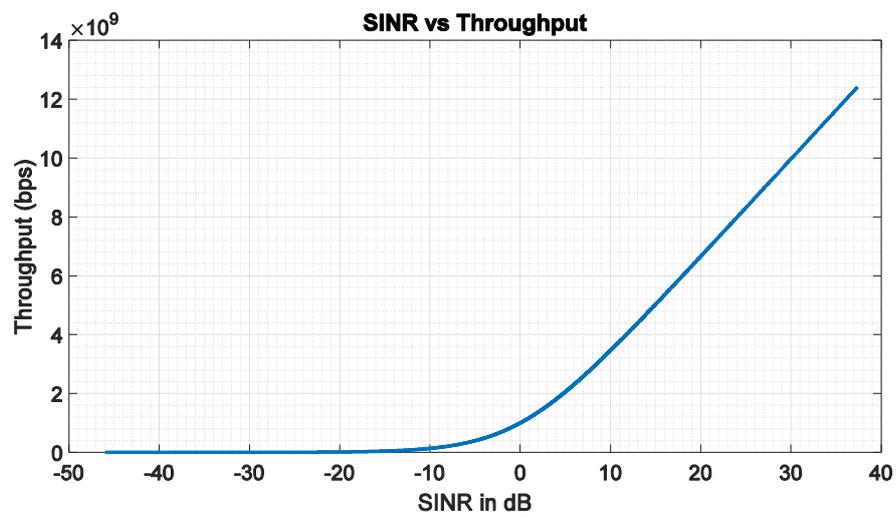


Figura 4.7: SINR versus rendimiento del modelo propuesto

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo presenta un estudio del efecto de la interferencia en enlaces con línea de vista en la banda de 28 GHz y que a su vez propone un método de reducción de la interferencia por medio de la reducción de las potencias no deseadas al utilizar un algoritmo que combina recursos en espacio-tiempo

Al realizar el estudio de la interferencia y el cálculo de la función de distribución acumulada de SINR de los dos primeros algoritmos, se obtuvo curvas extremadamente cercanas, por lo que se concluye que la interferencia generada, utilizando la técnica de pre-codificación Zero Forcing, es la mínima posible.

El algoritmo propuesto llamado múltiples beams por grupos de usuarios redujo efectivamente la interferencia entre beams a través de métodos de sectorización y aumentos en la ganancia del arreglo con ULA's de 60 elementos. Los resultados que se obtuvieron muestran que la relación señal para interferencia más ruido aumenta debido a que la interferencia disminuye en comparación de iluminar a cada uno de los usuarios en general. Se determinó un incremento de 6.81 dB (medido en el percentil 50).

De manera análoga se trazó la distribución acumulada de los datos de las todas las potencias interferentes y se comprobó que las potencias interferentes se redujeron en comparación con el modelo de referencia, comprobando así que el modelo sectorizado generó los resultados esperados. En el percentil 50 de ambas CDFs se calculó una disminución de 2.3dBm

La formulación matemática que se utilizó para generar el patrón de radiación del ULA es la convencional. Sin embargo, este estudio permite conocer que existen otras técnicas que modifican el vector peso de los arreglos generando patrones de radiación optimizados que disminuyen el ancho de haz y reducen los niveles de los lóbulos laterales. Técnicas como Dolph-Chevyshev y Riblet cumplen esta función.

Este proyecto definió el alcance y ciertas limitaciones del estudio de la interferencia. Sin embargo, este trabajo puede ser analizado considerando todos los factores que

intervienen en un presupuesto de enlace real, un modelo de canal que considere múltiples caminos de propagación y sin línea de vista, etc.

Se puede conseguir mejorar aún más la relación de SINR utilizando mejores técnicas para generar ULA's con patrones de radiación con lóbulos reducidos que seguramente disminuirán la interferencia provocada por estos a otros usuarios. De hecho, utilizando diferentes vectores pesos puede estudiarse la posibilidad de conmutar diferentes vectores de ULA's para iluminar a los usuarios de acuerdo a su ubicación. Por ejemplo, si varios usuarios se encuentran muy cercanos entre sí se puede utilizar un ULA con ancho de haz reducido mientras que si los usuarios se encuentran muy separados se puede utilizar ULAS convencionales con anchos de haz mayores.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. R. J.-Y. S. J. P. B. . L. J. L. Y. K. J. C. K. C. and F. A. , "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5g cellular communications: theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, 2014.
- [2] "Agencia de Regulación y control de las Telecomunicaciones - ARCOTEL," 10 Agosto 2016. [Online]. Available: [http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/09/1.1.3-Lineas-activas-por-tecnologia\\_Nov-2016.xlsx..](http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/09/1.1.3-Lineas-activas-por-tecnologia_Nov-2016.xlsx..) [Accessed 3 January 2017].
- [3] I. C.-L. S. H. Z. X. Q. S. and Z. P. , 5g: rethink mobile communications for 2020+, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2016.
- [4] U. 2017, "International Telecommunications Union," 26 february 2016. [Online]. Available: [http://www.itu.int/net/pressoffice/press\\_releases/2016/07-es.aspx#.WLS-9fk1-Hs](http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2016/07-es.aspx#.WLS-9fk1-Hs).
- [5] T. . R. S. S. R. M. H. Z. Y. A. K. W. G. . W. J. . S. M. S. and F. G. , "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!," 2017.
- [6] F. B. A. L. U. P. F. T. L. M. and B. L. , "Five Disruptive Technology Directions for 5G.pdf," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, pp. 74-80, 2014.
- [7] P. Ortega, O. Enríquez and J. Morales, "Estudio de antenas inteligentes y principales aplicaciones en los sistemas de telefonía movil.," *XIX Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica*, 2005.
- [8] A. A. Noaman, "Concentric Circular Array Antenna Null Steering Synthesis by Using Modified Hybrid Ant Colony System Algorithm," *International Journal of Advancements in Computing Technology*, vol. 2, no. 2, 2010.

- [9] A. Vesa, "The Radiation Pattern for Uniform Array Antennas," *Transactions on Electronic and Communications*, vol. 55, no. 1, 2010.
- [10] B. Van Veen and K. Buckley, "Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, 1988.
- [11] S. Glapa, "ComunicacionesInalambricasHoy.com," 24 septiembre 2012. [Online]. Available: <http://www.comunicacionesinalambricashoy.com/transmision-beamforming-la-clave-esta-en-los-detalles/>.
- [12] B. Van Veen and K. Buckley, "Formación de haces: un enfoque versátil para filtrado espacial," *IEEE ASSP*, vol. 2, no. 4, p. 5, 1998.
- [13] M. E. V. Valkenburg, *Network Analysis*, 3rd Edition, Prentice Hall College Div, 1974.
- [14] S. Buettrich, "Cálculo de Radioenlace," 2007.
- [15] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. S. Shitz, O. Simeone and W. Yu, "Multi-Cell MIMO Cooperative Networks: A New Look at Interference," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 9, 2010.
- [16] W. M. A. O. Martin Döttling, *Radio Technologies and Concepts for IMT-Advanced*, WILEY, 2009.
- [17] I. i. I. w. networks, "Martin Haenggi; Radha Krishna Ganti," *Foundations in trends in networking*, vol. 3, no. 2, 2008.
- [18] J. G. Andrews, . R. G. . M. H. N. . J. and . S. W. . , " A primer on spatial modeling and analysis in wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 11, p. 48, 2010.
- [19] T. Haustein, C. v. Helmolt, E. Jorswieck, V. Jungnickel and V. Pohl, "Performance of MIMO systems with channel inversion," *Vehicular Technology Conference*,, 2002.

- [20] B. C. B. . P. B. M. . H. and . A. L. . S. , "A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication - Part I: channel inversion and regularization," *IEEE Xplore Digital Library*, 07 february 2005.
- [21] M. L. Rocca, "Laroccasolutions," 24 Abril 2016. [Online]. Available: <http://www.laroccasolutions.com/164-rsrq-to-sinr/>. [Accessed Enero 15 2017].
- [22] D. Slock, "Location Aided Wireless Communications," *IEEE Magazine*, vol. 1, p. 6, 2012.
- [23] "Universidad Nacional de Mar del Plata, FACULTAD DE INGENIERIAS," [Online]. Available: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/electronica/catedras/mediosdetransmision/files/informacion%20adicional/Capitulo2.pdf>.