



INAOE

Asignación de canales espacio - tiempo para sistemas de radiocomunicación

por

Iclia Villordo Jiménez

Tesis sometida como requisito parcial para
obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ELECTRONICA**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Febrero 2007

Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

**Dr. Ignacio Enrique Zaldívar Huerta,
INAOE**

**Dra. Giselle Monserrat Galván Tejada,
CINVESTAV-IPN**

©INAOE 2007

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias en su totalidad o en
partes de esta tesis



Dedicatoria

Con todo mi amor para Noé Torres.

*“And tell me,
What is my life without your love?
And tell me,
Who am I without you by my side?”*

George Harrison

Agradecimientos

Quiero agradecerle a Dios, por darme vida y las oportunidades para lograr una meta más en compañía de mis seres queridos.

De todo corazón a mis padres, por quererme tanto y apoyarme en forma incondicional, por ser un ejemplo de fortaleza, trabajo y amor, los amo mucho.

A mi adorada y querida germanita, por creer en mí, por darme muchos consejos y todo su cariño, eres lo máximo.

A la Dra. Giselle Galván Tejada y al Dr. Ignacio Zaldívar Huerta, por toda su confianza, su infinita paciencia y por la oportunidad de realizar uno de mis sueños, muchas gracias.

Al Dr. Esteban Tlelo Cuautle y al Dr. Alejandro Díaz Sánchez, porque desde el primer momento que los conocí, me han apoyado y me han guiado, gracias por ser mis amigos, los quiero mucho.

A todos mis maestros del INAOE y del CINVESTAV, sin los cuales no hubiera sido posible esta tesis.

A los chicos de la biblioteca de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, en especial a Graciela y a Raúl por hacer muy divertidas las visitas a la biblioteca.

A Leonardo, Joel y Francisco, del laboratorio de Telefonía de la Sección de Comunicaciones del CINVESTAV, por su apoyo desde siempre.



A todos mis amigos, en especial a Héctor, por su cariño y su infinita paciencia, los quiero mucho.

Al CONACYT, por el apoyo para la realización de este posgrado.

Introducción

Desde el surgimiento de los sistemas de comunicaciones inalámbricos se ha tratado de optimizar el uso del espectro electromagnético con el fin de atender a una mayor cantidad de usuarios y/o poder transmitir una gran cantidad de información mientras se satisface cierta calidad de servicio.

Con el avance de la tecnología se ha tratado de satisfacer esta demanda explotando el dominio de la frecuencia, el dominio del tiempo o haciendo una combinación de los dos. Sin embargo, en los últimos años las comunicaciones inalámbricas han experimentado un rápido crecimiento – ya que además de proporcionar servicios de voz, brindan servicios multimedia de alta velocidad – por lo que se ha propuesto explotar el dominio espacial por medio de antenas inteligentes.

Este hecho motivó el surgimiento del Acceso Múltiple por División de Espacio o SDMA (por sus siglas en inglés – *Space Division Multiple Access*). Esta técnica de acceso permite que un canal de radio convencional (bandas de frecuencia, ranuras de tiempo o códigos) se use simultáneamente por múltiples usuarios dentro de la misma área geográfica, tomando en cuenta la posición de los usuarios dentro de ella, dando origen a los canales espacio – tiempo.

Sin embargo, la administración de los canales espacio – tiempo no puede realizarse en forma tradicional debido a que los esquemas de asignación canales convencionales no toman en cuenta el dominio espacial, por lo que fue necesario proponer nuevos esquemas de asignación para manejar los recursos eficientemente.

El objetivo central de esta tesis es realizar un estudio del estado del arte de los esquemas de asignación de recursos de radio para esta técnica de acceso múltiple. Para lograr este objetivo la tesis está organizada de la siguiente manera.

En el capítulo 1 se presenta una introducción a las técnicas de acceso múltiple actualmente utilizadas. Se presentan sus características, ventajas, desventajas y aplicaciones para mostrar la evolución del manejo de recursos en los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

En el capítulo 2 se define el Acceso Múltiple por División de Espacio, sus características, ventajas y desventajas. Para hacer uso del dominio espacial se necesitan las antenas inteligentes, por lo que en este capítulo también se realiza un estudio de los aspectos que conforman la tecnología de antenas inteligentes: tipos de arreglos de antenas, algoritmos de separación espacial, así como su clasificación y su aplicación en los sistemas de comunicaciones.

En el capítulo 3 se presenta el estado del arte de los esquemas de asignación de canales espacio – tiempo, con el fin de observar los parámetros de los que depende esta técnica de acceso, los ambientes en que se ha propuesto y qué criterios de asignación de canales se han empleado.

En el capítulo 4 se evalúan por simulación algunos de los esquemas de asignación de canales espacio – tiempo con el fin de realizar una comparación entre ellos en diferentes ambientes y observar su desempeño.

Finalmente se presentan las conclusiones generales y el trabajo a futuro.

Contenido

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	v
Introducción	vii
CAPÍTULO 1. Introducción a las Técnicas de Acceso Múltiple.	1
<hr/>	
1.1 Definición de los esquemas de acceso múltiple.....	2
1.2 Clasificación de los esquemas de acceso múltiple	2
1.3 Acceso Múltiple por División de Frecuencia.....	4
1.3.1 Antecedentes Históricos.....	4
1.3.2 Definición y características.....	5
1.3.3 Ventajas y desventajas.....	7
1.3.4 Aplicaciones.....	7
1.4 Acceso Múltiple por División de Tiempo.....	8
1.4.1 Antecedentes Históricos.....	8
1.4.2 Definición y características.....	8
1.4.3 Ventajas y desventajas.....	10
1.4.4 Aplicaciones.....	11
1.5 Acceso Múltiple por División de Código.....	11
1.5.1 Antecedentes Históricos.....	11
1.5.2 Definición y características.....	12
1.5.3 Ventajas y desventajas.....	15
1.5.4 Aplicaciones.....	16

1.6	Técnicas híbridas de acceso múltiple	16
1.7	Acceso Múltiple por División de Espacio.....	18
1.8	Conclusiones.....	19
	Referencias.....	20

CAPÍTULO 2. Acceso Múltiple por División de Espacio. 23

2.1	Antecedentes Históricos.....	24
2.2	Definición de SDMA.....	26
2.3	Antenas Inteligentes.....	27
2.3.1	Parámetros básicos de un arreglo de antenas.....	28
2.3.2	Arreglos de antenas.....	30
2.3.2.1	Arreglos lineales.....	30
2.3.2.2	Arreglos circulares.....	37
2.3.3	Bloque de Procesamiento Digital de Señales.....	44
2.3.3.1	Algoritmos fijos para optimizar los pesos.....	45
2.3.3.2	Algoritmos adaptivos para optimizar los pesos.....	51
2.3.4	Clasificación y características de una antena inteligente.....	54
2.4	Características de SDMA.....	58
2.5	Conclusiones.....	65
	Referencias.....	67

CAPÍTULO 3. Esquemas de asignación de canales espacio – tiempo. 73

3.1	Clasificación de los esquemas de asignación de canales convencionales.....	74
3.1.1	Esquemas de asignación fija para canales convencionales.....	74
3.1.2	Esquemas de asignación dinámica para canales convencionales.....	76
3.1.3	Esquemas de asignación híbrida para canales convencionales.....	79
3.2	Esquemas de asignación fija de canales espacio – tiempo.....	79
3.2.1	Sistemas de una sola celda	79
3.2.1.1	Sin movilidad y sin efectos de propagación.....	79

3.2.1.2 Sin movilidad y con efectos de propagación.....	89
3.2.1.3 Con movilidad.....	101
3.2.2 Sistemas multicelulares.....	108
3.2.2.1 Sin movilidad y sin efectos de propagación.....	108
3.2.2.2 Sin movilidad y con efectos de propagación.....	109
3.3 Esquemas de asignación dinámica de canales espacio – tiempo.....	118
3.3.1 Sin movilidad.....	118
3.3.2 Con movilidad.....	120
3.4 Conclusiones.....	129
Referencias.....	131

CAPÍTULO 4. Simulación y comparación de los esquemas de asignación de canales espacio – tiempo. 135

4.1 Parámetros generales del sistema.....	136
4.2 Comparación de los algoritmos de asignación fija de canales espacio – tiempo sin movilidad.....	137
4.3 Comparación de los algoritmos de asignación dinámica de canales espacio – tiempo sin movilidad.....	144
4.4 Efecto de la movilidad en los esquemas de asignación de canales espacio – tiempo.....	146
4.5 Conclusiones.....	153
Referencias.....	154

CAPÍTULO 5. Conclusiones Generales y Trabajo a Futuro. 155

5.1 Conclusiones Generales.....	155
5.2 Trabajo a Futuro.....	157

Apéndice A. Cálculo del radio de un arreglo circular en función del número de modos que deben ser excitados 159

Apéndice B. Modelo de movilidad..... 165

Lista de figuras..... 171

Lista de tablas 175



Lista de variables.....	177
Lista de acrónimos.....	181

1 CAPÍTULO

INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE

Uno de los conceptos más importantes en cualquier sistema de radiocomunicaciones con varios usuarios es el de acceso múltiple, debido a que permite la posibilidad de que dichos usuarios utilicen los recursos de transmisión en forma eficiente.

Un sistema de comunicaciones tiene recursos finitos, los cuales generalmente se definen en términos de ancho de banda. Cuando existe más de un usuario para acceder a ese ancho de banda limitado, un esquema de acceso múltiple debe de ser implementado para organizar y/o controlar el ancho de banda compartido entre varios usuarios, de tal forma, que puedan utilizar los servicios proporcionados por el sistema de comunicaciones y asegurar de esta manera que un solo usuario no gaste todos los recursos disponibles.

Desde una etapa muy temprana de las comunicaciones modernas, se ha estado trabajando en encontrar el esquema de acceso múltiple que permita que los recursos se compartan entre varios usuarios en forma óptima, con lo que se ha visto que existen diferentes tecnologías de acceso múltiple, y por lo tanto cada sistema puede utilizar una tecnología de acceso en particular e incluso una combinación de ellas dependiendo de sus necesidades y grado de sofisticación [1-3].

En este capítulo se definirán y clasificarán los esquemas de acceso múltiple y se presentarán las características de cada uno de ellos, así como sus ventajas, desventajas y aplicaciones.

1.1 Definición de los esquemas de acceso múltiple.

La tecnología de acceso múltiple define en su caso más simple, la división del espectro de frecuencias de un sistema de comunicaciones y posteriormente cómo se reparten esos canales entre los diferentes usuarios de dicho sistema [4,5].

Por su parte, Jamalipour, et al. en [3] puntualizan que “los esquemas de acceso múltiple son utilizados para permitir que varios usuarios móviles compartan en forma simultánea una cantidad finita del espectro de radio para incrementar la capacidad de un sistema”. En términos generales, un esquema de acceso múltiple es un conjunto de reglas o protocolos por medio de los cuales el sistema sabe cómo utilizar recursos de tiempo, frecuencia o códigos para comunicar un usuario con otro u otros usuarios [4].

De ahí que, el objetivo de un esquema de acceso múltiple es proporcionar un servicio de comunicaciones de forma oportuna, ordenada y eficiente.

1.2 Clasificación de los esquemas de acceso múltiple.

Existen diferentes formas de clasificar los esquemas de acceso múltiple. Desde el inicio de estos esquemas se ha visto que existen dos formas fundamentales para compartir los recursos disponibles, los cuales son: los esquemas con colisiones y sin colisiones [2].

Los esquemas sin colisiones son aquellos que garantizan que una transmisión, de cualquier forma que se haga, sea realizada con éxito, en el sentido que no sea interferida por cualquier otra transmisión. La transmisión sin colisiones puede realizarse en forma dinámica o estática y se puede ver desde el punto de vista de tiempo, frecuencia, código o una mezcla de ellos [2,5].

En la asignación estática de recursos, el canal puede ser dividido proporcionando el intervalo completo de frecuencias (ancho de banda disponible) a un solo usuario por una fracción de tiempo tal como se hace en TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo), o proporcionar una fracción del ancho de banda a cada usuario todo el tiempo así como se hace en FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia), o

proporcionando a cada usuario una porción de ancho de banda por una fracción de tiempo. Los sistemas basados en la tecnología de espectro-disperso para lograr CDMA (Acceso Múltiple por División de Código), asignan un código de identificación a cada usuario como se verá en la sección 1.5, pero además cada uno de dichos usuarios puede tener asignado una ranura de tiempo y una banda de frecuencia.

De lo anterior, es sencillo inferir que en la asignación estática podría presentarse alguna situación donde se desperdicien recursos, los cuales podrían ser mejor aprovechados por usuarios que requieran mayores velocidades de transmisión. Para estas aplicaciones se tiene la asignación dinámica, la cual distribuye los canales a los usuarios de acuerdo a la demanda del sistema. De esta manera, se les asignan pocos recursos a los usuarios poco activos y les dan más recursos a los usuarios que requieran transmitir una mayor cantidad de información. Este tipo de asignación se puede realizar por medio de varios esquemas de reservación, en los cuales los usuarios primero anuncian su intento por transmitir y todos aquellos que hayan sido anunciados, transmitirán antes que los nuevos usuarios tengan oportunidad de anunciar su intento de transmitir.

Otro esquema bastante común es el llamado *token passing*, en el cual una marca o símbolo (lógico o físico) se pasa a través de los usuarios, permitiendo que el usuario que tenga el *token* sea el único que pueda transmitir, garantizando de esta manera que no habrá interferencia entre usuarios.

Los esquemas con colisiones son aquellos que no garantizan la transmisión de la información de un usuario. Estos esquemas siempre deben de definir una manera de resolver conflictos una vez que estos ocurran, de tal forma que todos los mensajes sean eventualmente transmitidos con éxito [2,5,6].

Así como en los esquemas sin colisiones, existen resoluciones estáticas y dinámicas. Una resolución estática se basa por ejemplo en la bandera o etiqueta (ID) que tiene un usuario para identificarlo dentro del sistema. Una resolución estática también puede ser probabilística, esto es, el plan de transmisión para los usuarios interferentes se escoge de una distribución fija que es independiente del número real de usuarios interferentes. La resolución dinámica se basa en el tiempo de arribo, dando la mayor (o menor) prioridad a los mensajes que tienen más tiempo dentro del sistema. En otro caso, la resolución dinámica puede ser probabilística tomando en cuenta que sus estadísticas

cambian de acuerdo a la cantidad de interferencia que exista en el sistema [5]. Esta clasificación se resume en la figura 1.1. Un punto importante a resaltar, es que la implementación de cada uno de estos esquemas de acceso múltiple dependerá del tipo de sistema que se desee, debido a que cada esquema tiene protocolos específicos que como se mencionó anteriormente, son los que determinarán las características de un sistema de comunicaciones [2].

En esta tesis, el enfoque será hacia las técnicas sin colisiones, debido a que el resto de los esquemas se utilizan para otro tipo de situaciones fuera de los objetivos planteados.

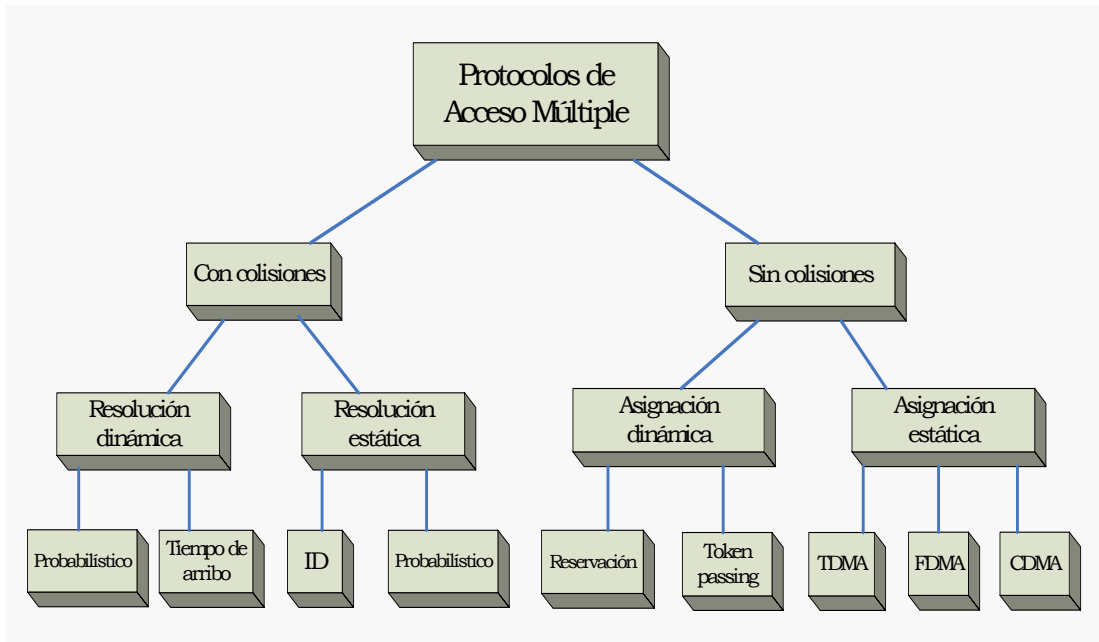


Figura 1.1 Clasificación de los esquemas de acceso múltiple [2].

1.3 Acceso Múltiple por División de Frecuencia.

1.3.1 Antecedentes Históricos.

FDMA surgió de la necesidad de proporcionar un sistema vía satélite con una mayor capacidad que aquellos sistemas de comunicación con tendido submarino entre Estados Unidos y Europa.

El primer satélite geoestacionario comercial de comunicaciones INTELSAT I, fue lanzado en 1965 y utilizaba la tecnología de FDMA [7]. Este tipo de acceso múltiple, al permitir que varios usuarios pudieran compartir el ancho de banda disponible, se siguió utilizando en los satélites INTELSAT II y III [7,8].

En telefonía celular, FDMA se utilizó por primera vez en el sistema AMPS (Servicio Avanzado de Telefonía Móvil) operando en la banda de los 800 MHz [8,9]. El primer sistema celular analógico automático moderno empezó su funcionamiento en Japón en 1979 y en los países nórdicos en 1981. Los primeros sistemas celulares inalámbricos AMPS comerciales en los Estados Unidos empezaron en octubre de 1983 [8]. Posteriormente, se utilizó en TACS (Sistema de Comunicaciones de Acceso Total) en la banda de 900 MHz y en los teléfonos inalámbricos de generación 1 (*CT1-Cordless Telecommunications 1*) con el objetivo de resolver las limitaciones de la generación cero (*CT0*), trabajando en frecuencias de banda alta de UHF [7].

1.3.2 Definición y características.

En los primeros sistemas de comunicaciones con esquemas de acceso múltiple, el uso de la modulación en frecuencia (FM) permitía dividir el espectro de frecuencias disponible para un sistema dado, en canales de frecuencia, donde cada canal ocupaba una porción del ancho de banda disponible la cual era utilizada por un solo usuario. En este tipo de sistemas, los usuarios utilizan canales de frecuencia separados para evitar que la interferencia que afecte a otros usuarios que estén operando en el sistema, no sea significativa. Esta es la forma más simple y natural de tener un esquema de acceso múltiple y se denomina FDMA.

FDMA divide el ancho de banda disponible en varias bandas de frecuencias que se reparten entre todos y cada uno de los usuarios, es decir, en FDMA se asigna un canal individual a cada usuario que se encuentra en el sistema. Lo anterior se ilustra en la figura 1.2 [4,5].

Estos canales se asignan de acuerdo a la demanda de los usuarios que solicitan el servicio, tomando en cuenta que durante el periodo de la llamada, ningún otro usuario puede compartir la misma banda de frecuencia o canal.

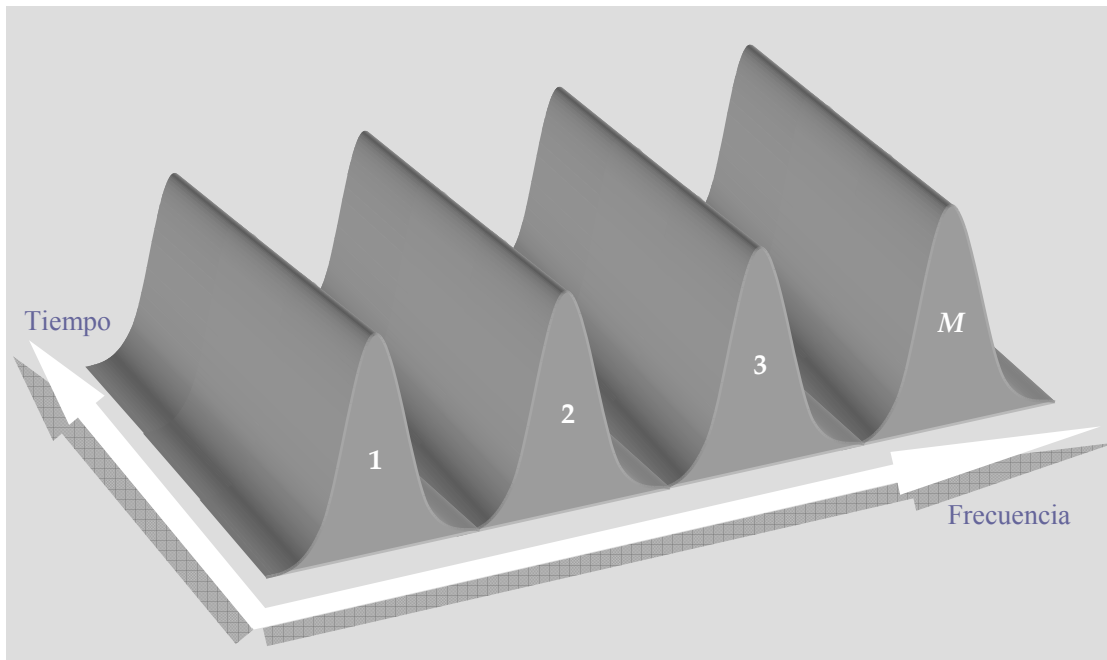


Figura 1.2 Representación del Acceso Múltiple por División de Frecuencia.

Las características de FDMA son las siguientes [4,5,10]:

- ◆ Si un canal de FDMA está inactivo, entonces este canal no puede ser utilizado por otros usuarios para incrementar o compartir su capacidad y se considera como un canal desaprovechado.
- ◆ Después de la asignación de un canal, la estación central y el usuario transmiten continua y simultáneamente.
- ◆ El ancho de banda de los canales puede ser relativamente estrecho por ejemplo de 30 kHz.
- ◆ La complejidad de los sistemas móviles es baja. Como FDMA es un esquema de transmisión continua, se necesitan unos cuantos bits para propósitos de encabezado (por ejemplo para sincronización), que en comparación con TDMA son relativamente pocos.
- ◆ Los sistemas con FDMA tienen un costo más alto comparado con los sistemas con TDMA, debido a que existe la necesidad de utilizar filtros pasa-banda costosos para eliminar las radiaciones espurias de los transmisores.

- ◆ Se necesitan duplexores para que el transmisor y el receptor operen al mismo tiempo, lo cual resulta en un incremento en el costo de las terminales.
- ◆ FDMA requiere de un filtro de RF muy estrecho para minimizar la interferencia de canales adyacentes.

1.3.3 Ventajas y desventajas.

La principal ventaja de FDMA es su simplicidad. Como cada usuario solo debe sintonizar la banda de frecuencia que tiene asignada con un nivel de potencia suficiente, las operaciones que deben realizar los equipos se simplifican, por lo que casi no necesitan de algún tipo de coordinación o sincronización sofisticada.

Los efectos no lineales que se producen en FDMA se consideran una desventaja muy grande, debido a que en este tipo de esquemas muchos canales comparten la misma antena en la estación central y los amplificadores de potencia tienen un comportamiento no lineal cuando operan cerca de la saturación para una eficiencia de potencia máxima. Estas no linealidades provocan un ensanchamiento de la señal en el dominio de la frecuencia y generan armónicas por productos de intermodulación [3-5,7]. La intermodulación es la generación de armónicos indeseables y la consecuencia, además de la pérdida de energía, es un ensanchamiento del espectro provocando interferencia entre canales adyacentes o inclusive a otros sistemas de comunicaciones. Como en FDMA los canales son bandas de frecuencias, estas frecuencias de intermodulación no son deseadas debido a que interfieren con otros canales del mismo sistema [3-5,10,11].

1.3.4 Aplicaciones.

Esta tecnología de acceso múltiple tiene mayor uso en las redes satelitales de datos VSAT, INTELSAT I, II y III y en VITASET que pertenece a los sistemas LEO pequeños [12].

FDMA también se utiliza en los sistemas de telefonía inalámbrica tales como DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) y CT2 (*Cordless Telephone 2*) y en la primera generación de los sistemas de telefonía celular, con estándares tales como TACS, NMT (*Telefonía Móvil Nórdica*) y AMPS, los cuales se caracterizaron por tener solamente servicios de voz [4,5,7-9].

1.4 Acceso Múltiple por División de Tiempo.

1.4.1 Antecedentes históricos.

Contrariamente a otras tecnologías de comunicaciones, TDMA comenzó como un sistema de transmisión a alta velocidad entre estaciones terrenas [5,7,8]. Gracias a que los costos de los equipos digitales fueron disminuyendo, fue posible su aplicación en las comunicaciones vía satélite. Aunque los primeros experimentos en las estaciones terrenas con TDMA comenzaron antes de 1970, no fue hasta los últimos años de la década de 1980's cuando TDMA se convirtió en un método práctico y de bajo costo para las redes VSAT [5,8].

Años después de que los sistemas celulares analógicos como AMPS se introdujeran, se hicieron predicciones de que la capacidad de los sistemas existentes en esa época sería saturada rápidamente durante la década de los noventa, por lo que fue necesario considerar un nuevo esquema de acceso para satisfacer la demanda de este tipo de sistemas [2,3,6-9].

Así, en 1982, la Junta Europea de Administración de Telecomunicaciones y Correo Postal (CEPT) creó un grupo de trabajo llamado Grupo Especial para Comunicaciones Móviles, con el fin de implementar un nuevo estándar para las redes telefónicas en Europa y de esta manera tener un único sistema para que los usuarios pudieran comunicarse de un país a otro sin problema alguno de compatibilidad. A este nuevo estándar se le llamó Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM) y está basado en TDMA.

Paralelamente en Estados Unidos se creó un nuevo estándar basado también en TDMA, el cual fue una evolución de AMPS, naciendo DAMPS (AMPS digital) o IS-54, que implantaba la tecnología digital aprovechando las redes analógicas previas. Estos estándares se consideran parte de la segunda generación de telefonía celular [3,6-8].

1.4.2 Definición y características.

En el acceso múltiple por división de tiempo a cada usuario se le proporciona el ancho de banda del sistema en diferentes intervalos de tiempo, tal como se ilustra en la figura 1.3. A estos intervalos se les llama ranuras de tiempo y en cada una solo se permite un usuario ya sea para transmitir o para recibir. Cabe mencionar que la ranura de tiempo

que se le asigna a un usuario es la misma en cada trama, de modo que cada ranura puede pensarse como un canal que se localiza dentro de una trama, donde M ranuras forman una trama.

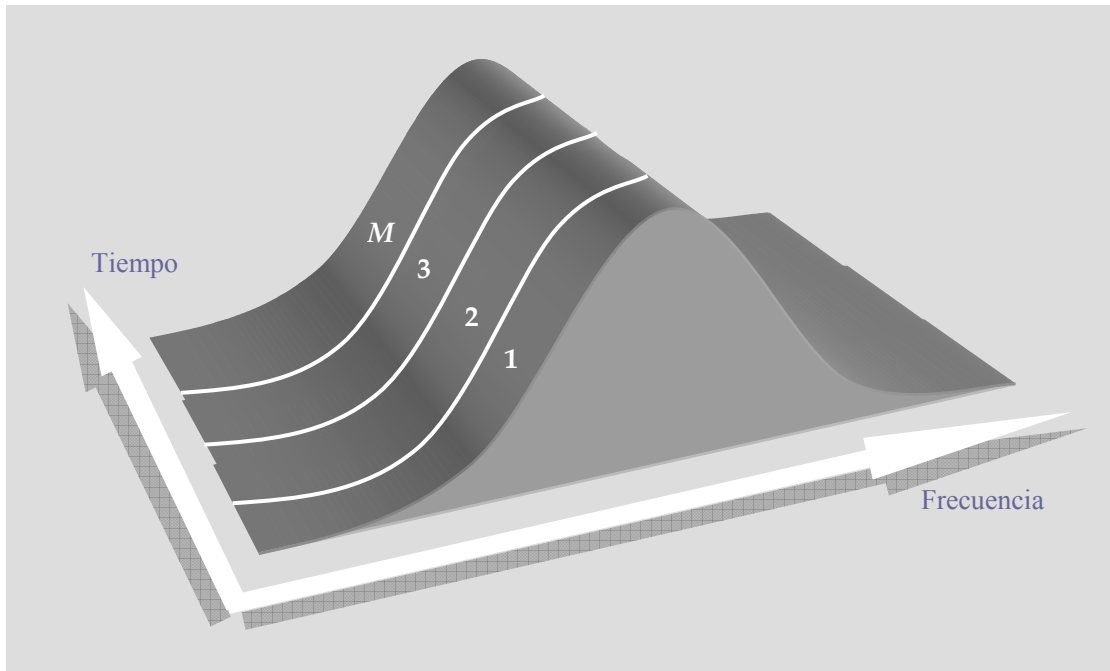


Figura 1.3 Representación del Acceso Múltiple por División de Tiempo.

Los sistemas que se basan en TDMA transmiten los datos utilizando el método “*buffer-and-burst*” [2], de tal forma que la transmisión de cualquier usuario no es continua, lo que implica que los datos que se manejen con TDMA deben de ser digitales.

Para poder sincronizar cada usuario a la ranura que le corresponde y no exista pérdida de información, es necesario que cada trama contenga unos bits de encabezado y direcciones, aparte de los bits de información, para que la estación central y los usuarios se identifiquen unos a otros. También deben de considerarse los tiempos de guarda para permitir la sincronización de los receptores entre diferentes ranuras y tramas [3-7,9].

Las características de TDMA son las siguientes [4-6,10]:

- ◆ TDMA comparte una sola frecuencia portadora con varios usuarios, donde cada usuario hace uso de una ranura de tiempo. El número de ranuras de

tiempo por trama depende de varios factores, tales como la técnica de modulación y ancho de banda disponible.

- ◆ La transmisión de datos en un sistema TDMA en lugar de ser continua se hace en ráfagas, con el fin de tener un consumo de potencia bajo, de tal forma que el usuario puede ser apagado cuando no tenga datos que transmitir.
- ◆ TDMA utiliza diferentes ranuras de tiempo para transmitir y recibir.
- ◆ El tiempo de guarda debe ser el mínimo que sea posible para no desaprovechar el ancho de banda disponible.
- ◆ Se necesita un gran encabezado para la sincronización de las ráfagas de los usuarios y de los tiempos de guarda para que no existan errores.
- ◆ Con TDMA es posible asignar diferentes ranuras de tiempo por trama a diferentes usuarios. Así el ancho de banda puede ser distribuido de acuerdo a la demanda de los usuarios, por ejemplo, reordenándolos de acuerdo a su prioridad.

1.4.3 Ventajas y desventajas.

Comparando TDMA con FDMA se observa una ventaja importante cuando cada banda de frecuencia es a su vez dividida en tiempo, debido a que se aprovecha mucho más el espectro de radio al permitir que más usuarios accedan al sistema, además de que ahora se permite el manejo de datos digitales aparte de las señales de voz.

Como en TDMA se requiere de un alto nivel de sincronización, la decodificación de las señales es más complicada, dando cierto nivel de seguridad en la transmisión de la información [4-6,8].

Otra ventaja es que TDMA se podría desarrollar en base a duplexaje por división de tiempo [4], por lo que se pueden tener equipos y terminales más pequeñas y no tan costosas como en FDMA, además de que el consumo de potencia promedio es bajo debido a que los usuarios no están activos todo el tiempo.

Sin embargo, la principal desventaja de TDMA es el alto nivel de sincronización que se requiere para enviar la información de los usuarios. Como la información se divide para enviarla en ráfagas, es necesario que cada trama tenga el encabezado

suficiente para que cada usuario sea identificado en cualquier momento y además se cuenta con un algoritmo de detección de errores en cada una de las tramas para no perder la mayor cantidad de información en el sistema [3-8].

1.4.4 Aplicaciones.

Esta técnica de acceso se utiliza en el sistema satelital INTELSAT V y en la red satelital SPADE [5].

Actualmente la aplicación más popular de TDMA se da en el sistema de segunda generación de telefonía celular GSM, el cual es un estándar europeo que debido a su alta eficiencia, se ha incrementado su uso en muchos otros países del mundo.

Conforme han surgido nuevas necesidades, los sistemas de comunicaciones han tenido que evolucionar. Tal es el caso de GSM y a partir de este estándar, han surgido otros tales como: GPRS (Servicio de Radio General de Paquetes) de la Generación 2.5 y EDGE (Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM) de la Tercera Generación, todos bajo el esquema de TDMA.

Otros estándares que también son importantes son DAMPS ó IS-54, el cual es una actualización de AMPS y el Sistema Celular Digital Japonés (JDC) que también se basan en TDMA [3,6,9,14].

1.5 Acceso Múltiple por División de Código.

1.5.1 Antecedentes históricos.

El acceso múltiple por división de código inicia con el estudio de la tecnología de espectro disperso para aplicaciones militares y sistemas de navegación [1,15].

En 1935 en Alemania, Kotowski y Dannehl combinaron voz y una señal de ruido de banda ancha, demostrando que si este tipo de señales se dispersan en un ancho de banda amplio, se pueden considerar como ruido de fondo y volverse difíciles de detectar [1].

En 1949, John Pierce escribió un memorando que describe un sistema de acceso múltiple que utiliza un medio común que transporta una señal dispersada y codificada que no necesita estar sincronizada. Posteriormente, Claude Shannon y Robert Pierce

desarrollaron las ideas básicas de operación de CDMA y analizaron los efectos de interferencia del ruido blanco en la transmisión de información [1,3,15,16].

En 1956 Price y Green presentaron la patente del receptor tipo Rake [1,3]. Este tipo de receptor busca las señales de interés provenientes de diferentes trayectorias de propagación y las combina, obteniendo así, una ganancia multi-trayectoria.

En 1978 G. R. Cooper y R. W. Nettleton [1,15] proponen el uso de la tecnología de espectro disperso para los sistemas de telefonía celular.

En 1986, S. Verdu [1] propuso la técnica de detección multi-usuario como una posibilidad de minimizar la probabilidad de error en un sistema que utiliza CDMA.

Qualcomm introdujo CDMA en 1989, haciendo un sistema de prueba implementado en San Diego y en 1990 probó la primera versión de una interfaz común [1,15,16].

Como la eficiencia de CDMA fue probada alrededor del mundo, muchos proveedores de servicios y fabricantes se asociaron con Qualcomm apoyando el uso de la tecnología de CDMA, empezando con la introducción del estándar de CDMA de banda angosta IS-95 en julio de 1993 [16].

El esquema de CDMA primero fue utilizado en los Estados Unidos de América y en algunos países de Asia, lo cual fue el inicio de una generación completamente nueva de sistemas celulares [1,3,16].

En 1995, CDMA fue seleccionado como un estándar para los Servicios de Comunicaciones Personales (PCS) y fue introducido comercialmente [16].

En 1999, la Unión Internacional de Telecomunicaciones seleccionó CDMA como la tecnología principal de la tercera generación de sistemas inalámbricos, lo cual ha permitido que existan redes que tengan una mayor capacidad de tráfico de voz junto con una alta velocidad de transmisión de datos [1,3-5,8,9,14,17].

1.5.2 Definición y características.

En un sistema que utiliza CDMA, el mensaje, el cual se considera de banda angosta, es multiplicado por una señal que tiene un espectro muy grande. Esta señal es una secuencia de pseudo ruido que tiene una tasa de dispersión más grande (en varios

órdenes de magnitud) que la tasa del mensaje, además de que es aproximadamente ortogonal con otras secuencias de pseudo ruido.

Todos los usuarios de un sistema con CDMA, como se ilustra en la figura 1.4, utilizan la misma frecuencia portadora y pueden transmitir simultáneamente. Esto se debe a que cada usuario tiene su propia secuencia de pseudo ruido o código.

Para la detección del mensaje es necesario que el receptor conozca el código utilizado por el transmisor, para que los otros códigos se consideren como ruido de fondo en el sistema. De esta manera, cada usuario opera de forma independiente sin conocimiento alguno de los otros usuarios en el sistema [1,3,4].

Vale la pena resaltar, que la representación de la figura 1.4 podría modificarse a una situación donde además de asignar un código a cada usuario, también se le asigne una porción del ancho de banda e incluso una ranura de tiempo, teniéndose así una combinación frecuencia-tiempo-código, como se verá en la sección 1.6.

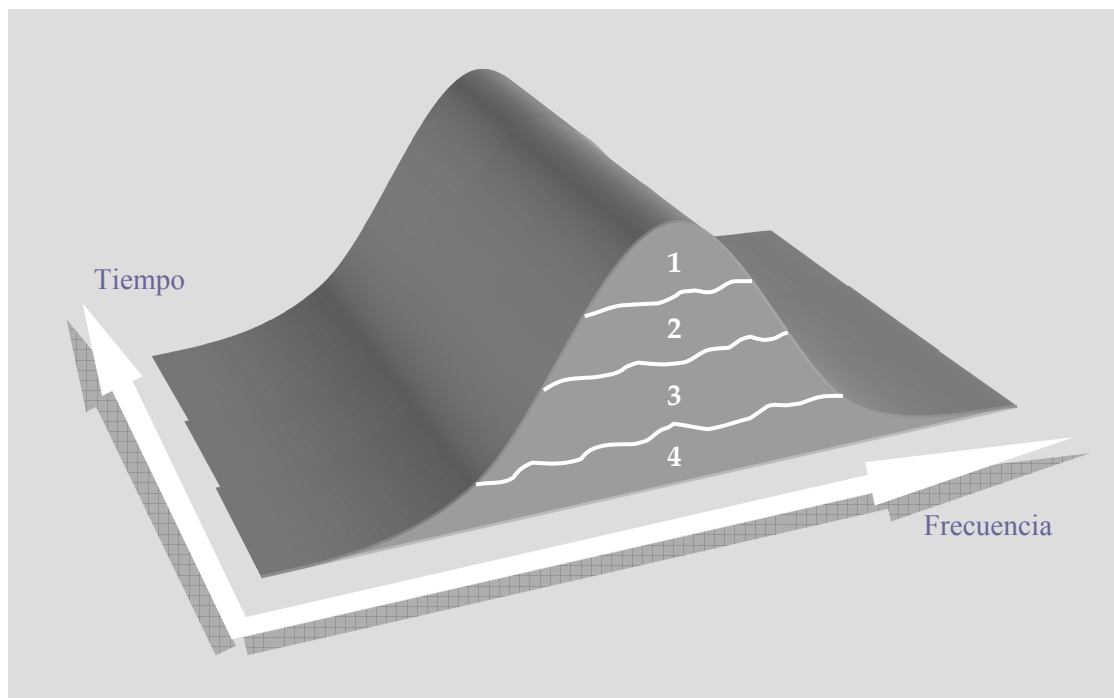


Figura 1.4 Representación del Acceso Múltiple por División de Código.

Las características de CDMA son las siguientes [3-5,10,14]:

- ◆ Varios usuarios comparten la misma banda de frecuencia simultáneamente.
- ◆ La autointerferencia es un problema en CDMA debido a que las secuencias pseudo aleatorias que se utilizan para dispersar las señales de los usuarios no son exactamente ortogonales, por lo que otros usuarios pueden afectar la detección de un usuario en particular.
- ◆ CDMA tiene un límite de capacidad suave ya que se considera un sistema limitado por la interferencia, es decir, el número de canales permitidos depende del nivel de interferencia total que puede ser tolerado. Cada usuario introduce interferencia como una función del nivel de potencia, sincronización y la ortogonalidad de los códigos utilizados. Por ejemplo, si el ruido de fondo aumenta, la detección en un receptor es errónea al no poder distinguir la señal deseada de un usuario en particular. En cambio, si el ruido disminuye, la detección de la señal de un usuario se podría realizar con mayor precisión. De esta manera, el desempeño del sistema se degrada gradualmente conforme la interferencia se incrementa y el desempeño mejora si la interferencia disminuye, por lo que no hay un límite absoluto en el número de usuarios con CDMA.
- ◆ Como en CDMA la señal se dispersa sobre un espectro relativamente grande, se crea diversidad en frecuencia, es decir, las frecuencias que tienen una separación mayor al ancho de banda de coherencia del canal no experimentarán los mismos desvanecimientos, lo cual ayuda a mitigar los efectos de los desvanecimientos multirayectoria.
- ◆ Las tasas de datos en los sistemas con CDMA llegan a ser relativamente altas, por ejemplo, en IS-95B un usuario puede alcanzar una tasa máxima de 115.2 kb/s [9,17].
- ◆ Como CDMA es una técnica de espectro disperso, se tiene ganancia de procesamiento, la cual se define como la ganancia en la Relación Señal a Ruido (SNR) obtenida mediante el uso de espectro disperso, es decir, representa la ganancia que se consigue al procesar una señal de espectro disperso sobre una señal que no está dispersa. Por tanto, conforme se

incremente la secuencia de pseudo ruido, la ganancia de procesamiento aumentará.

- ◆ El problema cerca-lejos ocurre en un receptor si una señal no deseada tiene un nivel de potencia muy grande en comparación con la señal deseada. Este problema se explica en mayor detalle en la sección 1.5.3.

1.5.3 Ventajas y desventajas.

CDMA tiene algunas ventajas que FDMA y TDMA no tienen. Una de ellas es la tolerancia a los efectos de desvanecimiento del canal. Si una porción del espectro se caracteriza por tener desvanecimientos, las señales en ese intervalo de frecuencias son atenuadas. Si se tuviera un sistema con FDMA las señales se verían afectadas en forma muy severa, en cambio con CDMA tal degradación se comparte entre todos los usuarios haciendo que la atenuación que sufre cada una de las señales sea mínima [3,4,9,14,17,18].

Con CDMA se puede lograr un eficiente uso del espectro, debido a que los usuarios se distinguen por su propio código y pueden por lo mismo, utilizar la misma frecuencia al mismo tiempo, como se explicó en la sección 1.5.2 [3-5].

Otra ventaja muy importante es la privacidad. Cuando el código de un grupo particular de usuarios solo se distribuye entre usuarios autorizados, CDMA ofrece un alto nivel de privacidad debido a que las transmisiones no pueden ser fácilmente interceptadas por usuarios no autorizados que no tengan dicho código [1,3].

Sin embargo, un problema considerable en CDMA es la autointerferencia, lo cual limita la capacidad del sistema, como también se explicó en la sección 1.5.2.

En CDMA la potencia de los usuarios en el receptor determina la cantidad de ruido de fondo que existe en el sistema, de modo que si la potencia de cada usuario dentro de una celda no es controlada, entonces surge el problema cerca-lejos. Este problema ocurre cuando muchos usuarios comparten el mismo canal y las señales recibidas de algunos de estos usuarios tienen una potencia muy grande. Lo anterior produce un incremento del ruido de fondo considerado en la detección de las señales deseadas en el receptor, haciendo imposible recuperar este tipo de señales. Para combatir este problema se aplica control de potencia dentro del sistema para asegurar que los niveles de potencia recibida en la estación base provenientes de los usuarios sean

similares, con lo que la estación base frecuentemente debe de enviar información de control de potencia a cada usuario [1,3-5,14].

1.5.4 Aplicaciones.

En los sistemas satelitales ARIES, GLOBESTAR, IRIDIUM y ODYSSEY se planearon para trabajar con CDMA, para proveer una cobertura global de voz y datos [12].

En Estados Unidos, en la segunda generación de telefonía móvil celular se implementó un estándar con CDMA al cual llamaron IS-95 y se considera una evolución de AMPS [1,3,9,15,16]. Sin embargo, debido a la gran demanda de nuevos servicios de datos en este tipo de sistemas, se obtuvo una nueva evolución, dando origen a la tercera generación de telefonía celular, donde estándares como cdma2000, como su nombre lo indica, se basan en el esquema de CDMA [1,3,9,14-18].

Mientras tanto, GSM que se basa en TDMA, también tuvo su propia evolución a tercera generación, pero dadas las características de velocidad de esta nueva generación, evolucionó a UMTS (Servicio Universal de Telecomunicaciones Móviles) el cual tiene dos modalidades basadas en la Interfaz de Radio Terrestre de UMTS (UTRA). La primera se denomina UTRA-FDD, la cual es CDMA con duplexaje en frecuencia y la segunda es UTRA-TDD, que se basa en una combinación de TDMA y CDMA [1,3,14]. De esta manera, se tiene que todos los sistemas de alta velocidad de tercera generación de telefonía celular actuales se basan en este esquema de acceso múltiple [1,3,9,13-18].

Otra aplicación importante de CDMA se da en las redes de datos, televisión y telefonía satelitales tales como Globalstar [19] e Hispasat [20] y en redes de monitoreo y/o control vía satélite como DBSI [21].

1.6 Técnicas híbridas de acceso múltiple.

Una forma de incrementar la capacidad de un sistema se logra al combinar las técnicas de acceso múltiple para aprovechar las características de cada una de ellas y de acuerdo a las necesidades de los sistemas, han surgido diferentes combinaciones.

FDMA/TDMA es un esquema que se utilizó para mejorar la capacidad de AMPS. En este caso, el sistema se basaba en FDMA y después a cada banda de frecuencia se le aplicaba TDMA tal como lo muestra la figura 1.5. Como se puede

observar, en lugar de tener un solo usuario en cada banda, ahora se pueden tener más usuarios (4 en el ejemplo de la figura 1.5) si ahora se les asigna una ranura de tiempo en cada banda de frecuencia.

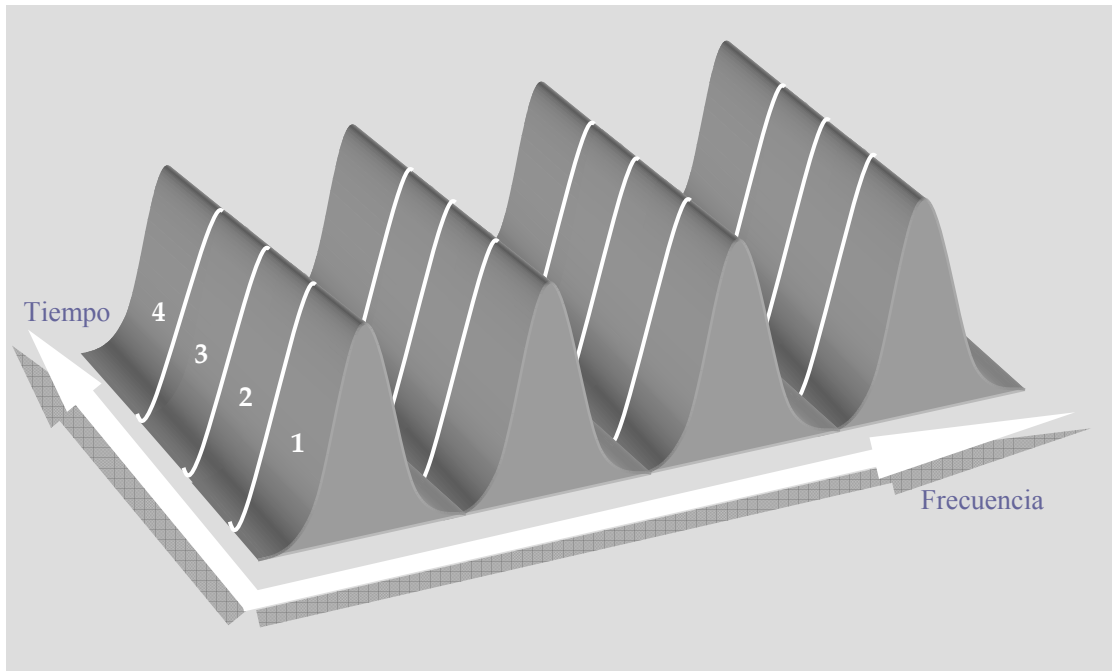


Figura 1.5 Representación de FDMA/TDMA.

Otro esquema que se ha realizado es FDMA/CDMA. En este caso, en lugar de utilizar todo el espectro disponible para dispersar una señal, el espectro se divide en bandas de frecuencias, donde se dispersan las señales de los usuarios con una pequeña pérdida de ganancia de procesamiento en comparación con CDMA “puro”. La ventaja es que se incrementa la capacidad del sistema sin que se pierdan las características de CDMA [4,10]. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 1.6.

Naturalmente, también se podría tener una combinación TDMA/CDMA que permita utilizar el espectro en diferentes ranuras de tiempo, e incluso FDMA/TDMA/CDMA (tal como se mencionó en la sección 1.5.2). Como se observa en estas combinaciones de esquemas, se puede aumentar la capacidad del sistema, pero en algunos casos la demanda es tan grande que aunque se tengan estas propuestas, los recursos no son suficientes.

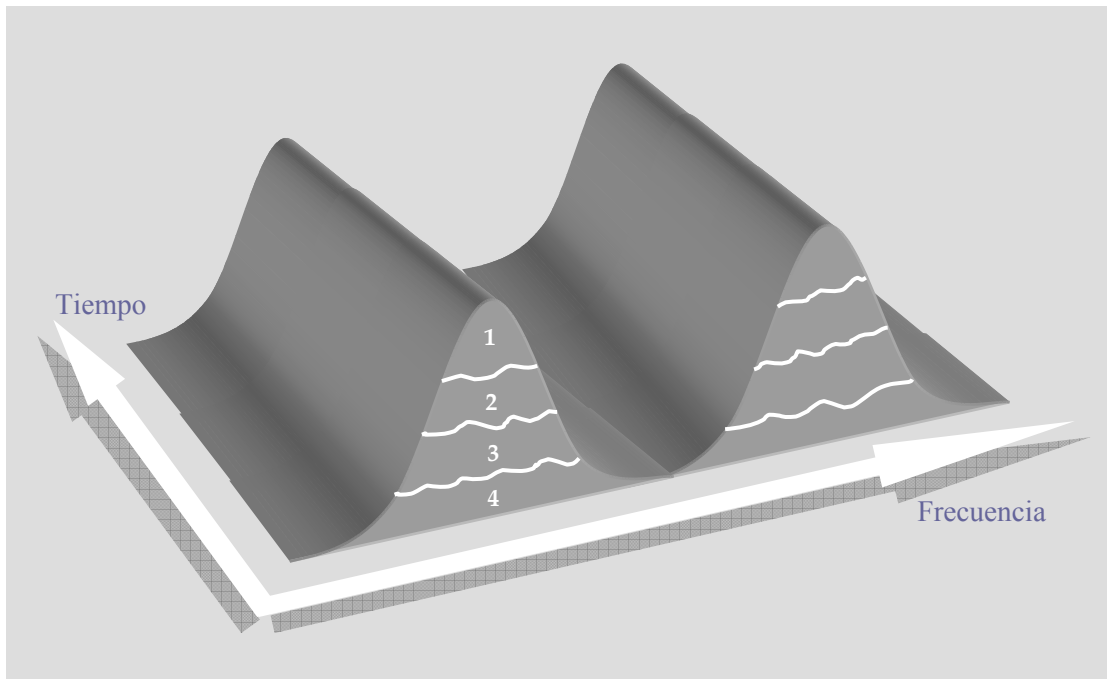


Figura 1.6 Representación de FDMA/CDMA.

Por tal motivo, una posible solución es indagar en nuevas dimensiones para las técnicas de acceso múltiple que ayuden a cubrir la demanda prevista. Siguiendo esta tendencia, surgió una nueva técnica que aprovecha la posición de los usuarios dentro del sistema y se presenta brevemente en la sección 1.7.

1.7 Acceso Múltiple por División de Espacio.

El Acceso Múltiple por División de Espacio (SDMA) es un esquema que generalmente puede proporcionar una alta capacidad en un sistema de radiocomunicaciones, particularmente en sistemas que tengan una estructura celular. Como su nombre lo indica, se pueden identificar a los usuarios aprovechando su posición espacial y asignarlos, por ejemplo, a la misma frecuencia simultáneamente.

En este esquema se utiliza un arreglo de antenas adaptivo para hacer un patrón de haces flexible de acuerdo a las condiciones del sistema y para cada uno de los usuarios. Un sistema con N elementos en el arreglo de antenas podría distinguir hasta $N-1$ usuarios [22].

Una ventaja muy importante de SDMA es que cada usuario puede llegar a compartir el mismo canal ya sea una banda de frecuencia, una ranura de tiempo o un código en la misma área de servicio. Esta propiedad sugiere que SDMA puede incrementar fácilmente la capacidad de un sistema si es implementado con alguna otra técnica de acceso múltiple, ya sea FDMA, TDMA o CDMA.

Un problema es la velocidad del usuario que continuamente cambia su ubicación, por lo que es esencial tener un algoritmo de detección y seguimiento muy preciso. Además, en este esquema no solo es necesario considerar la transferencia intercelular, sino que también se debe considerar una técnica de transferencia intracelular, la cual ocurrirá cuando los haces de dos usuarios que utilicen el mismo recurso estén muy cercanos, con el fin de que no se interfieran mutuamente [13].

1.8 Conclusiones.

En este capítulo se ha presentado el estado del arte de las técnicas de acceso múltiple sin colisiones y la forma en que han evolucionado para cubrir la demanda de capacidad de los sistemas de radiocomunicaciones.

También se presentó brevemente una nueva técnica de acceso múltiple que ofrece una oportunidad para aumentar la capacidad de un sistema, solo que, como se puede observar, necesita de nuevas tecnologías y de nuevos algoritmos de asignación de canales para que el sistema funcione en forma eficiente. Por estas razones SDMA se estudiará a detalle en el siguiente capítulo.

Referencias.

- [1] Korowajczuk, L., Abreu Xavier, B.S., Fartes Filho, A.M., Ribeiro, L.Z., Korowajczuk, C. and DaSilva, L.A., *Designing cdma2000 Systems*, Wiley, 2004.
- [2] Rom, R. and Sidi, M., *Multiple Access Protocols. Performance and Analysis*, Springer-Verlag, 1990.
- [3] Jamalipour, A., Wada, T. and Yamazato, T., “A Tutorial on Multiple Access Technologies for Beyond 3G Mobile Networks”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 43, No. 2, pp. 110-117, February, 2005.
- [4] Rappaport, T.S., *Wireless Communications. Principles & Practice*, Prentice Hall, 1996.
- [5] Sklar, B., *Digital Communications. Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, 1988.
- [6] *A tutorial on TDMA systems*, International Engineering Consortium IEC, 2000.
- [7] Spilker Jr., J.J., *Digital Communications by Satellite*, Prentice Hall, 1977.
- [8] *Técnico en Telecomunicaciones*, Vol.3, Editorial Cultural S.A., 2002.
- [9] Padgett, J.E., Gunther, C.G. and Hattori, T., “Overview of Wireless Personal Communications”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 3, No. 1, pp. 28-41, January, 1995.
- [10] Steele, R., *Mobile Radio Communications*, Pentech Press, 1992.
- [11] Jardón, H., *Fundamentos de los Sistemas Modernos de Comunicación*, Alfaomega, 2001.
- [12] Godara, L.C., “Applications of antenna arrays to mobile communications, Part I: performance improvement, feasibility and system considerations”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 7, pp. 1031-1060, July 1997.
- [13] Piolini, F. and Rolando, A., “Smart Channel-Assignment Algorithm for SDMA Systems”, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, Vol. 47, No.6, June 1999, pp. 8-15.
- [14] Steele, R., Lee, C. and Gould, P., *GSM, cdmaOne and 3G Systems*, Wiley, 2001.
- [15] www.umtsworld.com
- [16] www.qualcom.com
- [17] Knisely, D.N., Kumar, S., Laha, S. and Nanda, S., “Evolution of Wireless Data Services: IS – 95 to cdma2000”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 36, No. 10, pp. 140–149, October, 1998.

- [18] Dahlman, E., Gudmundson, B., Nilsson, M. and Skold, A., “UMTS/IMT-2000 Based on Wideband CDMA”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 36, No. 9, September, 1998.
- [19] www.upv.es
- [20] www.hispasat.com
- [21] www.com.uvigo.es
- [22] Rapajic, P.B., “Information capacity of the space division multiple access mobile communication system”, *Spread Spectrum Techniques and Applications, 1998. Proceedings, 1998 IEEE 5th International Symposium*, Vol. 3, September, 1998 pp. 946 – 950.

2 CAPÍTULO

ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE ESPACIO

En la actualidad los sistemas de comunicaciones móviles se caracterizan por un rápido incremento del número de usuarios, así como por la demanda de nuevos servicios, tales como audio y video de alta calidad, correo electrónico, videotelefonía y servicios de Internet, entre otros [1-3].

Para poder cubrir estas demandas y hacer que las nuevas generaciones de los sistemas de comunicaciones provean una buena calidad en su servicio, es necesario el uso de nuevas tecnologías que incrementen la capacidad de las redes de radiocomunicación.

Una propuesta para lograr los objetivos anteriores, es el uso del Acceso Múltiple por División de Espacio (SDMA por sus siglas en inglés – *Space Division Multiple Access*), el cual se basa en la tecnología de antenas inteligentes [3-4] y aunque parezca una técnica novedosa, SDMA tiene sus orígenes en las comunicaciones satelitales y se ha desarrollado en los sistemas con radares [1,5-7].

SDMA permite que un canal de radio se use simultáneamente por múltiples usuarios de la misma celda, tomando en consideración la posición de los usuarios dentro

de ella, por lo que se requiere de la antena inteligente para optimizar los patrones de recepción y radiación en forma dinámica en respuesta al ambiente que la rodea [1,3-4].

En este capítulo se presenta un estudio de la técnica de SDMA, así como una introducción a la tecnología de antenas inteligentes: los tipos de arreglos y los algoritmos adaptivos que se utilizan. Además de las ventajas y desventajas de aplicar este esquema de acceso múltiple en un sistema de radiocomunicaciones.

2.1 Antecedentes Históricos.

El uso de arreglos de antenas empezó en la Segunda Guerra Mundial para aplicaciones de radares. El diseño de los arreglos trajo consigo la investigación de muchos temas tales como la ganancia, el ancho del haz, los efectos de los lóbulos laterales y el direccionamiento [6].

Posteriormente surgió la tecnología de generación de haces adaptivos, la cual fue desarrollada inicialmente en la década de 1960 para aplicaciones militares de sonares y radares, a fin de eliminar ruido e interferencias no deseados [1,5]. El primer arreglo de antenas completamente adaptivo fue concebido en 1965 por Applebaum, el cual fue diseñado para maximizar la relación señal a ruido (SNR) a la salida del arreglo [1].

Una alternativa que se presentó en 1967 para cancelar las interferencias, es el algoritmo de error cuadrático medio propuesto por Widrow [1,5]. Tiempo después Frost y Griffiths mejoraron este algoritmo al introducir restricciones para asegurar que las señales deseadas no sean filtradas junto con las señales no deseadas [1,5,6].

Una técnica diferente fue propuesta en 1969 por Capon llamada Método de Máxima Similitud [1,2,5,6,8]. En 1974 Reed, et al. demostraron las ventajas de la técnica de Inversión de la Matriz, la cual determina directamente los pesos del arreglo de antenas [5,6].

En los últimos años se han hecho diferentes prototipos de antenas inteligentes en diversos tipos de sistemas, por ejemplo, en 1996 Stapleton, et al. [9] presentan el prototipo de una antena inteligente en un ambiente suburbano con ensombrecimientos planos, y proponen un algoritmo de seguimiento, el cual mantiene el haz principal en la dirección del usuario para diferentes trayectorias y diferentes velocidades. En sus

resultados muestran un incremento en el desempeño del sistema debido a la reducción de la interferencia co-canal en cada celda.

En [10] se presenta la primera estación base con una antena inteligente en operación en el sistema ArrayComm (*Asian PHS Standard*), operando desde 1997. En [11,12] se realizaron pruebas con antenas inteligentes y con algoritmos de detección del ángulo de arribo en un ambiente exterior y un interior. Sus resultados muestran un incremento en la capacidad en ambos ambientes, gracias a la reducción de las interferencias y un mejor desempeño en sistemas de comunicaciones con duplexaje por división de frecuencia FDD (por sus siglas en inglés- *Frequency Division Duplex*).

En el 2001 Mateo Terrés, et al. [13] hacen un estudio de una antena inteligente con un arreglo circular y estiman los parámetros necesarios para su calibración. En [14, 15] se presenta un diseño de una antena inteligente para interiores y en [16] utilizan una antena inteligente en un ambiente interior con señales piloto auxiliares en el enlace de bajada para resolver el problema de la estimación del canal en un ambiente con multitrayectorias.

En el 2003 Gupta, et al. [17] presentan un prototipo del bloque de procesamiento digital de una antena inteligente para un sistema de comunicaciones basado en CDMA de banda ancha. En el 2003, Arraycomm había instalado más de 100,000 antenas inteligentes, de las cuales, 60,000 se utilizan en el Sistema Personal de Telefonía en Japón. La compañía muestra que el costo de una antena inteligente solamente es 15% más alto que el costo de una estación base convencional [18].

En los sistemas de cdma2000 se han propuesto diseños de antenas inteligentes en las estaciones base, con énfasis en la búsqueda y el seguimiento de los usuarios [19], con diferentes técnicas de calibración [20,21], con diferentes estructuras [22] o con diferentes algoritmos de procesamiento de señales [23], con la finalidad de aumentar la capacidad y el desempeño de los sistemas.

De acuerdo a estudios recientes, la tecnología de las antenas inteligentes se encuentra en operación en una de cada diez estaciones base en el mundo y el desarrollo de las antenas inteligentes crecerá un 60% para el año 2008 [7,15].

2.2 Definición de SDMA.

Como se mencionó anteriormente, SDMA es una técnica de acceso múltiple. Sin embargo, a diferencia de otras técnicas, SDMA no puede implementarse por sí sola en un sistema, sino que tiene que aplicarse sobre algún otro esquema de acceso múltiple previamente establecido (FDMA, TDMA, CDMA, etc.) [1,4,5,8,24].

Así, SDMA se usa para crear canales “virtuales” adicionales sin necesidad de requerir más ancho de banda en el sistema, con lo cual se incrementa la capacidad del sistema para atender a más usuarios y se optimiza el uso del espectro [4]. Esto se debe a que SDMA se basa en la separación espacial de los usuarios dentro de una celda, haciendo que se reuse un canal de radio (ya sea una banda de frecuencia, una ranura o un código), tal como se observa en la figura 2.1.

Para aplicar SDMA en un sistema, es necesario el uso de antenas inteligentes para separar temporal y espectralmente las señales recibidas, y así, minimizar las señales interferentes y obtener la señal deseada [5,8,9,24,25]. Por tal motivo en la sección 2.3 se presenta una revisión de las antenas inteligentes.

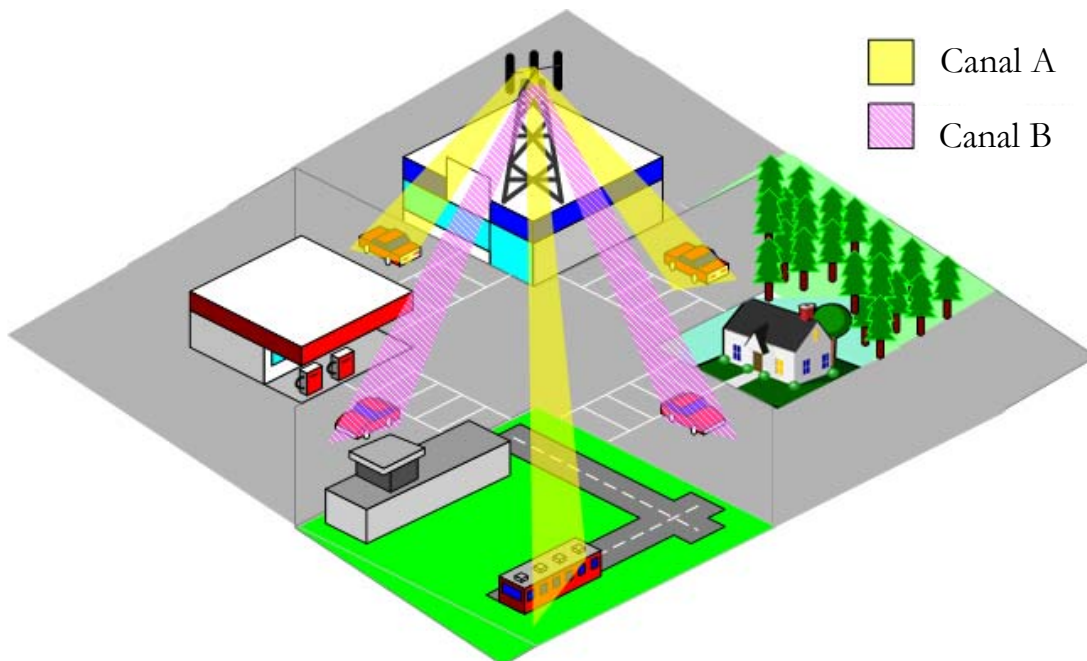


Figura 2.1 Representación del Acceso Múltiple por División de Espacio.

2.3 Antenas Inteligentes.

Una antena inteligente consta de un arreglo de antenas y un bloque de procesamiento digital de señales tal como se presenta en la figura 2.2, donde y representa la salida del sistema, x representa la señal recibida en los N elementos del arreglo y w representa los pesos que serán estimados por el bloque de procesamiento para controlar el patrón de radiación en respuesta al ambiente de radiofrecuencia que la rodea [3,5,26-34]. De esta manera, una antena inteligente puede ajustar automáticamente los patrones de radiación de cada uno de los elementos del arreglo, su respuesta en frecuencia y otros parámetros para identificar la posición espacial de un usuario en particular [3,5,35]. Las señales de salida de cada elemento del arreglo son procesadas en forma individual y adaptiva tomando en cuenta la información espacial de los usuarios que contienen inherentemente dichas señales.

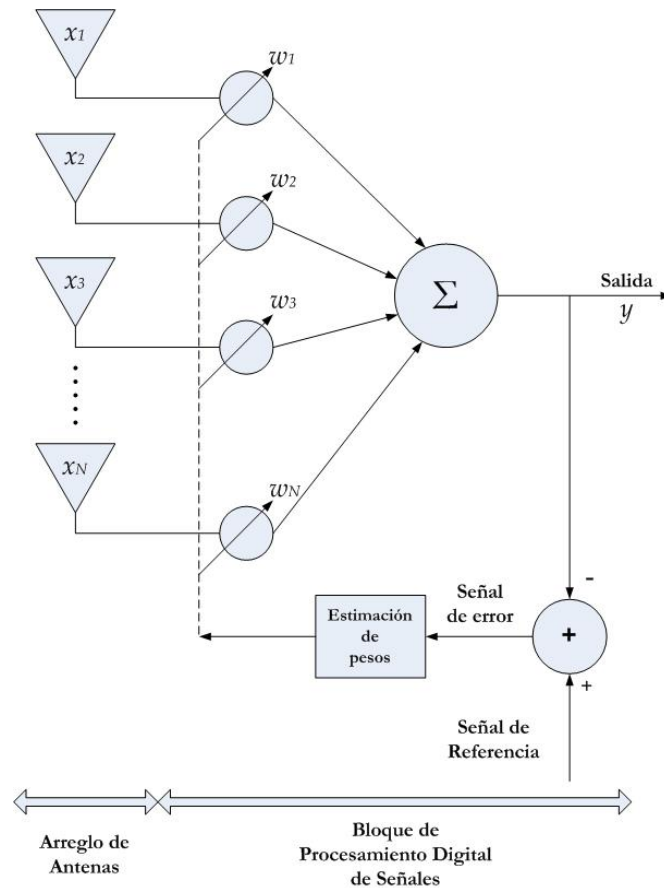


Figura 2.2 Diagrama a bloques de una Antena Inteligente.

Como se puede notar, el arreglo mismo no es “inteligente” sino que es necesario tener un bloque de procesamiento de señales para que en conjunto sí lo sea, es decir, la adaptación de los pesos es la parte inteligente.

Si se realiza una elección apropiada de los pesos, el patrón de radiación del arreglo presenta un lóbulo principal estrecho dirigido hacia el usuario deseado y lóbulos secundarios o nulos dirigidos a las señales no deseadas [3,26-34].

Las antenas inteligentes pueden mejorar la calidad de servicio de un sistema, sin embargo, las diferentes técnicas de procesamiento espacial y los diferentes tipos de arreglos que se encuentran en la literatura, tienen diferentes ventajas y desventajas en cada sistema. En una antena inteligente se pueden utilizar varios tipos de arreglos de antenas, sin embargo, los más comunes son los arreglos uniformes [1-58], es decir, aquellos que mantienen la misma separación entre elementos en todo el arreglo. En las secciones 2.3.2 y 2.3.3 se presenta un estudio de estos bloques.

2.3.1 Parámetros básicos de un arreglo de antenas.

Algunos parámetros y definiciones comúnmente usadas en el estudio de arreglos de antenas se presentan a continuación.

Patrón de Radiación. El patrón de radiación de una antena es la distribución relativa de la potencia radiada en función de la dirección en el espacio. La función que representa el patrón de radiación de un arreglo de antenas $G(\theta, \varphi)$, es el producto entre la función que representa el patrón de cada elemento y el factor de arreglo. Si $f(\theta, \varphi)$ representa el patrón de radiación de cada elemento del arreglo y $F(\theta, \varphi)$ es el factor de arreglo, entonces $G(\theta, \varphi)$ se define como [3,5]:

$$G(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi)F(\theta, \varphi) \quad (2.1)$$

Factor de Arreglo. El factor de arreglo $F(\theta, \varphi)$ es el patrón de radiación de campo lejano de un arreglo, donde θ es el ángulo azimutal y φ es el ángulo de elevación.

Directividad. Es la ganancia máxima de una antena, es decir, es la ganancia en la dirección de la máxima radiación.

Lóbulo Principal. El lóbulo principal de un patrón de radiación es el lóbulo que incluye la dirección de la máxima potencia radiada.

Lóbulos Secundarios. Los lóbulos secundarios son lóbulos del patrón de radiación que no pertenecen al lóbulo principal, es decir, están dirigidos a otras direcciones diferentes a la deseada por lo que generalmente se consideran no deseados, pero son inevitables.

Ancho del Haz. El ancho de haz de una antena es el ancho angular entre puntos del lóbulo principal que se encuentran a 3 dB por debajo del máximo de este lóbulo.

Eficiencia de la antena. La eficiencia de la antena es la relación entre la potencia total radiada por la antena y la potencia total de entrada a la antena.

Lóbulos Parásitos. Cuando la distancia entre elementos en un arreglo de antenas excede $\lambda/2$, donde λ es la longitud de onda de trabajo, aparece un sobremuestreo espacial de la señal recibida provocando que se formen lóbulos secundarios idénticos al lóbulo principal. Este sobremuestreo espacial resulta en ambigüedades en las direcciones de las señales recibidas ya que se manifiestan como copias de la señal deseada en direcciones no deseadas. Este fenómeno es análogo al bien conocido efecto de *aliasing* en el muestreo temporal. En la figura 2.3 se presentan los patrones de radiación de un arreglo lineal uniforme con 12 elementos y diferentes separaciones entre elementos.

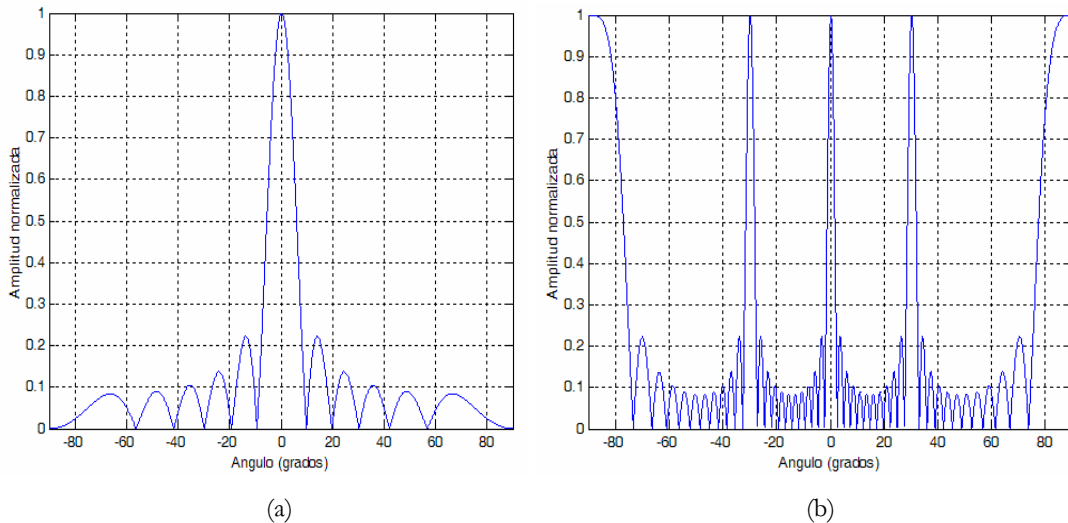


Figura 2.3 Patrones de radiación de un arreglo lineal uniforme con 12 elementos, (a) con una separación de 0.5λ , (b) con una separación de 2λ .

Como se observa en la figura 2.3(a), cuando se tiene una separación de 0.5λ , en el patrón se distingue el lóbulo principal de los lóbulos secundarios, en cambio cuando la

distancia es más grande se observa que ya no se distingue cuál es el lóbulo principal, tal como sucede en la figura 2.3(b) donde la separación entre elementos del arreglo es de 2λ .

2.3.2 Arreglos de antenas.

Una antena es un dispositivo usado para transmitir y recibir energía electromagnética [2,36,41]. En algunas circunstancias una antena de un solo elemento es suficiente para proporcionar el servicio de un sistema de comunicaciones dependiendo de la frecuencia de operación, ambiente y costo, entre otros factores.

Sin embargo, cuando una aplicación en particular requiere de una ganancia muy alta, de un patrón muy directivo, controlar el lóbulo principal o alguna otra función que un solo elemento no puede facilitar, una antena hecha de un arreglo discreto de elementos¹ puede ofrecer una solución a este problema [1,2,36].

El objetivo final para el cual se utiliza el arreglo de antenas afecta la selección del tipo del arreglo, tamaño, el algoritmo adaptivo y la integración con otros componentes del sistema. Aunque los elementos de un arreglo pueden diferir entre ellos, por conveniencia la mayoría de las veces se consideran idénticos tanto analítica como operacionalmente [5,26-34].

En la literatura existen diversos tipos de arreglos de antenas tales como el arreglo lineal, circular, rectangular, plano y elíptico entre otros [2,8,15,24,36,41], sin embargo, debido a su simplicidad, los arreglos lineales y circulares son los más utilizados en los sistemas de comunicaciones [1-58], por lo que a continuación se presentan las características, ventajas y desventajas de estos dos arreglos.

2.3.2.1 Arreglos Lineales.

Un arreglo lineal de antenas está formado por N elementos individuales cuyos centros son separados por una distancia finita d y se encuentran en línea recta tal como se muestra en la figura 2.4 [3-5].

¹ Cabe aclarar que un arreglo discreto de elementos es un arreglo con un número finito de elementos y por simplicidad se usará el término de arreglo de antenas, mientras que para un arreglo continuo se hará referencia donde corresponda.

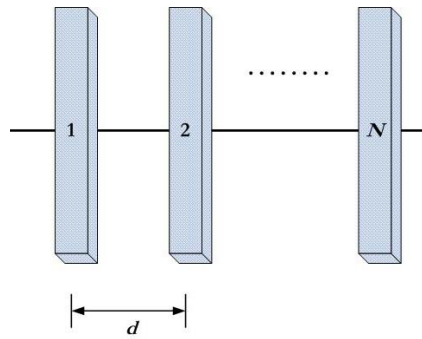


Figura 2.4 Arreglo lineal de antenas.

En general, cuatro parámetros son los que se pueden variar en un arreglo lineal: el número total de elementos, la distribución espacial de los elementos, la función de amplitud de la excitación y la función de fase de la excitación [2,36,41]. A partir de estos parámetros, se pueden determinar las características de radiación apropiadas tales como: el patrón de radiación, la directividad, la ganancia de potencia e impedancias. Por otro lado, el problema es determinar los parámetros de tal manera que la respuesta del arreglo sea lo más cercana a la deseada bajo cierto criterio.

Tomando en consideración la distancia entre elementos del arreglo, existen dos tipos de arreglos lineales: los uniformes y los no uniformes. Los arreglos uniformes son aquellos que tienen la misma distancia entre los elementos que lo componen, en cambio, los arreglos no uniformes son aquellos en que la distancia entre elementos es diferente [41]. En la figura 2.5 se muestra un arreglo lineal uniforme con N elementos idénticos e isotrópicos y un espaciado interlineal denominado como d .

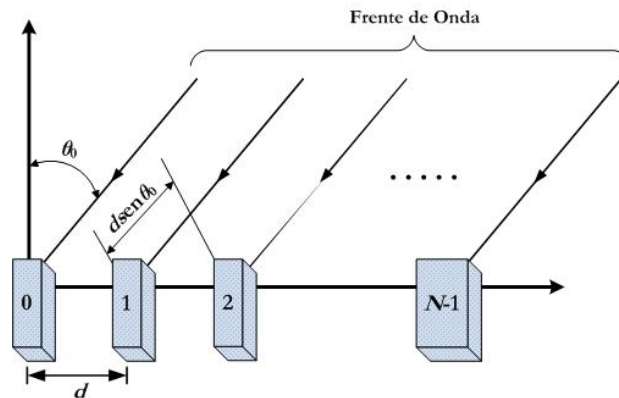


Figura 2.5 Arreglo lineal uniforme.

Si un frente de onda llega al arreglo a un ángulo θ_0 con respecto a la normal del arreglo, el frente de onda llegará al elemento $n+1$ antes que al elemento n , dado que la diferencia entre las dos trayectorias es de $d \sin \theta_0$. Si se representa a la señal de la trayectoria directa como $V = e^{i2\pi f t}$, donde f es la frecuencia de operación, entonces la señal que llega al n -ésimo elemento se representa como $V^n = e^{i2\pi f(t-\tau)}$, donde τ es el retardo de la señal. La diferencia de fase entre las dos señales es $\Delta V = e^{-i2\pi f \tau}$, donde $2\pi f \tau$ es la diferencia de fase $\Delta\varphi$. El retardo τ se calcula:

$$\tau = \frac{\Delta d}{c} \quad (2.2)$$

Donde Δd es la diferencia de distancia entre trayectorias y c es la velocidad de la luz. Entonces:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f \Delta d}{c} = \frac{2\pi \Delta d}{\lambda} \quad (2.3)$$

Suponiendo arbitrariamente que la fase de la señal en el origen es cero, la fase de la señal en el elemento n relativa al elemento 0 es $\kappa n d \sin \theta_0$, donde $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda. Si se suman todas las señales de salida del arreglo, se obtiene el factor de arreglo:

$$F(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j(\kappa n d \sin \theta + n\alpha)} \quad (2.4)$$

Donde A_n es la amplitud de la señal en el n -ésimo elemento y α es el corrimiento de fase entre elementos adyacentes. Si $\alpha = -\kappa d \sin \theta_0$ la máxima respuesta de $F(\theta)$ será en el ángulo θ_0 , es decir, el haz está dirigido hacia la fuente de la señal. Sin pérdida de generalidad se puede suponer que las amplitudes de las señales son:

$$A_n = 1 \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

Así, el factor de arreglo puede escribirse como [1,2,5,6,36,41]:

$$F(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(\kappa n d \sin \theta + n\alpha)} \quad (2.5)$$

En la figura 2.6 se presenta $F(\theta)$ para un arreglo lineal uniforme con 6 elementos y una separación entre elementos de 0.5λ para diferentes ángulos de arribo θ_0 .

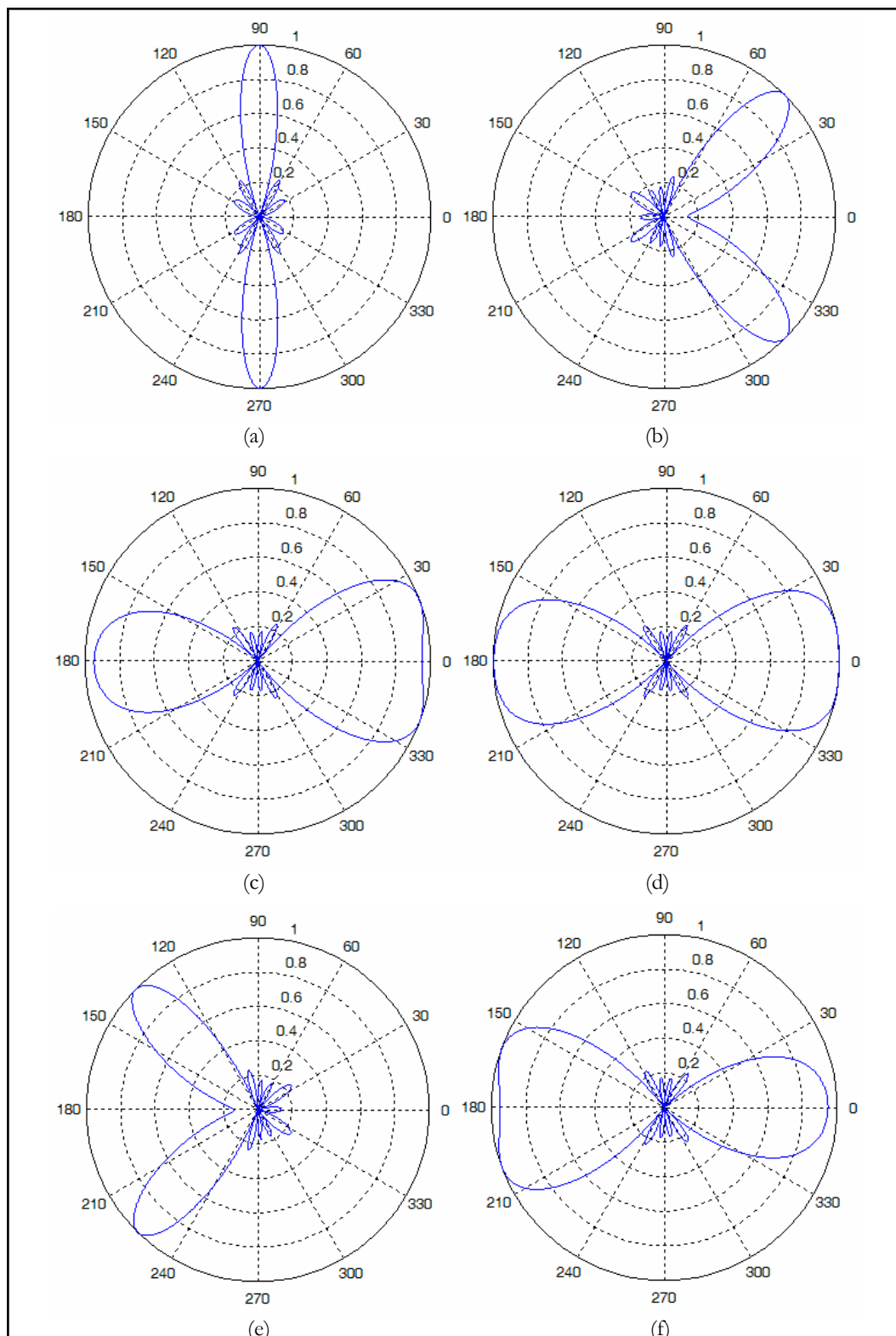


Figura 2.6 $F(\theta)$ de un arreglo lineal uniforme con 6 elementos, (a) Para $\theta_0=0^\circ$, (b) Para $\theta_0=45^\circ$, (c) Para $\theta_0=70^\circ$, (d) Para $\theta_0=80^\circ$, (e) Para $\theta_0=-45^\circ$, (f) Para $\theta_0=-70^\circ$.

En la figura 2.6 se observa que para valores de θ cercanos a 0 ó 180 grados, los patrones de radiación se alteran y presentan ambigüedades en la dirección deseada. De esta forma se concluye que un arreglo lineal solamente tiene una cobertura de 180 grados, debido a que ese es el intervalo en que el patrón de radiación no se deforma.

El factor de arreglo también es función del número de elementos N y la distancia entre elementos d , por lo que es importante observar el efecto de estos parámetros en el patrón de radiación de un arreglo de antenas.

En la figura 2.7 se muestra el efecto de incrementar el número de elementos del arreglo. Se puede observar que se presentan los siguientes fenómenos:

- ◆ El ancho del lóbulo principal decrece, es decir, se hace más estrecho. Esto es crucial para las aplicaciones en antenas inteligentes cuando un solo haz estrecho es requerido para darle cobertura a un usuario.
- ◆ El número de lóbulos secundarios se incrementa además de que sus niveles de potencia decrecen comparados con el lóbulo principal. Los lóbulos laterales representan potencia radiada o recibida en direcciones no deseadas, por lo que en los sistemas de comunicaciones estos lóbulos contribuyen al nivel de interferencia visto por un receptor o al nivel de interferencia propagado por un transmisor en una celda o cierto sector.
- ◆ El número de nulos en el patrón se incrementa. En aplicaciones de cancelación de interferencias, se explota esta característica y se optimizan las direcciones de estos nulos así como se minimiza el nivel de potencia de los mismos.

Es evidente que entre más elementos tenga el arreglo o dicho de otra forma, entre más grande sea el arreglo, las características del patrón de radiación mejoran así como su estructura y grados de libertad.

El espaciamiento entre elementos d también tiene un impacto significativo en la forma del patrón de radiación. En la figura 2.8 se presentan los efectos de variar d en un arreglo lineal con 6 elementos.

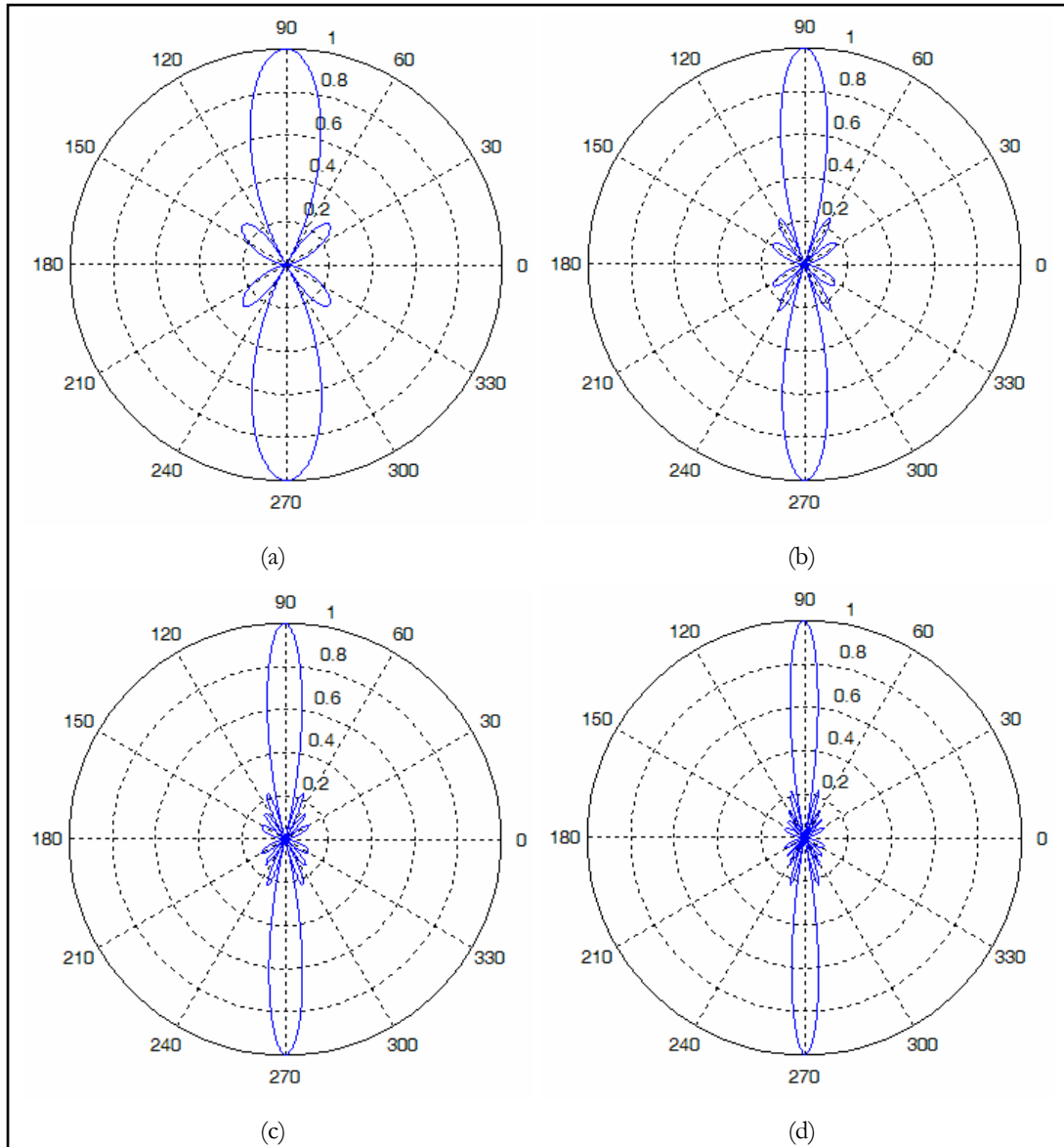


Figura 2.7 Efecto del número de elementos en un arreglo lineal uniforme, (a) 4 elementos, (b) 6 elementos, (c) 8 elementos, (d) 10 elementos

La mayor desventaja de esta configuración es la aparición de los lóbulos parásitos. Como se mencionó en la sección 2.3.1, cuando d excede 0.5λ se produce un sobremuestreo espacial de la señal recibida, provocando que existan dos o más lóbulos principales, lo que provoca errores en la detección de la dirección de la señal deseada dado que se manifiestan copias del lóbulo principal en direcciones no deseadas. Sin embargo, una distancia mayor a 0.5λ mejora la resolución espacial del arreglo (se reduce el ancho del haz), por lo que también se reduce la correlación entre las señales.

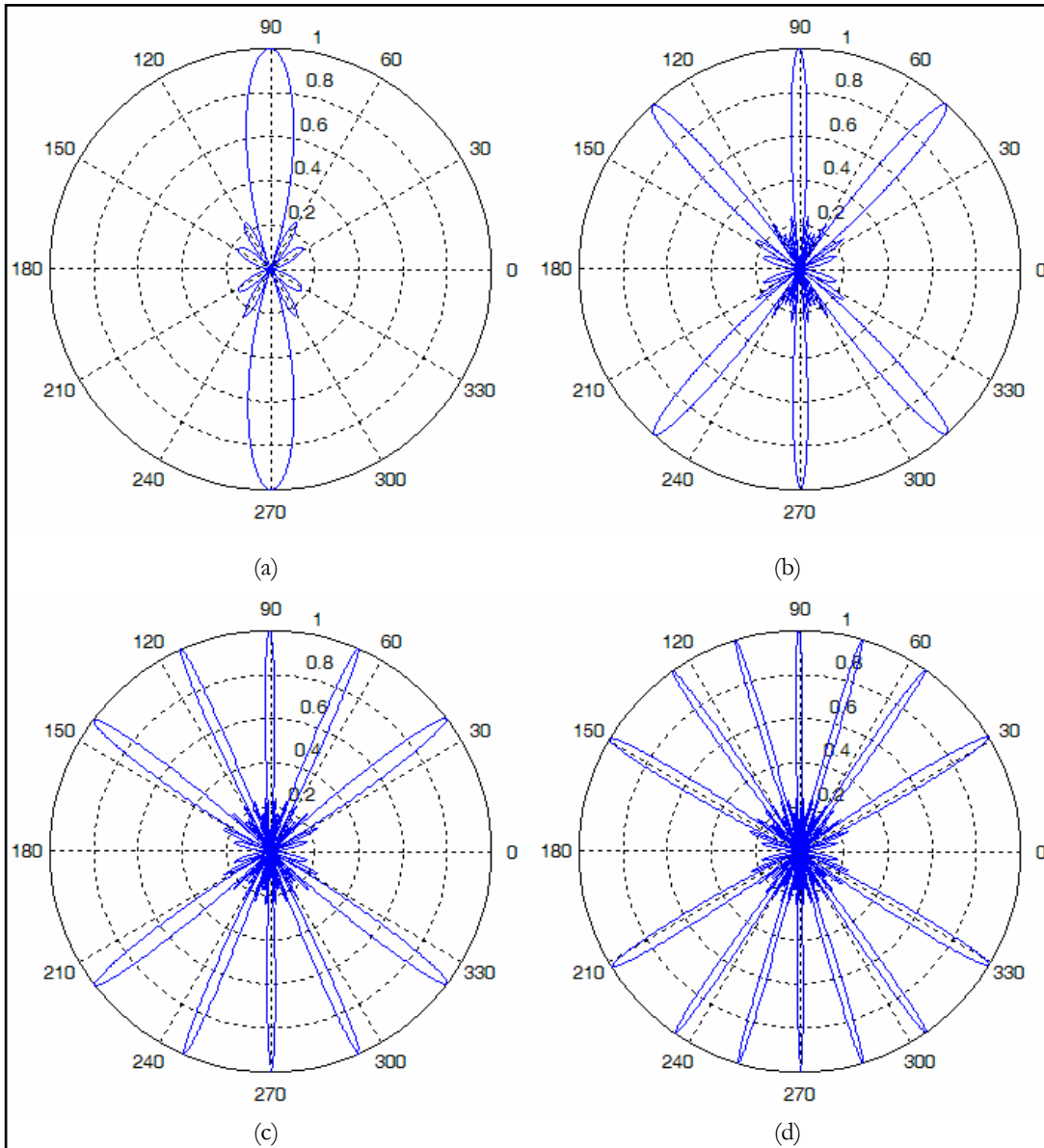


Figura 2.8 Efecto de la distancia entre elementos en un arreglo lineal uniforme, (a) $d=0.5\lambda$, (b) $d=1.5\lambda$, (c) $d=2.5\lambda$, (d) $d=3.5\lambda$.

Por ejemplo, en la figura 2.8(a) se muestra el patrón de radiación de un arreglo cuyos elementos están separados una distancia de 0.5λ . En esta figura se observa que aparte de unos cuantos lóbulos secundarios solo se tiene un lóbulo principal. Cuando se incrementa la distancia a 1.5λ se tiene el patrón de radiación de la figura 2.8(b) y se puede apreciar la aparición de dos lóbulos parásitos. No solo se desaprovecha potencia en el lóbulo parásito sino que también se propaga o recibe más interferencia a través de él. En las figuras 2.8(c) y 2.8(d) se presentan los casos para $d=2.5\lambda$ y $d=3.5\lambda$ respectivamente,

donde se aprecia que conforme se aumenta la distancia entre elementos mayor será la cantidad de lóbulos parásitos que aparecen en el patrón de radiación. En la práctica, para aplicaciones de cancelación de interferencias, el espaciamiento óptimo se considera de 0.5λ [4-36].

En la tabla 2.1 se presenta el impacto de modificar algunos parámetros de un arreglo de antenas lineal uniforme.

Parámetro	Ventajas	Desventajas	Impacto en el desempeño de una antena inteligente
Incremento en el número de elementos	Lóbulos laterales más pequeños. Haces más estrechos. Ganancia muy alta.	Más lóbulos laterales. Arreglos más grandes pueden resultar muy costosos. Limitaciones físicas en la instalación.	Mayor capacidad de cancelación de interferencias. Mejora el desempeño debido a su alta ganancia y haces más estrechos
Incremento en la distancia entre elementos	Haces más estrechos. Ganancia muy alta.	Lóbulos parásitos	Los lóbulos parásitos tienen un impacto negativo, ya que no permiten cancelar interferencias

Tabla 2.1 Parámetros de un arreglo lineal uniforme y sus efectos [3].

2.3.2.2 Arreglos Circulares.

Un arreglo circular consta de N elementos en un círculo de radio R en el plano xy [1,2,5,14, 36]. Si se considera por simplicidad que los elementos son isotrópicos, idénticos y uniformemente espaciados, se obtiene el arreglo de la figura 2.9 [41-54]. El origen del sistema de coordenadas se encuentra en el centro del arreglo.

El ángulo φ es medido hacia abajo desde el eje z y el ángulo azimutal θ se mide en el sentido de las manecillas del reloj desde el eje x . El n -ésimo elemento del arreglo está

desplazado a un ángulo $\theta_n = \frac{2\pi n}{N}$ a partir del eje x .

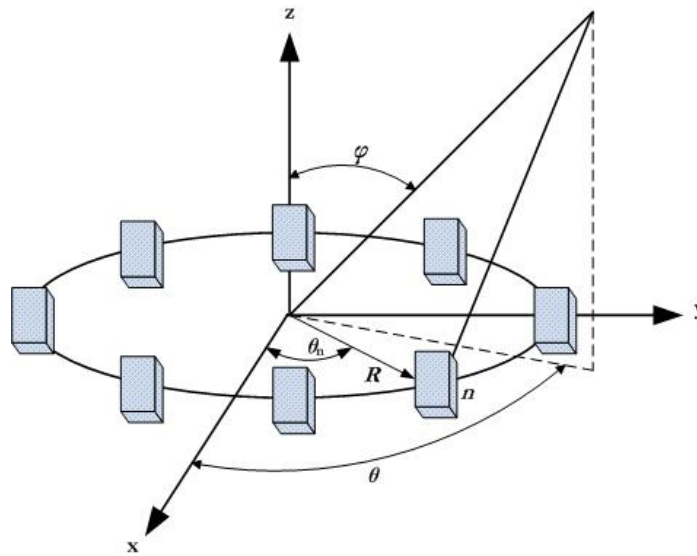


Figura 2.9 Arreglo circular uniforme.

En muchas aplicaciones se considera que $\varphi = \pi/2$ ya que solo interesa el ángulo azimutal [41-54]. En estas condiciones, se tiene la figura 2.10, donde d y $\beta = 2\pi/N$ son la distancia y el ángulo relativo entre elementos adyacentes respectivamente.

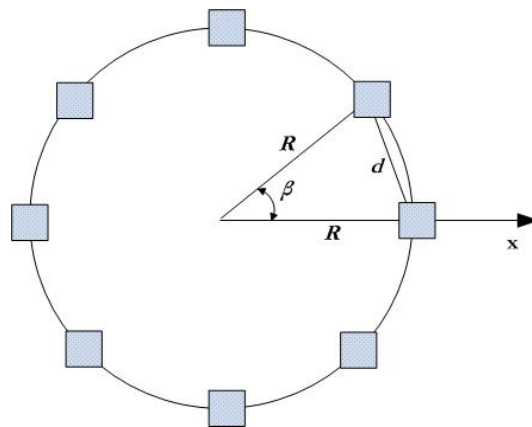


Figura 2.10 Arreglo circular uniforme cuando $\varphi = \pi/2$.

Así como en un arreglo lineal existen parámetros para obtener cierta respuesta, en un arreglo circular también existen cuatro parámetros que se pueden variar: el número de elementos, el radio del arreglo, la función de amplitud de la excitación y la función de fase de la excitación [2,36,41].

El factor de arreglo de un arreglo circular con N elementos igualmente espaciados se define como [37,41,41-54]:

$$F(\varphi, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j[\alpha_n - \kappa R s e n \varphi \cos(\theta - \theta_n)]} \quad (2.6)$$

Donde A_n se define como la amplitud de las señales y α_n es la fase del n -ésimo elemento. Sin pérdida de generalidad se supone que las amplitudes de las señales son:

$$A_n = 1 \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

Así, el factor de arreglo puede escribirse como:

$$F(\varphi, \theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j[\alpha_n - \kappa R s e n \varphi \cos(\theta - \theta_n)]} \quad (2.7)$$

Para que el lóbulo principal se dirija hacia un ángulo (φ_0, θ_0) en el espacio, la fase del n -ésimo elemento se define como:

$$\alpha_n = \kappa R s e n \varphi_0 \cos(\theta_0 - \theta_n) \quad (2.8)$$

En la figura 2.11 se presenta $F(\varphi, \theta)$ para un arreglo circular uniforme con 6 elementos, $\varphi = \pi/2$ y $R = 0.4774\lambda$ para diferentes ángulos de arribo θ_0 . Se puede observar que en comparación con un arreglo lineal, un arreglo circular tiene un área de cobertura de 360° con respecto al ángulo azimutal.

Un parámetro muy importante en un arreglo circular es el radio del arreglo [2,36,41]. Este parámetro debe de ser elegido basado en ciertos criterios de acuerdo a la aplicación. En la literatura, existen dos criterios que ayudan a determinar el radio de un arreglo circular dependiendo de la distancia entre elementos.

El primer criterio se basa en una analogía con un arreglo lineal, donde se considera que la distancia óptima entre elementos es de 0.5λ . Sin embargo, esta sería una distancia lineal y no circular tal como se esperaría dada la forma del arreglo [14,42-47].

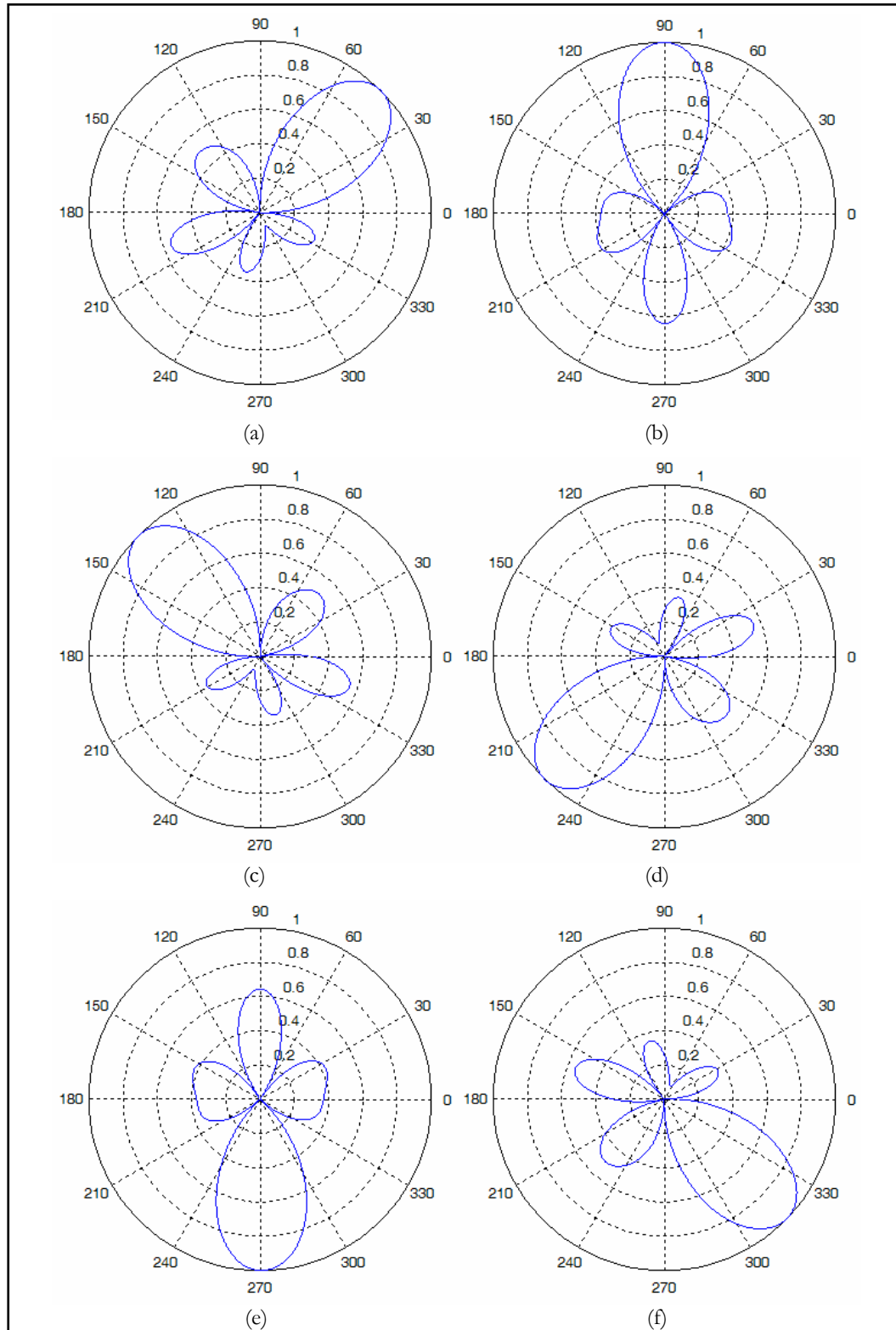


Figura 2.11 $F(\varphi, \theta)$ de un arreglo circular uniforme con 6 elementos, (a) Para $\theta_0=45^\circ$, (b) Para $\theta_0=90^\circ$, (c) Para $\theta_0=135^\circ$, (d) Para $\theta_0=225^\circ$, (e) Para $\theta_0=270^\circ$, (f) Para $\theta_0=315^\circ$.

El segundo criterio se basa en el número de modos que deben ser excitados por el arreglo circular [2,36-39,41,48-51].

Para el primer criterio se considera la figura 2.10, donde el radio del arreglo se encuentra a través de la ley del coseno:

$$d^2 = R^2 + R^2 - 2R^2 \cos\beta$$

$$d^2 = 2R^2 - 2R^2 \cos\beta$$

$$d^2 = 2R^2(1 - \cos\beta)$$

$$d^2 = 2R^2 \left(2\text{sen}^2 \frac{\beta}{2} \right)$$

$$d^2 = 4R^2 \text{sen}^2 \frac{\beta}{2}$$

$$d = 2R \left| \text{sen} \frac{\beta}{2} \right|$$

Si se tiene la misma condición de un arreglo lineal donde $d=0.5\lambda$ entonces:

$$R = \frac{\lambda}{4 \left| \text{sen} \frac{\beta}{2} \right|}$$

$$R = \frac{\lambda}{4 \left| \text{sen} \frac{\pi}{N} \right|} \quad (2.9)$$

Para el segundo criterio, tal como se presenta en el Apéndice A, la selección del radio está en función del número de modos o armónicas que se excitan en el arreglo, dada la distancia entre elementos. De esta manera, se debe cumplir la condición siguiente:

$$d = \frac{2\pi R}{N} < \frac{\lambda}{2} \quad (2.10)$$

En la figura 2.12 se presenta un arreglo circular con $N=8$ elementos y los efectos en el patrón de radiación al variar el radio del arreglo. Se puede observar que a medida que se va incrementado el radio, el número de lóbulos secundarios se incrementa y algunos también aumentan su nivel, mientras que el lóbulo principal se hace más directivo.

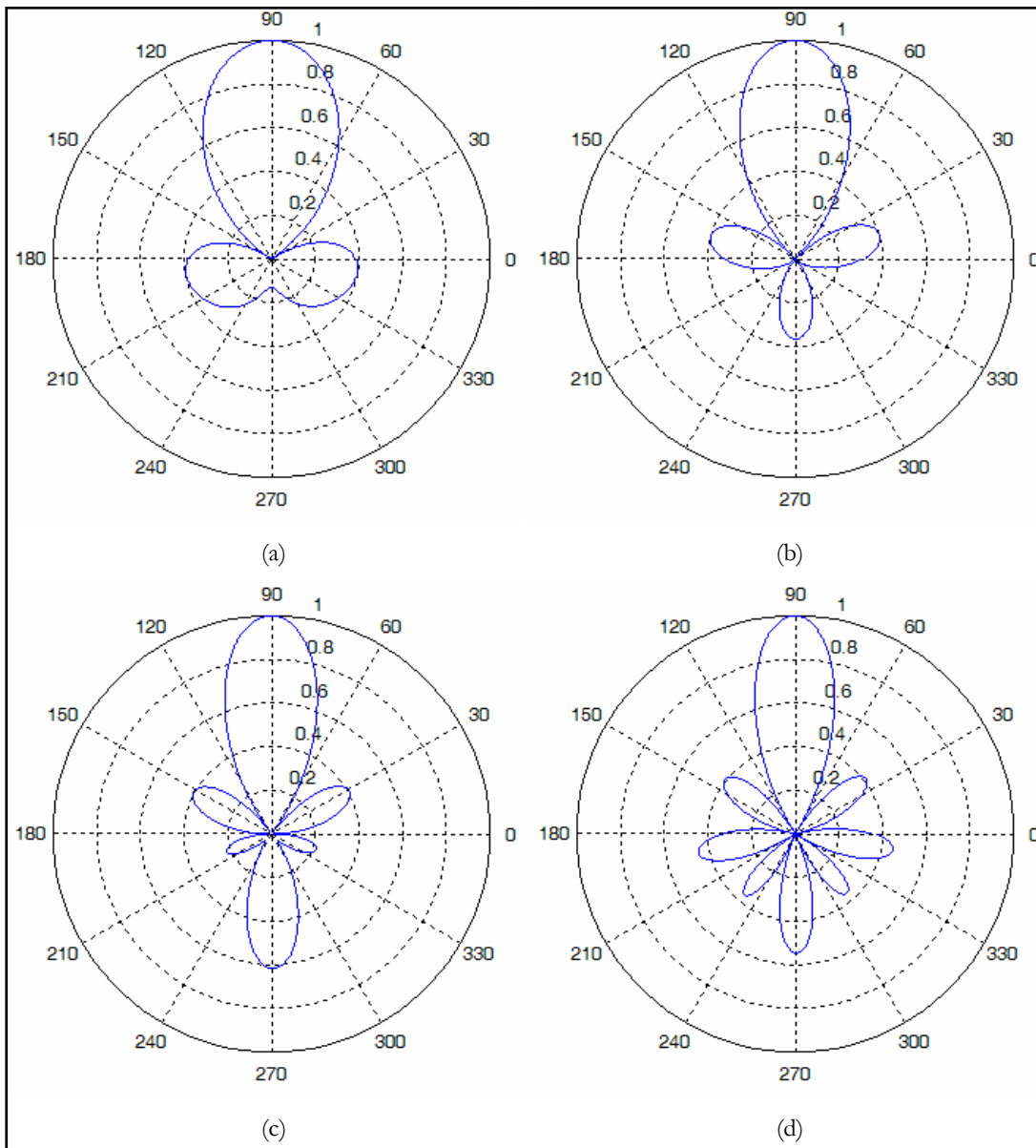


Figura 2.12 Efecto en el patrón de radiación de un arreglo circular uniforme con 8 elementos debido a variaciones del radio, (a) Para $R=0.4\lambda$, (b) Para $R=0.5\lambda$, (c) Para $R=0.6\lambda$, (d) Para $R=0.7\lambda$

Si se mantiene fijo el radio del arreglo $R=0.6366$ y ahora se varía el número de elementos del arreglo, se tienen los resultados que se muestran en la figura 2.13. Se puede observar que a medida de que se incrementa el número de elementos el lóbulo principal se hace más estrecho con la desventaja de que el número de lóbulos secundarios también se incrementa.

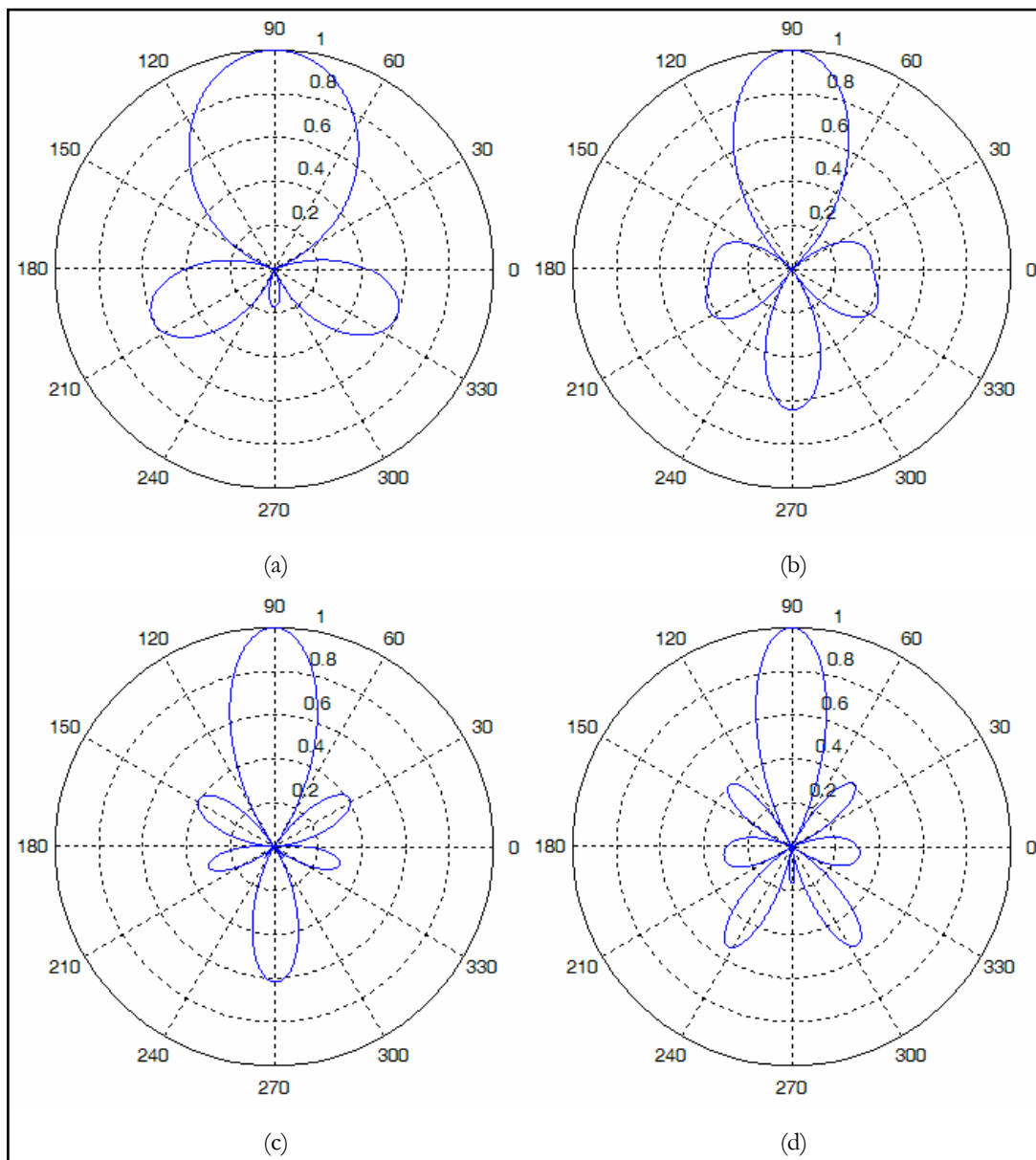


Figura 2.13 Efecto del número de elementos en un arreglo circular uniforme, (a) Para 4 elementos, (b) Para 6 elementos, (c) Para 8 elementos, (d) Para 10 elementos

En la tabla 2.2 se presenta el impacto de modificar algunos parámetros de un arreglo de antenas circular uniforme.

Parámetro	Ventajas	Desventajas	Impacto en el desempeño de una Antena Inteligente
Incremento del radio del arreglo	Haces más estrechos.	Más lóbulos laterales. Incremento en el nivel de algunos lóbulos laterales. Aparición de lóbulos parásitos.	Ayuda a crear diversidad. Mejora el desempeño debido a los haces más estrechos. Los lóbulos parásitos tienen un impacto negativo, ya que no permiten cancelar interferencias
Incremento en el número de elementos	Haces más estrechos.	Limitaciones físicas en la instalación. Incremento en el nivel de algunos lóbulos laterales. Arreglos más grandes pueden resultar muy costosos.	Ayuda a crear diversidad. Mejora el desempeño debido a los haces más estrechos.

Tabla 2.2 Parámetros de un arreglo circular uniforme y sus efectos [2,36,41].

2.3.3. Bloque de Procesamiento Digital de Señales.

Para que un arreglo de antenas sea inteligente, implica que el sistema debe tener cierto grado de sofisticación para que el haz principal tenga una dirección deseada, por lo que los patrones de radiación de una antena inteligente deber ser controlados por algoritmos que sigan determinados criterios. Un arreglo configurado con pesos complejos tiene una gran posibilidad de realizar los objetivos deseados, por lo que solo se necesita un procesador para realizar el ajuste de estos pesos [3,55].

Como se presentó en la Sección 2.3, un bloque importante de una antena inteligente es el bloque de procesamiento de señales, el cual es capaz de separar señales que están dentro de una banda de frecuencias pero que se diferencian en el dominio espacial para distinguir una señal deseada de otras consideradas interferentes. Dicho bloque, es capaz de optimizar automáticamente el patrón de radiación, ajustando los pesos hasta satisfacer cierto criterio establecido, basado en las estadísticas de la señal recibida en el arreglo.

Básicamente, el objetivo es optimizar la respuesta del arreglo para que la salida de la antena inteligente contenga una contribución mínima de ruido e interferencias [1,3-5].

Anteriormente, cuando la tecnología de estado sólido no estaba muy desarrollada, se intentó variar el patrón de radiación de un arreglo circular en forma mecánica, tal como presenta Hejres, et al. en [56], donde se varía la distancia radial de cada elemento para manipular el patrón y atenuar las interferencias. Sin embargo, el sistema no podía responder en forma inmediata debido al lento movimiento del mecanismo para mover los elementos del arreglo.

Actualmente, la implementación de los algoritmos puede ser realizada electrónicamente a través de dispositivos analógicos, pero generalmente es más sencillo realizarlos con un bloque de procesamiento digital de señales, lo cual requiere que la salida del arreglo sea digitalizada con el uso de un convertidor analógico-digital.

Hay dos tipos de generación de patrones de radiación. Cuando los pesos son calculados para un ángulo de arribo fijo se les llama algoritmos fijos, mientras que si el ángulo de arribo es variante en el tiempo, los algoritmos utilizados son los adaptivos. En las siguientes secciones se presentarán los algoritmos más representativos de cada uno de ellos.

2.3.3.1 Algoritmos fijos para optimizar los pesos.

Error cuadrático medio mínimo.

Se supone un sistema donde $s(t)$ es la señal deseada y que se tienen K_u señales interferentes $u_i(t)_{i=1}^{K_u}$ y se considera que la señal deseada llega al arreglo a un ángulo θ_0 y la i -ésima señal interferente llega a un ángulo θ_i . La señal a la salida del arreglo es:

$$\mathbf{x}(t) = s(t)\mathbf{v} + \mathbf{u} = \mathbf{s} + \mathbf{u} \quad (2.11)$$

Donde \mathbf{s} es el vector de las señales deseadas, \mathbf{u} es el vector de las señales interferentes y \mathbf{v} es el vector de direccionamiento, el cual depende del tipo de arreglo que se esté utilizando. Para el caso de un arreglo lineal, el vector de direccionamiento a un ángulo θ_0 se define como [3,5]:

$$\mathbf{v}(\theta_0) = [1, e^{j\kappa d \sin \theta_0}, e^{j2\kappa d \sin \theta_0}, e^{j3\kappa d \sin \theta_0}, \dots, e^{j(N-1)\kappa d \sin \theta_0}]^T \quad (2.12)$$

Donde d es la separación uniforme entre elementos del arreglo, θ_0 es el ángulo de arribo, N el número total de elementos del arreglo, $\kappa=2\pi/\lambda$ y el superíndice T representa la transpuesta del vector.

Para el caso de un arreglo circular, \mathbf{v} se define como [40]:

$$\mathbf{v}(\varphi, \theta_0) = \begin{bmatrix} e^{-j\kappa R \text{sen}(\varphi) \cos(-\theta_0)}, & e^{-j\kappa R \text{sen}(\varphi) \cos\left(\frac{(1)2\pi}{N} - \theta_0\right)}, & e^{-j\kappa R \text{sen}(\varphi) \cos\left(\frac{(2)2\pi}{N} - \theta_0\right)}, & \dots \\ \dots, & e^{-j\kappa R \text{sen}(\varphi) \cos\left(\frac{(N-1)2\pi}{N} - \theta_0\right)} \end{bmatrix}^T \quad (2.13)$$

Donde R es el radio del arreglo, φ es el ángulo de elevación, λ es la longitud de onda de operación, θ_0 es el ángulo de arribo en el plano azimutal, N es el número de elementos del arreglo y $\kappa=2\pi/\lambda$. Si se analiza el caso donde $\varphi=\pi/2$ el vector de direccionamiento es:

$$\mathbf{v}(\theta_0) = \begin{bmatrix} e^{-j\kappa R \cos(-\theta_0)}, & e^{-j\kappa R \cos\left(\frac{(1)2\pi}{N} - \theta_0\right)}, & e^{-j\kappa R \cos\left(\frac{(2)2\pi}{N} - \theta_0\right)}, & \dots, & e^{-j\kappa R \cos\left(\frac{(N-1)2\pi}{N} - \theta_0\right)} \end{bmatrix}^T \quad (2.14)$$

En (2.11), \mathbf{u} representa la suma de todas las señales interferentes:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^{K_u} u_i(t) \mathbf{v}_i \quad (2.15)$$

Donde \mathbf{v}_i es el vector de direccionamiento para la i -ésima señal interferente.

Este método propone obtener el error mínimo entre la señal deseada y la señal de salida del sistema de la antena inteligente $\mathbf{y} = \mathbf{w}^H \mathbf{x}$, donde el superíndice H representa la hermítica del vector. Al no tener la señal deseada, se utiliza una señal $d^*(t)$ de referencia que sea una aproximación o que esté altamente correlacionada con la señal deseada y que no esté correlacionada con las señales interferentes [3,5]. En este algoritmo los pesos son elegidos para minimizar el error cuadrático:

$$\varepsilon^2(t) = [d^*(t) - \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t)]^2 \quad (2.16)$$

Si se toma el valor esperado de ambos lados de (2.16) se tiene:

$$\begin{aligned}\varepsilon^2(t) &= [d^*(t)]^2 - 2d^*(t)\mathbf{w}^H\mathbf{x}(t) + [\mathbf{w}^H\mathbf{x}(t)]^2 \\ E\{\varepsilon^2(t)\} &= E\{d^2(t)\} - 2\mathbf{w}^H E\{d^2(t)\mathbf{x}(t)\} + \mathbf{w}^H E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\}\mathbf{w} \\ E\{\varepsilon^2(t)\} &= E\{d^2(t)\} - 2\mathbf{w}^H\mathbf{r} + \mathbf{w}^H\mathbf{R}\mathbf{w}\end{aligned}\quad (2.17)$$

Donde:

$$\mathbf{r} = E\{d^*(t)\mathbf{x}(t)\} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} \quad (2.19)$$

\mathbf{R} generalmente se conoce como la matriz de covarianza.

Como se puede observar, (2.17) es una función cuadrática con respecto al vector de pesos \mathbf{w} . Esta función se denomina superficie de desempeño o función de costo y forma una superficie cuadrática en el espacio multidimensional. Puesto que los pesos óptimos proporcionan el error cuadrático medio mínimo, se puede encontrar este valor calculando el gradiente de (2.17) con respecto a los pesos e igualando a cero:

$$\nabla_{\mathbf{w}} E\{\varepsilon^2(t)\} = -2\mathbf{r} + 2\mathbf{R}\mathbf{w} = 0 \quad (2.20)$$

Y los pesos óptimos se definen como:

$$\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r} \quad (2.21)$$

Tomando como referencia (2.11), si $s(t) = d^*(t)$, entonces $\mathbf{r} = E\{d^2(t)\}\mathbf{v}$ y $\mathbf{R} = E\{d^2(t)\}\mathbf{v}\mathbf{v}^H + \mathbf{R}_u$, donde $\mathbf{R}_u = E\{\mathbf{u}\mathbf{u}^H\}$. Al invertir \mathbf{R} se tiene:

$$\mathbf{R}^{-1} = \left[\frac{1}{1 + E\{d^2(t)\}\mathbf{v}^H\mathbf{R}_u^{-1}\mathbf{v}} \right] \mathbf{R}_u^{-1} \quad (2.22)$$

Así, la solución óptima es:

$$\mathbf{w}_{opt} = \beta \mathbf{R}^{-1}\mathbf{v} \quad (2.23)$$

Donde β es un escalar y se define como [5]:

$$\beta = \frac{E\{d^2(t)\}}{1 + E\{d^2(t)\}\mathbf{v}^H\mathbf{R}_u^{-1}\mathbf{v}} \quad (2.24)$$

Relación señal a interferencia máxima.

Un criterio para encontrar los pesos óptimos y mejorar la señal recibida y minimizar las señales interferentes, se basa en maximizar la relación Señal a Interferencia (SIR) [5,27-30]. Suponiendo que $\mathbf{R}_s = E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\}$ y $\mathbf{R}_u = E\{\mathbf{u}\mathbf{u}^H\}$ son conocidos, se puede maximizar la razón de la potencia de la señal de salida σ_s^2 y la potencia de la interferencia total σ_u^2 . La potencia de la señal de salida se define como:

$$\sigma_s^2 = E\left\{|\mathbf{w}^H \mathbf{s}|^2\right\} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w} \quad (2.25)$$

Y la potencia de la interferencia de salida es:

$$\sigma_u^2 = E\left\{|\mathbf{w}^H \mathbf{u}|^2\right\} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_u \mathbf{w} \quad (2.26)$$

Así, se tiene:

$$SIR = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_u^2} = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_u \mathbf{w}} \quad (2.27)$$

La SIR puede ser maximizada en (2.27) derivándola con respecto a \mathbf{w} e igualando a cero:

$$\frac{\partial SIR}{\partial \mathbf{w}} = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_u \mathbf{w} (2\mathbf{R}_s \mathbf{w}) - \mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w} (2\mathbf{R}_u \mathbf{w})}{(\mathbf{w}^H \mathbf{R}_u \mathbf{w}) (\mathbf{w}^H \mathbf{R}_u \mathbf{w})} = 0$$

$$\mathbf{w}^H \mathbf{R}_u \mathbf{w} (2\mathbf{R}_s \mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w} (2\mathbf{R}_u \mathbf{w})$$

$$\frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_u \mathbf{w}} = \frac{\mathbf{R}_s \mathbf{w}}{\mathbf{R}_u \mathbf{w}} \quad (2.28)$$

Sustituyendo (2.27) en (2.28) se tiene:

$$SIR = \frac{\mathbf{R}_s \mathbf{w}}{\mathbf{R}_u \mathbf{w}} \quad (2.29)$$

Reordenando los términos se obtienen las siguientes relaciones:

$$\mathbf{R}_s \mathbf{w} = SIR \mathbf{R}_u \mathbf{w}$$

$$\mathbf{R}_u^{-1} \mathbf{R}_s \mathbf{w} = SIR \mathbf{w}$$

La expresión anterior es un problema con eigenvectores donde la SIR representa los eigenvalores. La SIR máxima es igual al eigenvalor más grande para la matriz $\mathbf{R}_u^{-1}\mathbf{R}_s$, el cual es el vector de pesos óptimos, por lo que:

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_u^{-1}\mathbf{R}_s\mathbf{w}_{opt} &= SIR\mathbf{w}_{opt} \\ \mathbf{R}_s\mathbf{w}_{opt} &= SIRR_u\mathbf{w}_{opt}\end{aligned}$$

Dado que $\mathbf{R}_s = E\{d^2(t)\}\mathbf{v}\mathbf{v}^H$, los pesos óptimos se pueden expresar como en (2.23) y la constante β está dada por [5]:

$$\beta = \frac{E\{d^2(t)\}}{SIR}\mathbf{v}^H\mathbf{w}_{opt} \quad (2.30)$$

Varianza mínima.

A este método también se le conoce como respuesta de varianza mínima sin distorsión (MVDR por sus siglas en inglés- *Minimum Variance Distortionless Response*) [5]. El objetivo es minimizar la varianza del ruido de la salida del arreglo. Este método parte de $\mathbf{y} = \mathbf{w}^H\mathbf{x}$ donde \mathbf{x} está definida en (2.11), por lo que:

$$y(t) = \mathbf{w}^H\mathbf{x} = \mathbf{w}^H\mathbf{s} + \mathbf{w}^H\mathbf{u} \quad (2.31)$$

Y la condición de no-distorsión:

$$\mathbf{w}^H\mathbf{v} = 1 \quad (2.32)$$

Para que la señal recibida no se distorsione después del uso de los pesos.

De esta manera (2.31) queda como:

$$y(t) = \mathbf{s} + \mathbf{w}^H\mathbf{u} \quad (2.33)$$

Si las señales interferentes tienen media cero, el valor esperado de la salida del arreglo es:

$$E\{y\} = \mathbf{s} \quad (2.34)$$

Y la varianza es:

$$Var\{y\} = E\left\{\left|\mathbf{s} + \mathbf{w}^H\mathbf{u}\right|^2\right\} = \mathbf{w}^H\mathbf{R}_u\mathbf{w} \quad (2.35)$$

Para minimizar la varianza se aplica el método de Lagrange donde se tiene la siguiente función de costo:

$$J(\mathbf{w}) = \frac{Var\{y\}}{2} + B(1 - \mathbf{w}^H \mathbf{v}) = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_u \mathbf{w}}{2} + B(1 - \mathbf{w}^H \mathbf{v}) \quad (2.36)$$

Donde B es el multiplicador de Lagrange. Como la función de costo es una función cuadrática, puede ser minimizada obteniendo el gradiente con respecto a los pesos e igualando a cero:

$$\nabla_{\mathbf{w}} J(\mathbf{w}) = \mathbf{R}_u \mathbf{w}_{opt} - B\mathbf{v} = 0$$

De esta manera, los pesos óptimos se definen como:

$$\mathbf{w}_{opt} = B\mathbf{R}_u^{-1}\mathbf{v} \quad (2.37)$$

Donde B se encuentra sustituyendo (2.32) en (2.37):

$$B = \frac{1}{\mathbf{v}^H \mathbf{R}_u^{-1} \mathbf{v}} \quad (2.38)$$

Máxima Similitud.

Este método supone que se desconoce por completo la señal deseada y que la señal no deseada tiene una distribución Gaussiana con media cero [1]. El objetivo es definir una función de similitud que proporcione un estimado de la señal deseada.

La distribución se supone Gaussiana, pero la media es controlada por la señal deseada \mathbf{s} , por lo que la función de densidad puede ser definida como una densidad de probabilidad conjunta $p(\mathbf{x}|\mathbf{s})$:

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{s}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} e^{-[(\mathbf{x}-\mathbf{vs})^H \mathbf{R}_m^{-1}(\mathbf{x}-\mathbf{vs})]} \quad (2.39)$$

Donde \mathbf{x} está definida en (2.11). Como los parámetros de interés están en el exponente, se puede trabajar con la función de similitud logarítmica, la cual se define como:

$$L(\mathbf{x}) = -\ln[p(\mathbf{x}|\mathbf{s})] = b(\mathbf{x} - \mathbf{vs})^H \mathbf{R}_m^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{vs}) \quad (2.40)$$

Donde b es una constante.

El valor máximo de $L(\mathbf{x})$ se encuentra derivando (2.40) parcialmente con respecto a \mathbf{s} e igualando a cero:

$$\frac{\partial L(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{s}} = -2\mathbf{v}^H \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{x} + 2\mathbf{s} \mathbf{v}^H \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{v} = 0 \quad (2.41)$$

Se define un estimado de la señal deseada $\hat{\mathbf{s}}$, que minimice (2.41), se tiene:

$$\hat{\mathbf{s}} = \frac{\mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{v}^H}{\mathbf{v}^H \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{v}} \mathbf{x} = \mathbf{w}^H \mathbf{x}$$

Por lo que:

$$\mathbf{w}_{opt} = \frac{\mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{v}}{\mathbf{v}^H \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{v}} \quad (2.42)$$

Si se reacomodan términos, tenemos que:

$$\mathbf{w}_{opt} = \beta \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{v} \quad (2.43)$$

Donde β se define como:

$$\beta = \frac{1}{\mathbf{v}^H \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{v}} \quad (2.44)$$

2.3.3.2. Algoritmos adaptivos para optimizar los pesos.

La selección de algoritmo adaptivo para encontrar los pesos óptimos es muy importante dado que ahora se comparan de acuerdo a su velocidad de convergencia y la complejidad del hardware necesarias para implementarlo [1,5,29,30]. Los algoritmos más utilizados se presentan a continuación.

Algoritmo de la media de mínimos cuadrados.

Este algoritmo llamado LMS (por sus siglas en inglés – *Least Mean Square*), está basado en el método del gradiente, donde la superficie de desempeño es cuadrática y similar a la del algoritmo de error cuadrático medio mínimo.

Establecido lo anterior, los pesos óptimos se definen como en (2.23), sin embargo, ahora no se tiene conocimiento de las estadísticas de la señal para estimar \mathbf{R} y \mathbf{r}

en cada instante de tiempo, por lo que se definen los estimados de sus valores instantáneos:

$$\hat{\mathbf{R}}(n) = \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n) \quad (2.45)$$

$$\hat{\mathbf{r}}(n) = d^*(n)\mathbf{x}(n) \quad (2.46)$$

De esta manera, aplicando el método de pasos descendentes, el gradiente tiene que aproximarse a la función de costo para actualizar el vector de pesos. Para que se actualice este vector en el tiempo $n+1$ se utiliza la siguiente expresión:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{1}{2}\mu[-\nabla(E\{\varepsilon^2(n)\})] \quad (2.47)$$

Donde μ es una constante que controla las características de convergencia del vector $\mathbf{w}(n)$ y ∇ es el gradiente de la función. Si se sustituye (2.20) en (2.47), entonces:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu[\mathbf{r} - \mathbf{R}\mathbf{w}(n)] \quad (2.48)$$

Si se sustituyen los valores estimados de \mathbf{R} y \mathbf{r} en (2.48), se tiene:

$$\hat{\mathbf{w}}(n+1) = \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu\mathbf{x}(n)[d^*(n) - \mathbf{x}^H(n)\hat{\mathbf{w}}(n)] = \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu\mathbf{x}(n)\varepsilon^*(n) \quad (2.49)$$

Cuando el tamaño de paso es lo suficientemente pequeño el proceso permite estimar los pesos en forma óptima, sin embargo, la velocidad de convergencia es lenta, mientras que si el paso es muy grande, es posible que los pesos oscilen alrededor de los pesos óptimos sin alcanzar el valor deseado [5,29]. La principal ventaja de este método es su simplicidad y se considera que su desempeño es aceptable [5,29,35].

Algoritmo de la inversión directa de la matriz de covarianza.

Una de las desventajas del algoritmo LMS es que debe realizar muchas iteraciones antes de satisfacer el criterio de convergencia. Si las características de la señal varían rápidamente, el algoritmo LMS no será capaz de seguirla satisfactoriamente.

Una forma de acelerar el proceso es utilizando el método de inversión directa de la matriz de covarianza, donde se estima la matriz de correlación usando un número determinado de muestras [3,5,57].

Como se mostró anteriormente, (2.23) define los pesos óptimos donde (2.18) y (2.19) definen a \mathbf{R} y \mathbf{r} respectivamente. Sin embargo, las señales no son conocidas y el ambiente cambia frecuentemente, así que el procesador debe actualizar continuamente el vector de pesos de acuerdo a las variaciones del sistema. De esta forma \mathbf{R} y \mathbf{r} se pueden evaluar de la siguiente manera:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{M_1} \sum_{i=1}^{M_1} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^H(i) \quad (2.50)$$

$$\hat{\mathbf{r}} = \frac{1}{M_1} \sum_{i=1}^{M_1} d^*(i)\mathbf{x}(i) \quad (2.51)$$

Donde M_1 es el intervalo de observación del sistema.

Algoritmo de mínimos cuadrados recursivo.

Otra forma de optimizar el tiempo de procesamiento se logra calculando recursivamente \mathbf{R} y \mathbf{r} , por lo que el estimado de estos vectores se define como [3-5]:

$$\hat{\mathbf{R}}(n) = \sum_{i=1}^M \gamma^{n-i} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^H(i) \quad (2.52)$$

$$\hat{\mathbf{r}}(n) = \sum_{i=1}^M \gamma^{n-i} d^*(i)\mathbf{x}(i) \quad (2.53)$$

El factor de pesos γ , donde $0 < \gamma \leq 1$, se usa para asegurar que el dato anterior sea “olvidado” y permitir al procesador seguir las variaciones estadísticas de los datos observados. Si se descomponen (2.52) y (2.53) en dos términos, donde el primero corresponda a la sumatoria para valores superiores de $i=n-i$ y el segundo término corresponda a $i=n$ se tiene:

$$\hat{\mathbf{R}}(n) = \gamma \sum_{i=1}^{n-1} \gamma^{n-1-i} \mathbf{x}(i)\mathbf{x}^H(i) + \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n) = \gamma \hat{\mathbf{R}}(n-1) + \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n) \quad (2.54)$$

$$\hat{\mathbf{r}}(n) = \gamma \sum_{i=1}^{n-1} \gamma^{n-1-i} d^*(i)\mathbf{x}(i) + d^*(n)\mathbf{x}(n) = \gamma \hat{\mathbf{r}}(n-1) + d^*(n)\mathbf{x}(n) \quad (2.55)$$

Si ahora se invierte la matriz de covarianza:

$$\mathbf{R}^{-1}(n) = \gamma^{-1} [\mathbf{R}^{-1}(n-1) - \mathbf{q}(n)\mathbf{x}(n)\mathbf{R}^{-1}(n-1)] \quad (2.56)$$

Donde:

$$\mathbf{q}(n) = \frac{\gamma^{-1} \mathbf{R}^{-1}(n-1) \mathbf{x}(n)}{1 + \gamma^{-1} \mathbf{x}^H(n) \mathbf{R}^{-1}(n-1) \mathbf{x}(n)} \quad (2.57)$$

Para desarrollar la forma recursiva y actualizar el estimado de $\hat{\mathbf{w}}(n)$ se sustituyen (2.55) y (2.56) en (2.21):

$$\hat{\mathbf{w}}(n) = \mathbf{R}^{-1}(n) \mathbf{x}(n) = \gamma^{-1} [\mathbf{R}^{-1}(n-1) - \mathbf{q}(n) \mathbf{x}(n) \mathbf{R}^{-1}(n-1)] \times [\gamma \mathbf{x}(n-1) + d^*(n) \mathbf{x}(n)] \quad (2.58)$$

$$\hat{\mathbf{w}}(n) = \hat{\mathbf{w}}(n-1) + \mathbf{q}(n) [d^*(n) - \hat{\mathbf{w}}^H(n-1) \mathbf{x}(n)] \quad (2.59)$$

Una ventaja importante de este método es que converge mucho más rápido que el algoritmo LMS.

2.3.4. Clasificación y características de una antena inteligente.

Algunos autores [1,3,4,8,15,24], clasifican a las antenas inteligentes como:

- ◆ Con conmutación de haces.
- ◆ Con arreglo adaptivo.

Un sistema con conmutación de haces es un sistema que puede escoger uno de varios patrones predefinidos para mejorar la señal recibida [1,13]. Conforme el móvil se desplaza dentro del área de cobertura, el sistema detecta la potencia de la señal y escoge el patrón predefinido apropiado y conmuta los haces según sea necesario.

El objetivo general es incrementar la ganancia de acuerdo a la posición del usuario. Sin embargo, como los haces son fijos, el usuario deseado puede o no estar en el centro de cualquier haz. Si hay un interferente cerca del centro de un haz activo, provocaría una interferencia muy grande en la señal de interés [29,30].

En la figura 2.14 se muestra un sistema con conmutación de haces y se puede observar que este tipo de sistemas no solo no es capaz de colocar el máximo del haz en el usuario deseado, sino que también es incapaz de rechazar a los usuarios interferentes.

De ahí que estrictamente hablando este tipo de sistema no es propiamente una antena inteligente, sino más bien uno de sus predecesores.

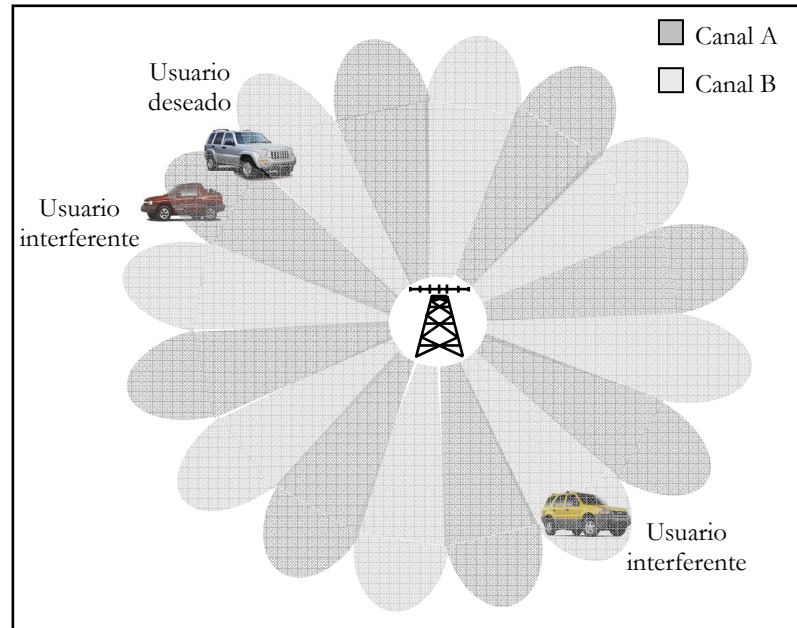


Figura 2.14. Sistema con Conmutación de haces.

Los sistemas con arreglos adaptivos proporcionan un mayor grado de libertad en el sentido de que tienen la habilidad de adaptar en tiempo real el patrón de radiación de acuerdo al ambiente de radiofrecuencia que lo rodea [1,3,5,8]. Es decir, se puede adaptar un patrón de radiación para cada usuario en forma individual, lo cual supera en desempeño a los sistemas con haces conmutados debido a que la potencia transmitida se concentra en la dirección del usuario deseado.

Los sistemas con arreglos adaptivos pueden localizar y seguir la trayectoria de una señal (ya sea del usuario deseado o de los interferentes) y ajustar dinámicamente el patrón de radiación para maximizar la señal deseada y rechazar lo más posible las señales no deseadas, tal como se muestra en la figura 2.1 [3,5,29].

En general, la antena inteligente tiene que reaccionar a los cambios de los parámetros del canal inmediatamente y proporcionar en forma exacta un seguimiento a los usuarios [1-58]. Es importante puntualizar que la “formación” de haces bien definidos hacia cierta dirección de interés y de igual forma, los nulos hacia señales interferentes, podrá llevarse a cabo siempre y cuando no existan muchas multitrayectorias, o bien, exista alguna trayectoria dominante. De otra forma, aunque no

se pueda definir claramente un haz, la respuesta del arreglo puede entregar la máxima SINR, por ejemplo.

Los beneficios de tener una antena inteligente en un sistema son:

- ◆ Un arreglo de antenas tiene un patrón de radiación directivo por naturaleza y esto provoca que se tenga una alta ganancia en la dirección del haz principal [1,2].
- ◆ El número de celdas necesarias para dar cobertura a un área en particular puede ser reducido [5,15,16,24].
- ◆ Proporciona mayor capacidad de comunicación debido al control y reducción de las interferencias por medio de la generación de haces estrechos para separar y distinguir a los usuarios en forma espacial [1,3,29].
- ◆ El fenómeno de multitrayectorias [5,29-34] es uno de los grandes problemas en un sistema de comunicaciones que degrada la calidad del sistema debido a que crea errores en la transmisión, tales como la dispersión de retardo y la interferencia intersímbolo (ISI). En el modo de transmisión, la antena inteligente es capaz de enfocar la energía en la dirección requerida, ayudando a la reducción de las señales reflejadas. En el modo de recepción, mejora la combinación de las señales multitrayectoria, además de poder cancelar algunas de ellas formando nulos en el patrón de radiación en esas direcciones [3-5].
- ◆ La interferencia generada por usuarios del mismo sistema y por usuarios de otros sistemas es reducida significativamente [1,5,27-34,38].
- ◆ El reuso de los canales de un sistema puede ser incrementado porque la interferencia resultante de las señales co-canal en otras celdas se reduce significativamente gracias al filtrado espacial que proporciona el arreglo de antenas, es decir, existe menos interferencia en otras direcciones donde el haz principal no está dirigido, además de la generación de nulos en la dirección de algunas señales no deseadas [3,15,24].
- ◆ Se radía menos potencia al ambiente en comparación con una antena convencional, lo cual se ve reflejado en un decremento de la contaminación

electromagnética. Asimismo, los bajos requerimientos de potencia aumentan la vida de la batería y las unidades se pueden hacer más ligeras y pequeñas [1,2,26-39].

- ◆ Crea diversidad, es decir, por el simple hecho de estar conformada de un arreglo de antenas, se tiene diversidad espacial, además la información que recibe el arreglo es utilizada para combatir los desvanecimientos y otros efectos no deseados. La diversidad se debe a la independencia estadística de las señales recibidas en el arreglo, ya que la probabilidad de que todas las señales recibidas sean afectadas simultáneamente por un desvanecimiento profundo, se considera baja [5,28-34].
- ◆ Se incrementa el alcance del sistema debido a que las antenas inteligentes son más direccionales que las antenas omnidireccionales o las sectorizadas [3-5, 26-34].
- ◆ Las antenas inteligentes hacen más difícil interferir una conexión debido a que el intruso debe estar posicionado en la misma dirección del usuario visto desde la estación base que lo atiende. Por lo que aumenta la seguridad del sistema [3,24].
- ◆ A causa de que las antenas inteligentes detectan la posición espacial de los usuarios, pueden ser usadas para localizar a las personas en situaciones de emergencia [8,10,57].

A pesar de que las antenas inteligentes proporcionan grandes ventajas, también presentan algunas desventajas:

- ◆ Se incrementa la complejidad y los costos del sistema donde se implemente [29,30].
- ◆ Por cada estación base que tenga el sistema, se necesitaría una antena inteligente [1,3,5].
- ◆ Como una antena inteligente requiere de gran capacidad computacional, las estaciones base deben de estar equipadas con procesadores digitales muy poderosos, lo que implica que la complejidad del sistema aumenta [3,29].

Las antenas inteligentes también se pueden implementar en las estaciones móviles, sin embargo, la tecnología de estado sólido todavía no permite su implementación y esta opción resulta complicada debido a que se incrementa la complejidad, tamaño y costo de las unidades, lo cual no resulta conveniente para el usuario, ya que lo que se espera al implementar una nueva tecnología es que provoque los efectos contrarios [1,3,29].

2.4 Características de SDMA.

SDMA tiene características muy peculiares en comparación de los esquemas de acceso múltiple vistos en el capítulo 1. La principal y más importante característica es que SDMA permite el reuso de los canales dentro de una misma celda sin importar si es una frecuencia, una ranura de tiempo o un código, ya que como se pudo analizar en las secciones anteriores, los usuarios de un sistema de comunicaciones pueden ser identificados en forma espacial gracias al uso de las antenas inteligentes [1,10,15,24].

Como se mencionó en la sección 2.2, otra característica de SDMA, es que no puede implementarse por sí sola como técnica de acceso múltiple en un sistema, sino que debe de estar superpuesta en otra técnica de acceso múltiple establecida anteriormente. De esta manera, no se requiere de un aumento del ancho de banda para atender a los nuevos usuarios y al mismo tiempo aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicaciones [3,4,13,20].

En un sistema sin SDMA, al momento en que la cantidad de tráfico en una celda excede su capacidad, es necesario bloquear a los nuevos usuarios. Y si se desea aumentar la capacidad de un sistema se puede aceptar a los nuevos usuarios pero degradando la calidad del servicio o se tienen que crear más celdas, lo que a su vez incrementa el número de transferencias intercelulares, condiciones que en ningún sentido se consideran favorables [1,27-29]. En cambio, si en un sistema se implementa SDMA, los recursos pueden ser reutilizados varias veces y de esta forma atender la demanda del sistema sin necesidad de crear más celdas o de disminuir la calidad del mismo [1,5,6,8,9,25].

Por otro lado, un factor que limita en gran medida la capacidad de un sistema de comunicaciones es la interferencia co-canal, que resulta del reuso de los recursos

disponibles por un sistema [1,3,27-29]. Con el uso de SDMA, se reduce la interferencia co-canal del sistema gracias al filtrado espacial que se logra con la antena inteligente [27-29].

También se logra un incremento en la eficiencia de la transmisión gracias a que se tienen las siguientes ventajas con el uso de SDMA:

- ◆ Se tiene mayor alcance, es decir, se extiende el área de cobertura del sistema [1,5,24].
- ◆ Se puede transmitir con menor potencia y hay un menor consumo de potencia en el móvil, lo cual ayuda a mejorar y facilitar el control de potencia en el sistema [4,57,58].
- ◆ Un sistema con SDMA es robusto a los desvanecimientos multirayectoria debido a su diversidad implícita [1,3,4].
- ◆ La transmisión y recepción espacialmente selectiva de las señales proporciona un incremento sustancial de capacidad, cobertura y calidad en un sistema [5, 15,27-34].

En un sistema con SDMA los efectos de los desvanecimientos multirayectoria se atenúan debido a:

- ◆ La diversidad espacial inherente debido al arreglo de antenas [1,2,36].
- ◆ Se reduce el número de señales multirayectoria recibidas [27-34].

Otra característica en el uso de SDMA es la cantidad de transferencias intracelulares que se requieren, ya que en caso de que un usuario se mueva en la dirección de otro u otros usuarios que comparten el mismo canal, la calidad del enlace de cada uno de ellos se degrada y es necesario que uno o más de ellos sea transferido a otro canal o se deje de darle servicio si no hay canales disponibles [3,4].

Aunque los parámetros específicos dependerán del sistema considerado y del algoritmo de procesamiento del arreglo utilizado, es claro que la implementación de tal sistema requiere una red y una arquitectura compleja [1-58].

El costo del sistema incluye no solo el del hardware para implementar el bloque de control de la antena inteligente, sino que además incluye el de la construcción del arreglo, los amplificadores de radiofrecuencia, los circuitos para controlarlos, entre otros, lo cual provoca que en la actualidad, el costo para implementar la técnica de SDMA en un sistema de comunicaciones sea elevado, aparte de las limitaciones que podrían surgir en la implementación física de la antena inteligente [3].

Para observar algunas de las características de SDMA en un sistema de comunicaciones, se presentan los resultados obtenidos por Jin, et al. en [26]. En este artículo solo se considera el uso de antenas inteligentes en la estación base y se propone la siguiente Relación Señal a Ruido más Interferencia (SINR), para el enlace de subida de un sistema:

$$SINR = \frac{\|\mathbf{w}^H \mathbf{v}_0\|^2}{\left\| \mathbf{w}^H \left(\sum_{i=1}^L \mathbf{v}_i + \mathbf{n} \right) \right\|^2} \quad (2.60)$$

Donde L es el número de interferentes (solo se consideran los que nacen en la misma celda), \mathbf{w} es el vector de pesos, \mathbf{n} es el vector de ruido, \mathbf{v}_0 es el vector de direccionamiento del usuario deseado y \mathbf{v}_i es el vector de direccionamiento del i -ésimo usuario interferente.

Los usuarios están dispersados en una celda hexagonal en forma aleatoria con una distribución uniforme, la atenuación del canal está dado por las pérdidas por distancia (con un exponente de atenuación de 4) y un ensombrecimiento tipo lognormal (con una desviación estándar de 6 dB). Cada estación base está ubicada en el centro de la celda hexagonal y se considera que el canal de radio es simétrico, es decir, el enlace de subida y el enlace de bajada son idénticos.

Las señales recibidas en los elementos del arreglo son combinadas con un conjunto de pesos para generar las estadísticas de decisión para una buena estimación. Estos pesos se ajustan de tal forma que se maximice la SINR de salida. Para la correcta estimación de los pesos se utilizó (2.23), donde \mathbf{R} se define ahora como:

$$\mathbf{R} = \sum_{i=1}^L \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (2.61)$$

Donde σ_n^2 es la potencia de ruido térmico e \mathbf{I} es la matriz identidad.

Se generaron cien mil arribos al sistema con un canal de radio. Se simularon dos tipos de arreglos con diferente número de elementos (4, 8 y 12): un arreglo lineal uniforme y un arreglo circular uniforme por lo que los vectores de direccionamiento para cada uno de ellos están dados por (2.12) y (2.14) respectivamente.

En la tabla 2.3 se presenta el radio del arreglo circular para cada número de elementos de acuerdo a lo analizado por Mathews, et al. [48], donde se utiliza (2.10) y establece un compromiso entre el número de elementos y la contribución de los términos residuales.

Número de elementos	Radio(λ)	Residuos
4	0.3184	0.3529
8	0.6366	0.2811
12	0.955	0.2458

Tabla 2.3 Radio de un arreglo circular para diferente número de elementos.

Debido a que en el sistema existe un proceso de nacimiento y muerte, el canal no siempre va a tener el mismo número de usuarios, por lo que en esta sección se presenta el caso cuando en un instante dado solo se encuentran dos usuarios ocupando un determinado canal de radio.

Como se analizó en la sección 2.3.2.1, un arreglo lineal tiene un área de cobertura de 180° por lo que para cubrir el área requerida (360°) se tienen que emplear dos arreglos de antenas lineales.

La figura 2.15(a) presenta la comparación entre un arreglo circular y dos arreglos lineales con 12 elementos. En este sistema, las pérdidas por trayectoria y el ensombrecimiento no se consideran, por lo que el desempeño del sistema solo es afectado en caso de que la separación angular entre los usuarios sea pequeña o que uno más lóbulos secundarios estén cercanos o coincidan con el usuario interferente.

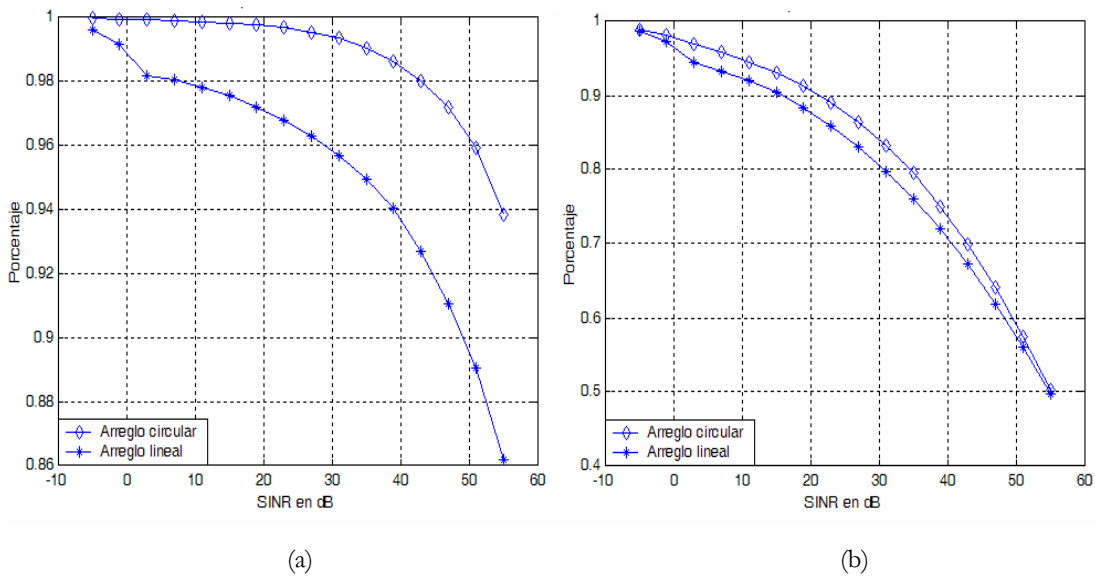


Figura 2.15. Comparación entre arreglos con (a) Ganancia unitaria, (b) Ganancia variable.

Para una SINR=10 dB, los resultados muestran que para un arreglo lineal, alrededor del 98% de los usuarios tienen una SINR de 10 dB, mientras que para un arreglo circular, alrededor del 99.5% de los usuarios tienen dicho valor de SINR.

La figura 2.15(b) presenta el caso donde se consideran las pérdidas por trayectoria y ensombrecimiento para cada usuario. Se puede observar que el desempeño del sistema se degrada en comparación de la figura 2.15(a), debido a que los usuarios ahora no son afectados por las pérdidas por trayectoria y el ensombrecimiento de la misma manera [55], por lo que cuando el usuario de señal débil se considere interferencia, no afectará en forma significativa, en cambio, cuando el usuario con señal fuerte se considere interferente, su aportación será muy grande. También se muestra que el arreglo que tiene un mejor desempeño es el circular.

Si ahora se varía el número de elementos de un arreglo, se obtienen las figuras 2.16(a) y 2.16(b), donde se observa que entre mayor sea el número de elementos del arreglo, mayor será el desempeño del sistema. Tomando nuevamente como referencia en la gráfica el punto de 10dB, se observa que para un arreglo lineal, el incremento del porcentaje de usuarios entre 4 y 8 elementos, es de al menos 5%, mientras que el incremento entre 8 y 12 elementos es de apenas el 2.5%, por lo que se deduce que el crecimiento del desempeño no es tan significativo conforme el número de elementos

aumenta. Este efecto se puede considerar un criterio para seleccionar el número de elementos en un arreglo para un sistema de comunicaciones.

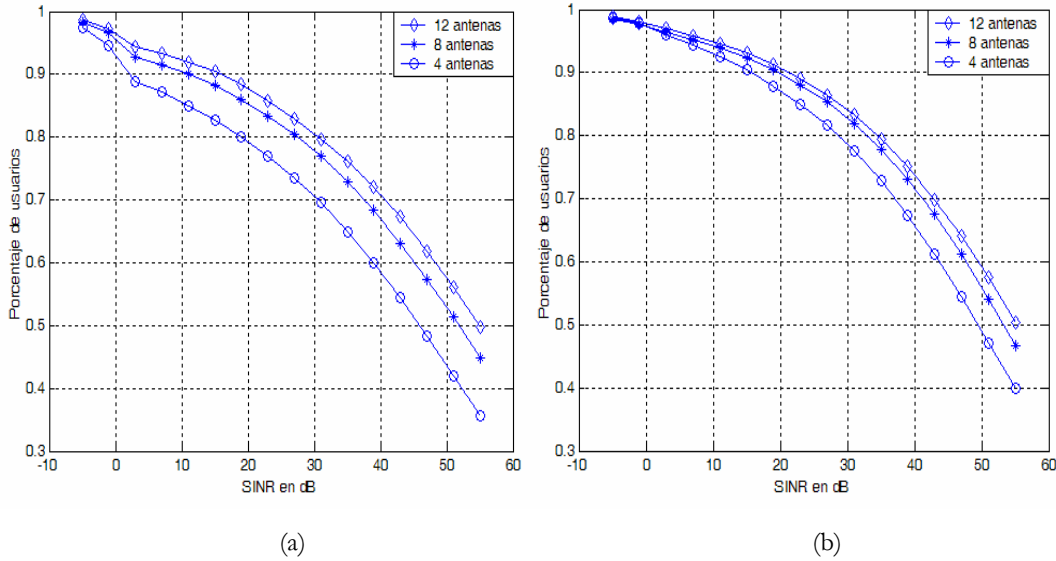


Figura 2.16. Arreglos con diferente número de elementos, (a) Arreglo lineal, (b) Arreglo circular.

En la figura 2.17 se presenta la SINR promedio para cada arreglo donde se consideran las pérdidas en la trayectoria y el ensombrecimiento.

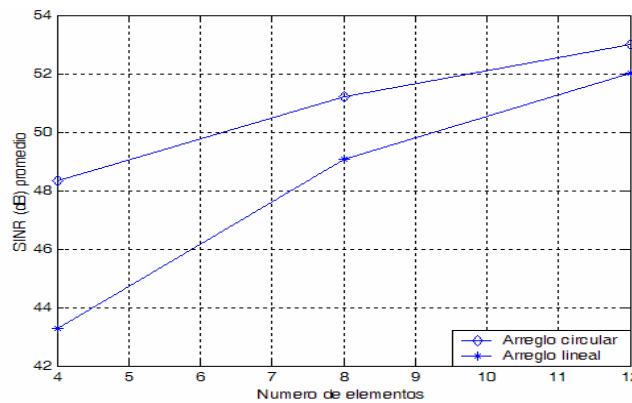


Figura 2.17. SINR promedio para cada arreglo.

Como se puede observar, el arreglo circular presenta un mejor desempeño que la combinación de arreglos lineales. Estos resultados se deben principalmente a que el arreglo circular tiene un mayor control de las interferencias debido a que su patrón de

radiación no se altera para ningún valor de θ , tal como se muestra en la figura 2.18(a). En cambio, la combinación de arreglos lineales, a pesar de que tienen patrones de radiación con haces más directivos como el de la figura 2.18(b), no pueden rechazar correctamente las interferencias para todos los valores de θ , efecto que se ve reflejado en los resultados al reducir el desempeño del sistema.

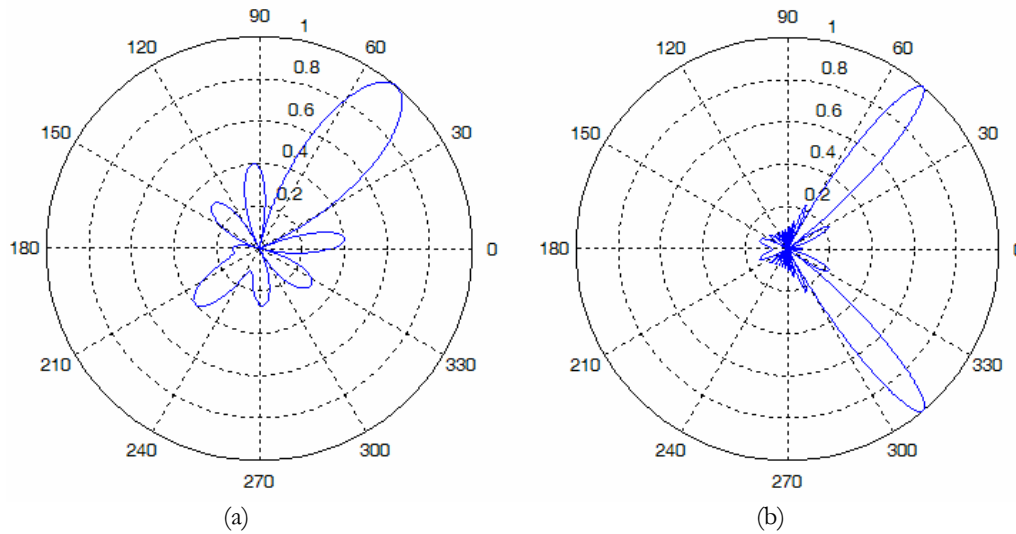


Figura 2.18. Patrones de radiación con 12 elementos (a) Arreglo circular, (b) Arreglo lineal.

Otro artículo que presenta algunas características de SDMA en un sistema de comunicaciones, es el presentado por Zorzi en [27]. En este artículo se presenta un estudio de la SINR la cual se define como en (2.27). Se considera que el número de usuarios es variable (de 2 a 7) y que el número de elementos del arreglo varía de 8 a 10. Se supone que cada elemento experimenta los desvanecimientos en forma independiente, por lo que el vector de direccionamiento se define como una variable aleatoria Gaussiana con media cero y varianza unitaria. Como se toma en cuenta el control de potencia, todas las señales, tanto la deseada como las interferentes, desde el punto de vista de la estación base, tienen la misma potencia.

Al considerar una sola celda y un solo canal, se obtuvieron los resultados presentados en la figura 2.19.

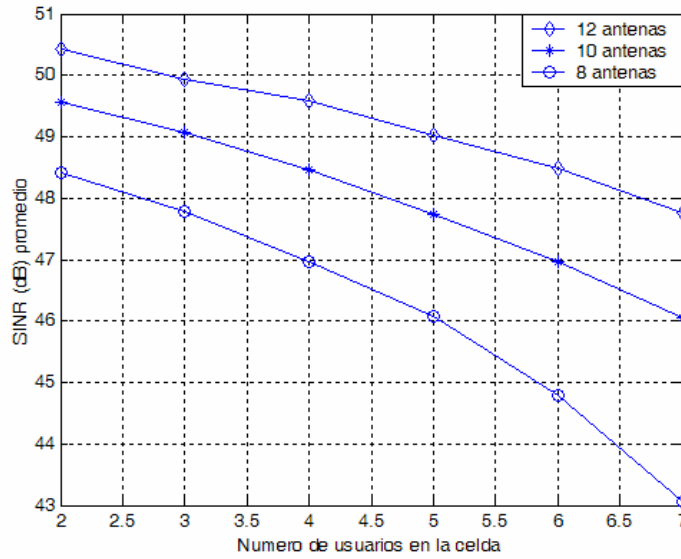


Figura 2.19. SINR promedio dependiendo del número de usuarios en la celda.

Como se puede observar, conforme aumenta el número de usuarios en la celda, la SINR promedio disminuye, lo cual se debe a que se incrementa el número de señales no deseadas y por consiguiente, la interferencia aumenta.

Si en la gráfica se toma como referencia a 4 usuarios, se puede observar que la SINR promedio para 8 elementos es de 47 dB. Si se aumenta el número de elementos a 10, la SINR promedio aumenta 1.5 dB aproximadamente y si el arreglo de antenas está compuesto por 12 elementos, la SINR promedio se incrementa por 3 dB aproximadamente en comparación con el arreglo de 8 elementos. Por lo que se deduce que conforme el número de elementos aumenta, la SINR promedio aumenta. Este efecto se debe a que un arreglo de antenas controla el nivel de interferencias de una forma más eficiente conforme el número de sus elementos incrementa.

2.5 Conclusiones.

En este capítulo se realizó una revisión de la tecnología de antenas inteligentes, su importancia en SDMA, su clasificación, características, ventajas y desventajas, así como un estudio de los bloques que la componen: un arreglo de antenas y un bloque de procesamiento digital de señales.

Para los arreglos de antenas, se definieron algunos parámetros importantes, los tipos de geometrías existentes y sus características. Se apreció la diferencia entre los arreglos lineales y los arreglos circulares, donde estos últimos son los más adecuados para los sistemas de comunicaciones, debido a que realizan una cobertura total del área geográfica, tomando siempre en cuenta sus características de diseño, tales como su radio y el número de elementos.

Para el bloque de procesamiento digital de señales se presentaron los criterios para optimizar los pesos de cada elemento del arreglo y los algoritmos adaptivos más utilizados para el caso dinámico.

Finalmente, se presentó la definición de SDMA, sus características, ventajas y desventajas, entre ellas el incremento de la capacidad de un sistema de comunicaciones y por consiguiente, un aumento de la eficiencia espectral del mismo. El estudio de esta característica de SDMA se estudiará detalladamente en el capítulo siguiente.

Referencias

- [1] Bloch, J.S. and Hanzo, L., *Third-Generation Systems and Intelligent Wireless Networking. Smart antennas and adaptive modulation*, Wiley, 2002.
- [2] Balanis, C.A., *Antenna Theory: Analysis and design*, 3rd Edition, Wiley, 2005.
- [3] Ahmed El Zooghby, *Smart Antenna Engineering*, ArtechHouse, 2005.
- [4] Tsoulos, G., McGeehan, J. and Beach, M., “Space division multiple access (SDMA) field trials. Part I: tracking and performance”, *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, Vol. 145, No. 1, pp. 73-78, Feb 1998.
- [5] Litva, J. and Lo, T.K.Y., *Digital Beamforming in Wireless Communications*, Artech House, 1996.
- [6] Paulraj, A., Nabar, R. and Gore, D., *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge Univ. Press, 2003.
- [7] <http://www.visantstrategies.com>
- [8] Tsoulos, G.V., “Smart antennas for mobile communication systems: benefits and challenges”, *Electronics & Communication Engineering Journal*, Vol. 11, pp.84-94, 1999.
- [9] Stapleton, S.P., Carbo, X., McKeen, T., “Tracking and diversity for a mobile communications base station array antenna”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 3, pp. 1695-1699, May 1996.
- [10] Kaiser, T. “When will smart antennas be ready for the market? Part I”, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 22, Issue 2, pp. 87-92, Mar 2005.
- [11] Shiann-Shiun Jeng, Hsin-Piao Lin and Chen-Wan Tsung, “Experimental studies of direction of arrivals using a smart antenna testbed in wireless communication systems”, *International Journal of Communication Systems*, Vol. 16, Issue 3, pp. 211-223, Mar 2003.
- [12] Shiann-Shiun Jeng, Xu, G., Hsin-Piao Lin, Vogel, W.J., “Experimental studies of spatial signature variation at 900MHz for smart antenna systems”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 46, Issue 7, pp. 953-962, July 1998.
- [13] Cladwell, F., Kenney, J.S., Ingram, I.A., “Design and implementation of a switched-beam smart antenna for an 802.11b wireless access point”, *IEEE Radio and Wireless Conference RAWCON 2002*, pp. 55-58, Aug 2002.
- [14] Terres, J.L.M., Gaspard, I., Freese, J., Jakoby, R., “Calibration and direction of arrival estimation with a uniform circular array for mobile radio channels”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 560-564, May 2002.

- [15] Alexiou, A., Haardt, M., “Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 42, Issue 9, pp. 90-97, Sept 2004.
- [16] Weon-Cheol Lee, Seungheon Hyeon and Seungwon Choi, “Performance analysis of downlink smart antenna system with auxiliary pilot in CDMA2000 1x”, *IEEE Communications Letters*, Vol. 9, Issue 6, pp. 514-516, Jun 2005.
- [17] Gupta, I.J., Baxter, J.R., Ellingson, S.W., Park, H.G., Oh, H.S. and Kyrony, M.G., “An experimental study of antenna array calibration”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, pp.664-668, Mar 2003.
- [18] <http://www.touchbriefings.com>
- [19] Yoonjee Kim, Heungjae Im, Jaehong Park, Hwanseog Bahk, Jonghun Kim and Seungwon Choi, “Implementation of smart antenna base station with a novel searcher and tracker for CDMA2000 1x”, *Communication Systems, ICCS 2002. The 8th International Conference on*, Vol. 1, pp. 394-398, Nov 2002.
- [20] Heungjae Im, Seungheon Hyeon, Weon-Cheol Lee, Hwanseog Bahk, Cheolhood Lee, Jonghun Kim and Seungwon Choi, “Implementation of smart antenna base station for IS-2000 1x”, *IEEE Vehicular Technology Conference VTC-2003*, Vol. 1, pp. 582-586, April 2003.
- [21] Kortke, A., “A new calibration algorithm for smart antenna arrays”, *Vehicular Technology Conference VTC-2003*, Vol. 2, pp. 1030-1034, April 2003.
- [22] Kawitkar, R.S., Shevgaonkar, R.K., “Design of smart antenna testbed prototype”, *Antennas, Propagation and EM Theory, Proceedings. 6th International Symposium on*, pp. 299-302, Nov 2003.
- [23] Seong-Sik Jeon, Yuanxun Wang, Yongxi Qian and Tatsuo Itoh, “A novel smart antenna system implementation for broad-band wireless communications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 50, issue 5, pp. 600-606, May 2002.
- [24] Campanella, H., Comas, A. and Alba, Y., “Antenas Inteligentes con aplicación en SDMA”, Grupo de Telecomunicaciones y Señales, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2003.
- [25] Lei, W. and Gulliver, T.A., “Smart antennas and transmit diversity for GSM systems”, *IEEE Pacific Rim, Conference on Communications Computers & Signal Processing 2003 PACRIM*, Vol. 1, pp. 119-122, 2003.
- [26] Jin, H., Acampora, A., “A reservation-based media access control (MAC) protocol design for cellular systems using smart antennas-Part I. Flat fading”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 4, No. 2, pp. 792-801, March 2005.
- [27] Zorzi, M., “Performance of a MAC protocol with smart antennas in a multicellular environment”, *IEEE International Conference on Communications ICC-2000*, Vol. 1, pp. 402-407, June 2000.

- [28] Steyskal, H., “Digital Beamforming antennas. An Introduction”, *Microwave Journal*, Vol. 30, No. 1, pp. 107-124, January 1987.
- [29] Godara, L.C., “Applications of antenna arrays to mobile communications, Part I: performance improvement, feasibility and system considerations”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 7, pp. 1031-1060, July 1997.
- [30] Godara, L.C., “Applications of antenna arrays to mobile communications, Part II: beamforming and direction of arrival considerations”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 8, pp. 1195-1245, August 1997.
- [31] Zaharov, V.V., Casco, F.S., Amin, O.A. and Villaseñor, M.L., “Smart antennas technique for wireless communications”, *Microwave and Telecommunication Technology CriMiCo-2001, International Conference on*, pp. 318-320, September 2001.
- [32] Van Veen, B.D., Buckley, K.M., “Beamforming: a versatile approach to spatial filtering”, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 5, Issue 2, pp. 4-24, April 1988.
- [33] Winters, J.H., “Smart antennas for wireless systems”, *IEEE Personal Communications*, Vol. 1, pp. 23-27, Feb 1998.
- [34] Widrow, B., Mantez, P.E., Griffiths, L.J. and Goode, B.B., “Adaptive antenna systems”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 55, Issue 12, pp. 2143-2159, Dec 1967.
- [35] Li Jie and Zhang Jian-Wu, “The adaptive algorithms of the smart antenna system in 3G wireless communication systems”, *Signal Processing, 2002 International Conference on*, Vol. 2, pp. 1664-1667, Aug 2002.
- [36] Ma, M.T., *Theory and application of antenna arrays*, Wiley, 1974.
- [37] Durrani, S. and Bialkowski, M.E., “Effect of mutual coupling on the interference rejection capabilities of linear and circular arrays in CDMA systems”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 4, pp. 1130-1134, April 2004.
- [38] Durrani, S. and Bialkowski, M.E., “Interference rejection capabilities of different types of array antennas in cellular systems”, *Electronic Letters*, Vol. 38, No. 13, pp. 617-619, June 2002.
- [39] Tewfik, A.H. and Hong, W., “On the equivalence of uniform circular arrays and uniform linear arrays”, *Spectrum Estimation and Modeling, ASSP-1990 Workshop on*, pp. 139-143, Oct 1990.
- [40] Bogdan, I. and Comsa, C., “Analysis of circular arrays as smart antennas for cellular networks”, *Signal, Circuits and Systems, SCS-2003, International Symposium on*, Vol.2, pp. 525-528, July 2003.
- [41] Davies, D.E.N., *The Handbook of Antenna Design*, Vol. 2, London Peregrinus, 1983.
- [42] Du, K.L., Swamy, M.N.S., “Modeling and radiation analysis of uniform circular array”, *Wireless Communication Systems, 2004, Symposium on*, pp. 125-129, Sept 2004.

- [43] Morse, J.H., “Structured gradient method applied to circular arrays”, *Signals, Systems and Computers, 1999. Conference Record of the Thirty-Fifth Asilomar Conference on*, Vol. 1, pp. 511-513, Oct 1999.
- [44] Reddy, M.K. and Reddy, V.U., “Analysis of spatial smoothing with uniform circular arrays”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 47, No. 6, pp. 1726-1730, June 1999.
- [45] Jiann-An Tsai, R. Michael Buehrer and Brian D. Wroener, “BER performance of a uniform circular array versus a uniform linear array in a mobile radio environment”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 3, No. 3, pp. 695-700, May 2004.
- [46] Wenhua Ma, Huazhi Wang, Mingyong Zha, “The study on geometrical structure of adaptive array implemented in CDMA system”, *Microwave Conference 1999, Asia Pacific*, Vol. 3, pp. 809-812, Nov 1999.
- [47] Fuhl, J., Cichon, D.J. and Bonek, E., “Optimum antenna topologies and adaptation strategies for SDMA”, *Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'96*, Vol. 1, pp. 575-580, Nov 1996.
- [48] Mathews, C.P. and Zoltowski, M.D., “Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 2, No. 9, pp. 2395-2407, Sep 2004.
- [49] Li Lihua, Wu Jing, Zhang Ping, “A novel signal converter assisted simple DOA estimation method for uniform circular smart antenna”, *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC-2003, IEEE Proceedings on*, Vol. 3, pp. 2563-2566, Sep 2003.
- [50] Du, K.L., “Pattern analysis of uniform circular array”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, Issue 4, pp. 1125-1129, April 2004.
- [51] Ishizawa, K., Jie Zhou, Sasaki, S., Muramatsu, S., Kikuchi, H., “Spatial correlation of a circular array antenna and BER performance investigation”, *Circuits and Systems, 2004 Proceedings, IEEE Asia-pacific Conference on*, Vol. 1, pp. 385-388, Dec 2004.
- [52] Ioannides, P. and Balanis, C.A., “Uniform circular arrays for smart antennas”, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 3, pp. 2796-2799, June 2004.
- [53] Griffiths, H.D., “The use of circular arrays for direction finding applications”, *Passive Direction Finding, IEE Colloquium on*, pp. 7/1-7/4, Jan 1989.
- [54] Jiann-An Tsai, Woerner, B.D., “Adaptive beamforming of uniform circular arrays (UCA) for wireless CDMA system”, *Signals, Systems and Computers, 2001. Conference Record of the Thirty-Fifth Asilomar Conference on*, Vol. 1, pp. 399-403, Nov 2001.
- [55] Tangemann, M., “Near-far effects in adaptive SDMA systems”, *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1995. PIMRC'95, IEEE Symposium on*, Vol. 3, pp. 1293-1297, Sep 1995.



- [56] Hejres, J.A. and Richie, J. E., “A simple method for null steering in a circular array by perturbations of the radial locations of the elements”, *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 2, pp. 1138-1141, July 1996.
- [57] Krizman, K.J., Biedka, T.E. and Rappaport, T.S., “Wireless position location: fundamentals, implementation strategies and sources of error”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 919-923, May 1997.
- [58] Gerlach, Derek and Arogyaswami Paulraj, “Base station transmitting antenna arrays for multipath environments”, *Signal Processing*, Vol. 54, No. 1, pp. 59-73, 1996.

3

CAPÍTULO

ESQUEMAS DE ASIGNACIÓN DE CANALES ESPACIO – TIEMPO

Con el aumento del número de usuarios y la introducción de servicios multimedia en los sistemas de comunicaciones inalámbricos, ha surgido la necesidad de incrementar su capacidad [1]. Esto se puede lograr si se disminuye el factor de reutilización, se reduce el tamaño de las celdas o se optimizan los esquemas de asignación de recursos [1-3]. Si se aplica alguna de las dos primeras propuestas, se tiene el inconveniente de que el sistema se vuelve más susceptible a las interferencias o se incrementa el número de estaciones base en el sistema. Soluciones que en ningún momento se consideran óptimas [2,3].

La asignación de canales es el proceso de distribuir un número finito de canales a las estaciones base y a los usuarios en una red de comunicaciones, lo que a su vez permite realizar un uso eficiente del espectro, el cual es escaso y tiene un alto costo [1,2, 4,5].

Un fenómeno que limita el uso eficiente del espectro electromagnético es la interferencia co-canal, la cual se produce por el reuso de los canales, limitando la calidad y capacidad de los sistemas de comunicaciones [1-11]. No obstante, con el uso de SDMA es posible reducir este tipo de interferencia de modo que se incremente la capacidad y la calidad de este tipo de sistemas [1,6].

Como se presentó en el capítulo anterior, SDMA explota la dimensión espacial de los usuarios, permitiendo que dos o más usuarios compartan un canal dentro de la misma celda al mismo tiempo, dando origen a los canales espacio – tiempo [6,7].

De esta manera, los esquemas de asignación de canales convencionales tienen que ser modificados o incluso se deben de crear nuevas estrategias para asignar eficientemente los canales espacio – tiempo [1,6,7].

Para un mejor entendimiento de la asignación de canales espacio – tiempo, es necesario conocer los esquemas de asignación de canales convencionales, por lo que en este capítulo se presenta un estudio de los esquemas de asignación de canales convencionales así como un análisis de la asignación de canales espacio – tiempo para SDMA.

3.1 Clasificación de los esquemas de asignación de canales convencionales.

Los esquemas de asignación de canales se clasifican en tres grandes categorías [1-4]:

- ◆ Asignación fija de canales, FCA.
- ◆ Asignación dinámica de canales, DCA.
- ◆ Asignación híbrida de canales, HCA.

3.1.1 Esquemas de asignación fija para canales convencionales.

En un sistema que usa una asignación fija, los canales son asignados a diferentes celdas durante la planeación de la red y la asignación raramente es alterada al presentarse cambios en los niveles de tráfico dentro del sistema [1,2].

De esta manera, un canal es asignado a un usuario al iniciar la petición de servicio y el canal es desocupado hasta que el usuario termina de utilizarlo o hasta que abandona el área de cobertura. Además de que el mismo conjunto de canales que se utilizan en una celda, solo es usado en celdas que están separadas por una distancia mínima, de tal forma que esta separación asegura que la interferencia co-canal no degrade el desempeño del sistema en forma significativa [1].

Como se puede deducir, este tipo de asignación de canales tiene el inconveniente de que los recursos del sistema no son utilizados eficientemente. Es decir, mientras

algunas celdas tienen canales libres debido al bajo nivel de tráfico que manejan, otras celdas se saturan debido al alto nivel de tráfico que presentan. En general, la asignación se realiza rápidamente, su complejidad es baja, necesita poca señalización y presenta un mejor desempeño en sistemas con niveles de tráfico alto y constante [1,4,8], sin embargo, con tráfico variable en el tiempo, este esquema presenta un desempeño muy pobre, además de que el incremento de capacidad del sistema tiene un costo muy alto [1,2]. Algunos esquemas de asignación fija de canales se presentan a continuación.

Asignación Fija con Algoritmo Genético Modificado [8]. La idea de los algoritmos genéticos es la de generar una población inicial de manera aleatoria, evaluar la condición general de cada individuo, seleccionar los individuos tomando en cuenta cierto orden y realizar operaciones con ellos. Este algoritmo considera la restricción co-canal, la restricción de canal adyacente y la restricción dentro de las celdas (donde los canales asignados en la misma celda deben de tener una separación mínima en frecuencia entre ellas). Los resultados de este algoritmo son buenos debido a que presenta convergencia en al menos el 80% de las soluciones en tiempos de cómputo razonables para anchos de banda angostos, sin embargo, debido a su complejidad, este tipo de algoritmo no puede ser implementado en sistemas reales de comunicaciones inalámbricas, pero si pueden ser utilizados como una referencia para la planeación de asignación de canales.

Asignación Fija con Préstamo de Canales. Esta es una variación de la asignación fija. Cuando una celda no tiene canales disponibles y le llega una petición de servicio, puede pedir prestado algunos canales de celdas vecinas con el propósito de no bloquear a ningún usuario. Un canal puede ser prestado siempre y cuando no interfiera con las llamadas existentes. Cuando un canal es prestado, en algunas celdas se prohíbe el uso de este canal debido a que la distancia de reuso es alterada y se crean interferencias muy grandes [1-4].

Existen tres tipos de préstamo de canales: estático, simple e híbrido [1-3]. El préstamo estático de canales se puede considerar como una reasignación de canales en el sistema, donde los canales de celdas con bajo nivel de tráfico son dados a celdas con un alto nivel de tráfico, donde la distancia entre celdas es mucho mayor que la distancia de

reuso. Esta reasignación es semipermanente y se basa en las predicciones de tráfico del sistema.

La prestación de canales simple permite a cualquier canal de una celda ser prestado a otra celda que lo necesite. De esta manera se puede reducir la probabilidad de bloqueo de peticiones de servicio pero se incrementa la interferencia en otras celdas. Algunas pruebas realizadas muestran que el préstamo simple de canales supera en desempeño al préstamo estático bajo condiciones de tráfico ligero y moderado. En cambio, con un alto nivel de tráfico el préstamo de canales da lugar al bloqueo de canales y se reduce su utilización, provocando un incremento en la probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas y el número de transferencias de llamadas.

El préstamo de canales híbrido divide los canales asignados a una celda en dos conjuntos. El primer conjunto de canales no puede ser prestado a ninguna celda bajo ninguna circunstancia y se denominan canales locales, mientras que el otro conjunto de canales sí pueden ser prestados a otras celdas. Este tipo de préstamo es una combinación del préstamo estático y del préstamo simple. Como se puede observar, los préstamos de canales simple e híbrido difieren del préstamo estático, en que los canales prestados son regresados a su celda cuando se termina de dar el servicio al usuario o cuando éste sale del área de cobertura de la celda.

3.1.2 Esquemas de asignación dinámica para canales convencionales.

La asignación dinámica de canales se utiliza como un recurso para enfrentar condiciones de tráfico variantes en el tiempo, donde la asignación fija de canales provoca una disminución de la eficiencia del sistema [1].

La diferencia entre la asignación dinámica y la asignación fija es que las celdas no tienen canales fijos ni requiere de una planificación previa en la asignación de canales, dando lugar a que cualquier canal pueda ser asignado a un nuevo usuario en base al desempeño del sistema [1,2,9-11]. De esta manera, se tiene mayor flexibilidad y adaptabilidad [1].

La asignación dinámica requiere de un alto grado de procesamiento y un conocimiento completo del estado del sistema, lo que provoca un retardo en la

asignación de canales muy significativo, así como un incremento en la complejidad del sistema [1,2,9].

Este esquema evalúa el costo de usar cada canal y selecciona el que minimice este costo, el cual depende de la probabilidad de bloqueo promedio del sistema, la frecuencia de uso del canal seleccionado, la distancia de reuso y de la interferencia co-canal que provoque en los usuarios que ya se encuentran dentro del sistema [1,9-11].

Por el tipo de adaptabilidad, estos esquemas pueden ser clasificados en adaptables al tráfico o a la interferencia [2] y por el tipo de control que utilicen, pueden ser divididos en centralizados o distribuidos [1,2].

Adaptables al tráfico [2]. En este tipo de estrategias se pretende crear un algoritmo donde se encuentre la asignación de canales óptima de tal forma que todas las llamadas puedan ser atendidas para maximizar el número de usuarios activos en cada celda, por lo que el algoritmo debe tener conocimiento del tráfico en cada una de ellas.

Adaptables a la interferencia [2]. En estos esquemas cualquier canal puede ser utilizado en una celda dada, siempre y cuando la relación señal a interferencia esté por encima de un umbral determinado por el sistema. Es decir, se plantea la posibilidad de reasignar canales cuando un usuario experimente demasiada interferencia adyacente y/o co-canal.

Con control centralizado [1,2,4,9,10]. En estos esquemas los canales se asignan a los usuarios por un controlador central dependiendo de las mediciones de interferencia del sistema que recibe de todas las estaciones base. Estos algoritmos presentan un buen desempeño incluso a niveles de tráfico elevados, sin embargo, su implementación es compleja, ya que requiere de una gran cantidad de señalización para manejar la información de carga, interferencia y condiciones de los canales.

Uno de los algoritmos más sencillos es el llamado Primer canal disponible (FA, por sus siglas en inglés – *First Available*) [1,2,4]. En este esquema se asigna el primer canal encontrado durante la búsqueda de un canal que no esté siendo utilizado y que cumpla con la distancia de reuso establecida. Otro algoritmo es el llamado Asignación dinámica

localmente optimizada (LODA, por sus siglas en inglés – *Locally Optimized Dynamic Assignment*) [1], el cual se basa en la probabilidad de bloqueo futura en la vecindad de la celda. El algoritmo de anillo [1,2,4] busca entre los canales disponibles cuál está en mayor uso dentro de las celdas, las cuales están aproximadamente a la distancia de reuso y la terminología de anillo se justifica por el hecho de que estas celdas forman un anillo. El algoritmo del vecino más cercano y el algoritmo del vecino más cercano más uno [1, 2,4] seleccionan un canal usado en la celda más cercana, la cual se encuentra como mínimo a la distancia de reuso establecida en el sistema o a la distancia de reuso más un radio de la celda respectivamente.

Con control distribuido [1,2,4,9,10]. En contraste con los algoritmos de control centralizado, los algoritmos con control distribuido son menos complejos dado que el mismo algoritmo es utilizado en cada estación base para determinar el mejor canal para atender a un usuario determinado. Cada estación base toma sus decisiones en forma independiente, pero con niveles altos de tráfico el sistema se degrada. Estos algoritmos son fáciles de implementar ya que requieren de menos señalización y permite la adaptación al tráfico no uniforme y variante en el tiempo, mientras que la distribución del proceso de decisión entre celdas reduce los requerimientos de cómputo y comunicación entre estaciones base.

Los esquemas de control distribuido usan información local sobre los canales disponibles, ya sea en la vecindad de la celda (conocidos como basados en celdas), o por mediciones de la intensidad de la señal [2]. Los esquemas que se basan en celdas asignan un canal dependiendo de la información sobre los canales disponibles en celdas vecinas, donde esta información es actualizada por medio del intercambio de información entre estaciones base. Los esquemas basados en mediciones de la intensidad de la señal utilizan únicamente la información local, sin necesidad de comunicarse con alguna otra estación base, es decir, el sistema se organiza por sí mismo y los canales se pueden agregar a cualquier celda dependiendo de las necesidades de cada una de ellas y tomando en cuenta que este tipo de algoritmos está limitado por la interferencia.

3.1.3 Esquemas de asignación híbrida para canales convencionales.

La asignación híbrida de canales constituye un compromiso entre los esquemas de asignación fija y la asignación dinámica de canales [1]. Este esquema fue propuesto con la finalidad de combinar los beneficios de la asignación dinámica para un nivel de tráfico bajo y medio, con el desempeño más estable de la asignación fija para altos niveles de tráfico en el sistema. De esta manera, el conjunto de canales se divide en dos categorías: un conjunto fijo y un conjunto dinámico [1,2,12]. En el conjunto fijo se asignan a las celdas como si se realizara una asignación fija de canales. Cuando una celda tiene ocupados todos sus canales fijos, intenta asignar los canales del conjunto dinámico [1,2]. La razón entre el número de canales fijo y el número de canales dinámico puede ser fija o variar dinámicamente en función del tráfico en el sistema [1].

3.2 Esquemas de asignación fija de canales espacio – tiempo para SDMA.

Como se presentó en la sección 3.1.1, la asignación fija para canales convencionales ha sido muy estudiada, sin embargo, todos los algoritmos propuestos deben de ser adaptados para el uso correcto de los canales espacio – tiempo, por lo que en esta sección se hace una revisión de algunos esquemas propuestos en los últimos años. La diferencia entre ellos, aparte del criterio de asignación de los canales, es el escenario en el que se evalúa, ya que como se verá en esta sección y secciones posteriores, el desempeño de SDMA también depende del ambiente del sistema de comunicaciones en que se esté operando.

3.2.1 Sistemas de una sola celda.

3.2.1.1 Sin movilidad y sin efectos de propagación.

En esta sección se presentan los esquemas de asignación de canales donde la movilidad del usuario, tipo de tráfico, modulación, las pérdidas del canal por la distancia, por el ensombrecimiento, por los desvanecimientos, propagación o multitrayectorias, no se consideran en el análisis y desempeño del sistema.

Con el criterio de asignación basado en la separación espacial únicamente. Los esquemas de asignación de canales presentados en [13] fueron derivados teóricamente

para evaluar el desempeño de SDMA en función de la probabilidad de bloqueo. Se considera que no hay cola de espera y se supone que las llamadas arriban con una distribución de Poisson y tienen un tiempo de servicio con una distribución exponencial negativa. Como SDMA se basa en la separación espacial de los usuarios que comparten el mismo canal, un canal puede ser utilizado k veces, por lo que se propone una constante P_s , la cual se define como la probabilidad de utilizar un canal más de una vez al mismo tiempo. El objetivo de estos esquemas es asignar los canales convencionales de una celda y reutilizarlos la mayor cantidad posible. Para la asignación de canales se nombran a los canales convencionales como canales primarios y a los canales que surgen gracias a SDMA se les denomina canales secundarios. Para el análisis se considera que el factor de reuso de un canal k es igual a 2.

El primer esquema de asignación de canales se llama *Duplicar Primero* y el diagrama de flujo se presenta en la figura 3.1. Este algoritmo trata de duplicar un canal primario si éste ha sido previamente asignado y en caso de que no sea posible asignarlo, se asigna el siguiente canal primario. Si todos los canales son utilizados y ningún canal secundario se encuentra disponible entonces la llamada es bloqueada. El segundo algoritmo se llama *Duplicar al final* y el diagrama de flujo se muestra en la figura 3.2. En este algoritmo se asignan primero todos los canales primarios y cuando se encuentren todos ocupados se tratan de asignar los canales secundarios. Si no hay canales primarios libres y los canales secundarios no están disponibles, se bloquea la llamada.

Los resultados de probabilidad de bloqueo están en función de P_s y se demuestra que para valores pequeños de P_s , la probabilidad de bloqueo es grande, mientras que para valores de P_s cercanos a uno, el sistema se comporta como si tuviera el doble de capacidad, es decir, la probabilidad de bloqueo disminuye considerablemente. También se realiza una comparación entre esquemas de asignación de canales y se muestra que el algoritmo de *Duplicar Primero* presenta un mejor desempeño que *Duplicar al final*, debido a que en este último la probabilidad de que un usuario nuevo sea bloqueado es más grande al condicionar a todos los canales secundarios a una separación espacial, mientras que en el primer algoritmo al asignar canales secundarios desde un principio, se tienen canales libres que disminuyen la probabilidad de bloqueo.

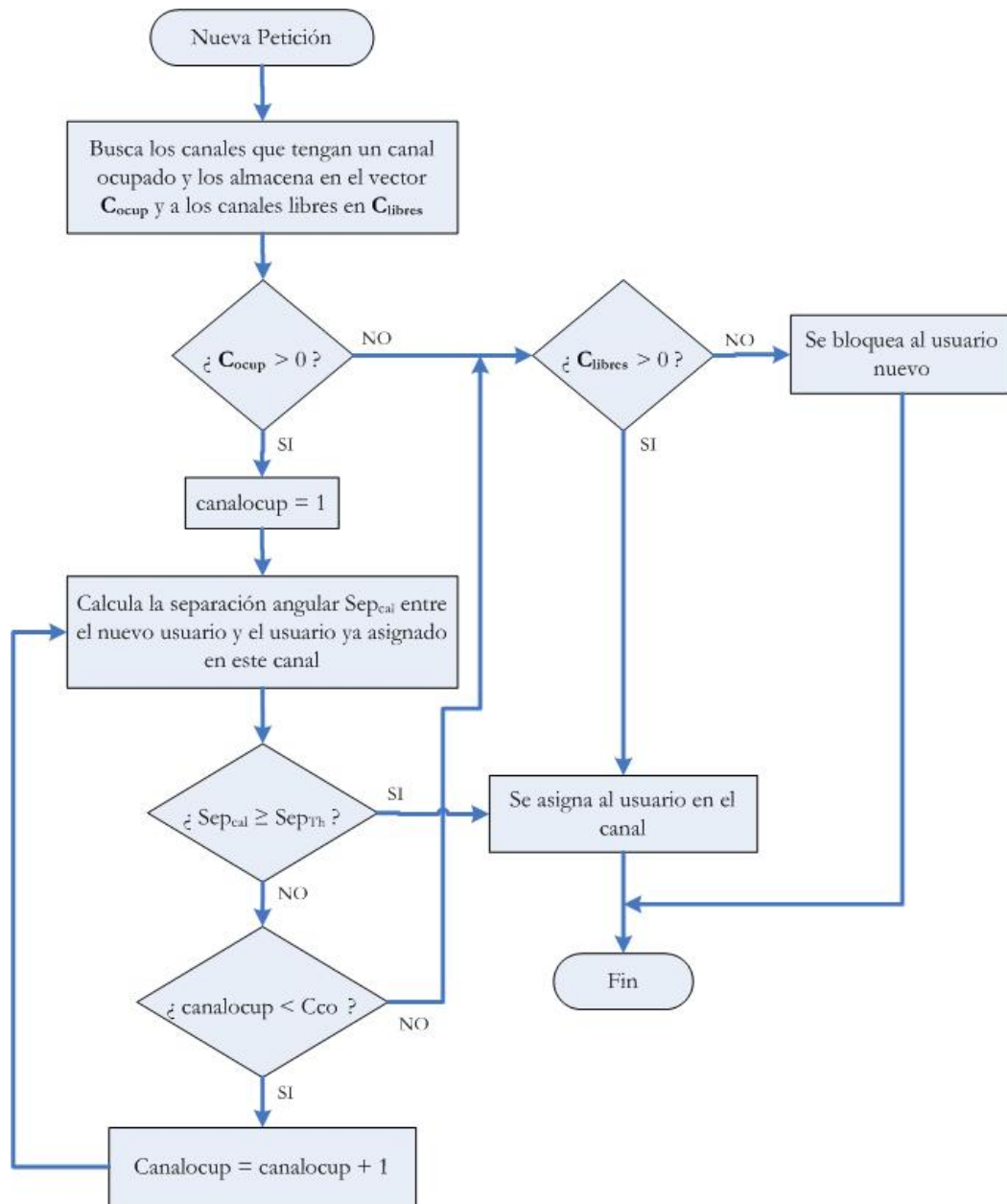


Figura 3.1 Algoritmo Duplicar Primero.

Un fenómeno que se observa en las gráficas es que estos algoritmos presentan un mejor desempeño en cargas de tráfico altas que en cargas de tráfico bajas, debido a que si se tiene un tráfico bajo la asignación con SDMA casi no se utiliza, por lo que la probabilidad de bloqueo se comporta como si fuera de un sistema sin SDMA, en

cambio, para cargas de tráfico altas, se aplican en su totalidad los esquemas de asignación con SDMA y se observa un mejor desempeño que en un sistema convencional.

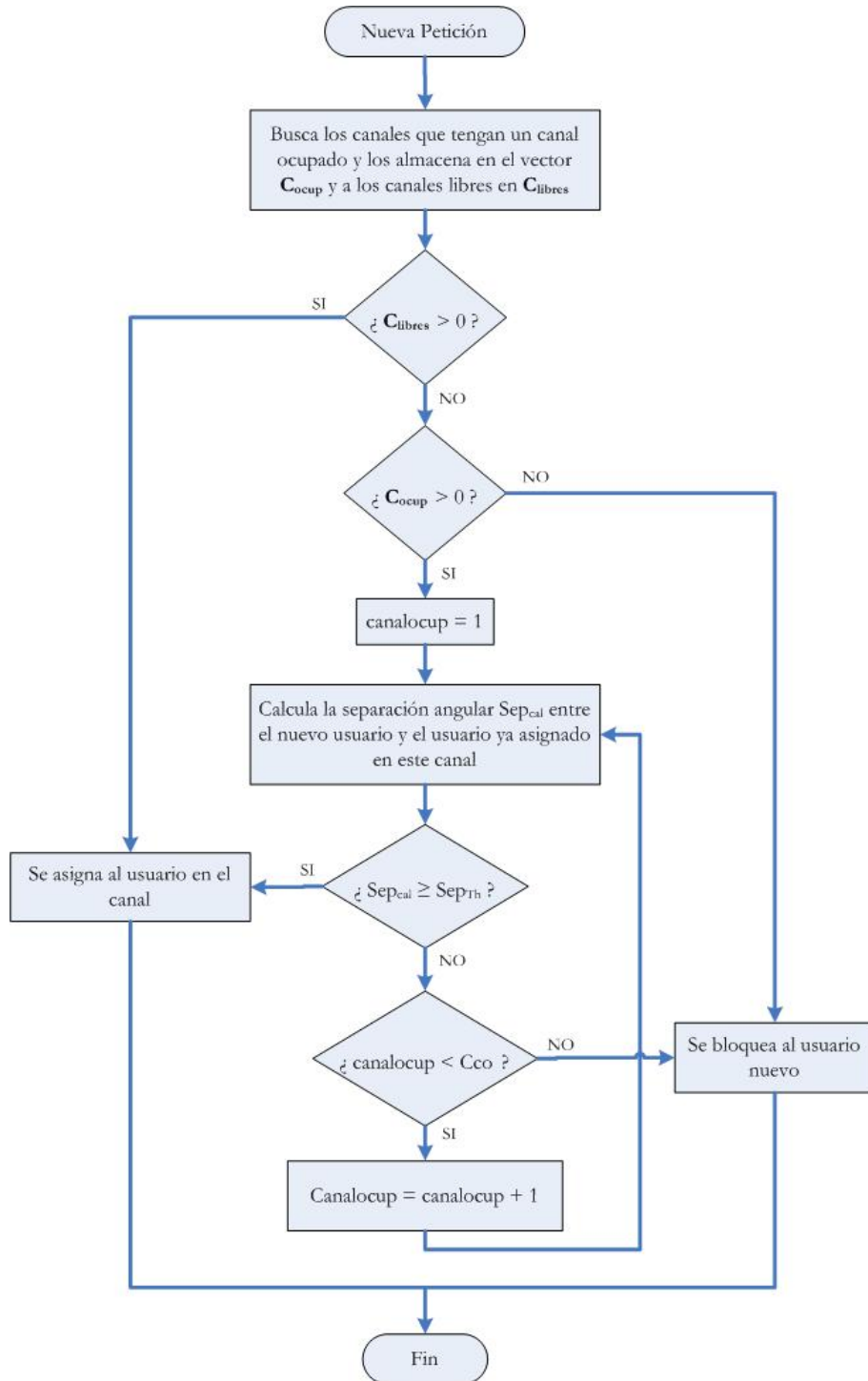


Figura 3.2 Algoritmo Duplicar al Final.

En [14] se comparan los dos algoritmos anteriores con un algoritmo propuesto llamado *Algoritmo de Máxima Separación*, el cual es una modificación del algoritmo *Duplicar Primero* y se considera que el criterio para la asignación de canales es la separación espacial entre los usuarios.

De esta forma, el algoritmo verifica todos los canales que pueden ser duplicados y se asigna el que cumpla con la máxima separación angular, siempre y cuando esté por encima de una separación angular umbral. Si ningún canal puede ser duplicado y si existen canales primarios libres, entonces el nuevo usuario es asignado a uno de estos canales, en caso contrario se bloquea la llamada.

Lo que se trata de lograr con este algoritmo es reutilizar los canales primarios pero con la condición de escoger el canal que proporcione a los usuarios que comparten el mismo canal, la mejor calidad posible. Así, el algoritmo da flexibilidad en la selección de los canales a ser duplicados y permite que los canales primarios libres puedan ser asignados a aquellos usuarios que se encuentran cerca de los usuarios que ya se encuentran asignados en el sistema.

El sistema consta de una sola celda hexagonal con un radio de 1 km y con 12 canales y se considera que los usuarios del sistema son estáticos. Los efectos de desvanecimientos y ensombrecimiento no se consideran.

Los resultados obtenidos se realizaron para un factor de reuso de un canal $k=2$, es decir, con el uso de SDMA se considera que el sistema tiene kM canales, en este caso $2M$ canales. En estos resultados se muestra que el algoritmo propuesto tiene un mejor desempeño en el sistema (medido por la probabilidad de bloqueo) y se comprueba que el algoritmo de *Duplicar al final* es el que presenta una probabilidad de bloqueo mayor.

También se comprueba que conforme la separación angular umbral se hace más pequeña, la probabilidad de bloqueo disminuye, debido a que el ancho del haz principal generado por la antena inteligente que está dirigido al usuario deseado se hace más angosto, es decir, se hace más directivo, lo cual mejora el desempeño del sistema.

Sin embargo, al igual que en [13], si se considerara un sistema no ideal, el desempeño del sistema sería menor que el presentado en estos resultados.

Con criterios de asignación basados en la separación espacial y en el nivel de interferencias. En [15] se presentan los resultados analíticos y simulados de un sistema que permite duplicar y triplicar los canales con la ayuda de SDMA. El sistema consta de una sola celda con 20 canales y se supone que los usuarios transmiten con la misma potencia. Las llamadas arriban con una distribución de Poisson y la estación base consta de un arreglo lineal uniforme con una separación entre elementos de 0.5λ y el número de elementos varía de 4 a 30. Los criterios para duplicar o triplicar un canal son la separación angular entre los usuarios y la cantidad de interferencias que genera, es decir, se buscan los canales que estén por encima de una separación angular umbral y de estos, se escoge el que produzca la menor cantidad de interferencia al nuevo usuario, con la condición de que esta interferencia esté por debajo de una interferencia umbral.

Los diagramas de flujo de los esquemas de asignación de canales para duplicar y para triplicar se muestran en las figuras 3.3 y 3.4 respectivamente. Como se observa, primero se asignan los canales convencionales, una vez que todos estén ocupados, se trata de duplicar los canales convencionales y cuando éstos están ocupados se trata de triplicar. Al comparar la probabilidad de bloqueo de estos algoritmos, se observó que ambos tienen casi el mismo desempeño, lo cual indica que el algoritmo para triplicar no es adecuado para SDMA. Esto se debe a que el triplicar canales sólo es útil cuando los criterios de asignación no permitan duplicar o que la probabilidad de triplicar sea más grande que la probabilidad de duplicar, es decir, casi no se triplica un canal con este esquema. Para solucionar este problema, se modifica el algoritmo para triplicar canales. Primero se asignan los canales convencionales y cuando todos estén ocupados se trata de duplicar. Se tratará de triplicar cuando el algoritmo establezca que es más conveniente triplicar que duplicar.

Los algoritmos propuestos se compararon con un sistema sin SDMA y se observó que los algoritmos que utilizan SDMA tienen un mejor desempeño que el sistema sin este acceso múltiple, debido a que SDMA permite dar servicio a más usuarios con la creación de canales espaciales. Los resultados obtenidos también muestran que con el nuevo algoritmo para triplicar, la probabilidad de bloqueo disminuye considerablemente en comparación con el algoritmo para triplicar anterior, debido a que ahora es posible triplicar un canal sin la necesidad de esperar a que todos los canales se

dupliquen o que ninguno cumpla con el criterio para duplicar, es decir, en lugar de duplicar se triplica, si el algoritmo considera que se obtendrá un mejor desempeño. También se probó que con el sistema propuesto es necesario el uso de al menos 10 elementos en el arreglo.

Este artículo no toma en cuenta la movilidad de los usuarios, ni los efectos de propagación y multitrayectorias, los cuales son parámetros que afectan el nivel de interferencias en el sistema, además de que presenta el análisis de una sola celda por lo que tampoco considera la interferencia intercelular.

Con criterios de asignación basados en el *throughput* y la correlación. En [16] se presenta un sistema con R-ALOHA. La estación base consta de una antena inteligente con un arreglo de antenas con tres elementos, las firmas espaciales son vectores aleatorios Gaussianos con elementos i.i.d. El ruido de fondo es blanco y Gaussiano y se considera que todos los usuarios tienen la misma potencia con una SNR de 15 dB. El *throughput* es evaluado para cada trama y se simularon 1000 tramas para obtener el *throughput* promedio. El problema del esquema de asignación es determinar el número de ranuras para atender a todos los usuarios de tal forma que se maximice el *throughput* del sistema.

Se observa que entre más usuarios sean asignados en cada ranura, la longitud de la trama disminuye, por lo que el *throughput* aumenta. Por otro lado, el tener muchos usuarios en una ranura incrementa la interferencia provocando que su SINR disminuya, efecto que también hace disminuir el *throughput* del sistema. De esta manera se concluye que el *throughput* depende de la selección de los usuarios que compartan una ranura. Como la solución óptima demanda una gran cantidad de procesamiento, en este artículo se proponen los siguientes algoritmos de calendarización:

- ◆ MSF (por sus siglas en inglés- *Maximum-throughput Subset First*).
- ◆ MF (por sus siglas en inglés- *Maximal Fit*).
- ◆ MCF (por sus siglas en inglés- *Minmax Correlation First*).

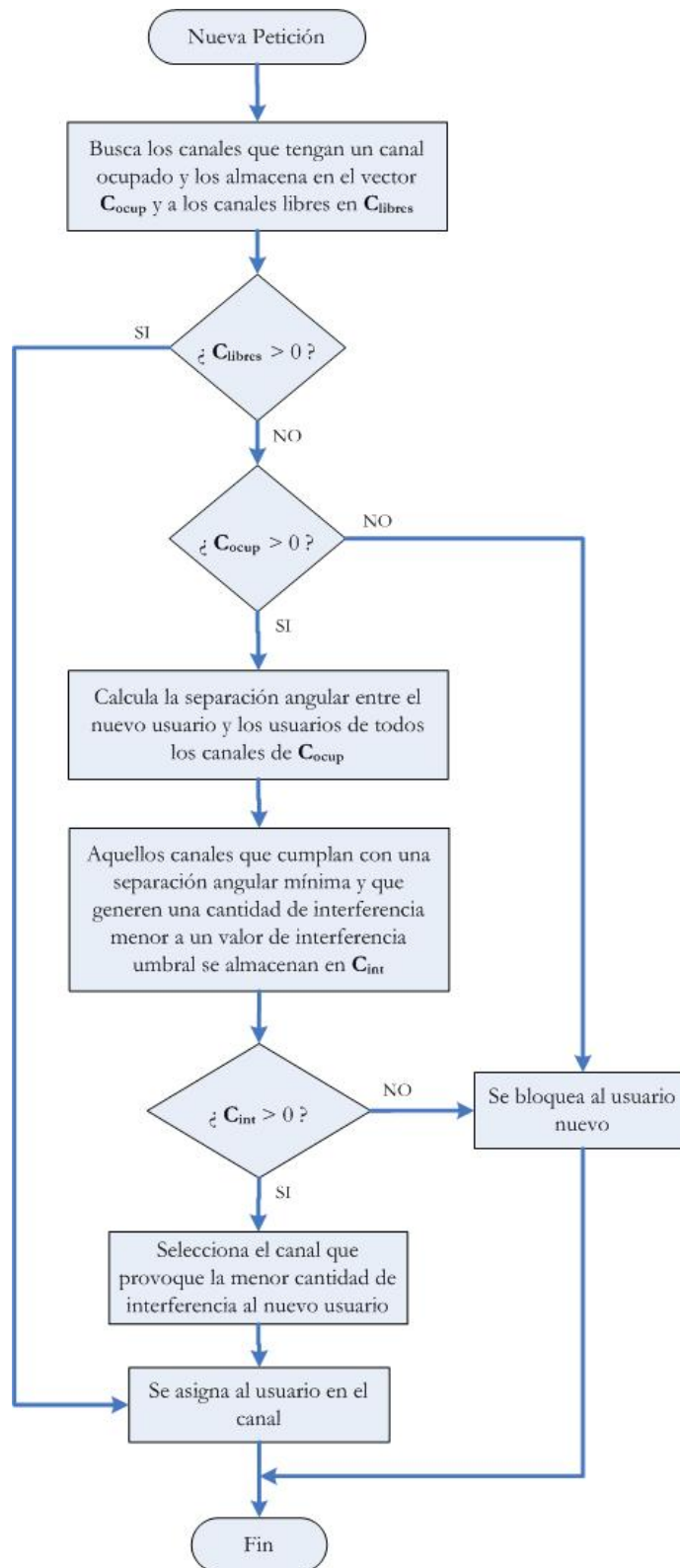


Figura 3.3 Algoritmo para Duplicar.

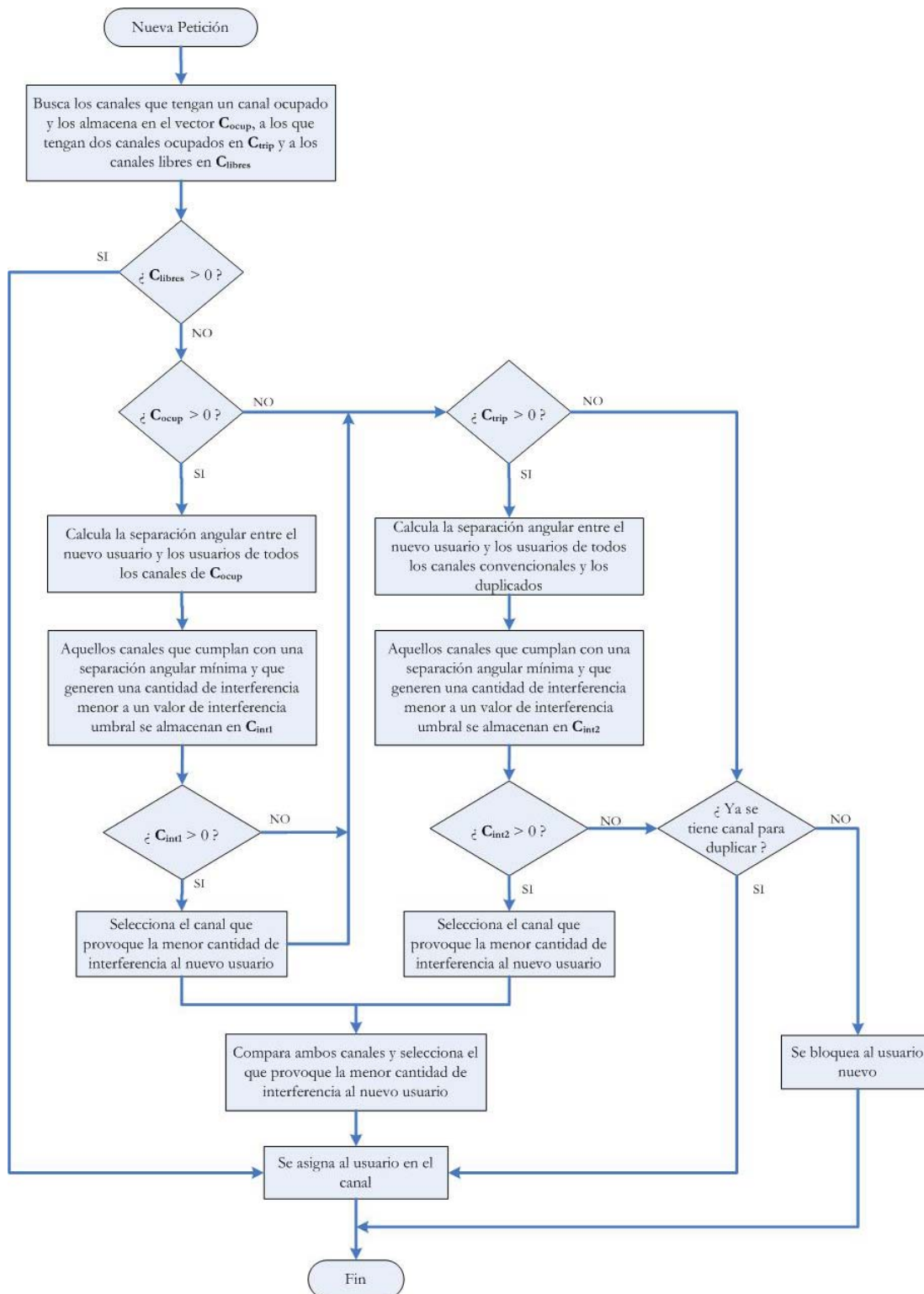


Figura 3.4 Algoritmo para Triplicar.

En MSF se trata de escoger el conjunto de usuarios que den el *throughput* máximo entre ellos. De cada conjunto se escoge el usuario que proporcione el *throughput* más grande y se coloca en un subconjunto, el cual será asignado a una ranura. El proceso continua hasta que todos los usuarios han sido asignados a una ranura. Este algoritmo es capaz de encontrar una solución casi óptima en la mayoría de los casos, sin embargo, su problema es que se deben examinar todos los conjuntos de usuarios que existan, por lo que su complejidad se incrementa conforme el número de usuarios aumenta.

En MF por cada usuario no asignado, el algoritmo trata de ajustarlo en una ranura existente o crea una nueva ranura si no es aceptado en una de ellas. El usuario se selecciona aleatoriamente y el criterio para asignar un usuario se basa en comparar el *throughput* antes y después de la asignación del usuario, si el *throughput* aumenta entonces se asigna a la ranura. En caso de que el usuario no sea admitido en alguna ranura existente, entonces se crea una nueva ranura para asignarlo. La complejidad de este algoritmo es lineal ya que solo depende del número de usuarios, sin embargo, su desempeño no es muy satisfactorio debido al criterio de asignación en sí, por lo que se realizaron modificaciones y se crearon dos criterios más: BUF-MF y BSF-MF. En el primero se compara el *throughput* antes y después de la asignación del usuario en todas las ranuras y se escoge la ranura donde el incremento del *throughput* es máximo. En el segundo, se examinan todos los usuarios no asignados para encontrar el que incremente el *throughput* de esa ranura.

El algoritmo MCF es similar a BUF-MF en que trata de encontrar el usuario que ajuste mejor en la ranura, la diferencia es que este algoritmo utiliza la correlación entre los usuarios como criterio de asignación, por lo que se escoge al usuario que proporcione la correlación mínima con los usuarios ya asignados en la ranura.

Los algoritmos se compararon con una asignación aleatoria, es decir, se selecciona un usuario aleatoriamente y se asigna a la ranura. Los resultados presentan que los algoritmos MSF y MCF tienen un desempeño similar y ambos son cercanos a la solución óptima debido a que permitieron una mayor cantidad de paquetes por ranura, mientras que la asignación aleatoria es el que presenta el peor desempeño.

3.2.1.2 Sin movilidad y con efectos de propagación.

Con el criterio de asignación basado en la ganancia del canal. En [17], se presenta un sistema TDMA/TDD de una celda con una estación base con un arreglo de 8 elementos y considera que el ruido es Gaussiano y que se opera con una SNR grande. El algoritmo de procesamiento digital de señales de la antena inteligente genera nulos en la dirección de usuarios interferentes.

Los algoritmos para la asignación de ranuras difieren en la forma en que se aplica la potencia a los usuarios, mientras que la ganancia del canal está dada por una matriz compuesta por elementos Gaussianos con media cero y varianza unitaria. El primer algoritmo mostrado en la figura 3.5, llamado UPA, *Asignación de Potencia Uniforme*, asigna la potencia total disponible entre todos los usuarios para lograr un mejor desempeño global, con la condición de que todos los usuarios tengan una potencia por encima de un umbral. En el segundo algoritmo llamado ERB, *Misma Tasa y PBE* (Probabilidad de Bit Erróneo), la estación base obliga a que todos los usuarios tengan la misma tasa, SNR y PBE, siempre y cuando la SNR esté por encima de un umbral. Este algoritmo se presenta en la figura 3.6. El algoritmo mostrado en la figura 3.7 es llamado EPS, *Proporciones Iguales de SNR*, y se basa en que todos los usuarios puedan perder la misma cantidad de su SNR máxima que se logra cuando una ranura atiende a un solo usuario.

Los resultados muestran que cuando no se considera que la SNR esté por encima de un umbral en UPA, ERB y EPS, el sistema solo está en función del número de usuarios y se observa que la SNR se degrada conforme el número de usuarios aumenta. También se aprecia que el algoritmo UPA es el que maximiza la SNR promedio, mientras que el algoritmo ERB no produce dispersión entre la SNR de los usuarios y el algoritmo EPS reduce la asimetría entre usuarios y tiene una SNR promedio más grande que el algoritmo ERB.

Cuando se consideró la condición de que los usuarios tuvieran una SNR por encima de un umbral, se observa que UPA es el que da servicio a un menor número de usuarios para mantener la condición de SNR requerida y ERB es el que da servicio a un mayor número de usuarios, pero con una SNR baja. Mientras que EPS es el que da una solución intermedia entre ambos compromisos.

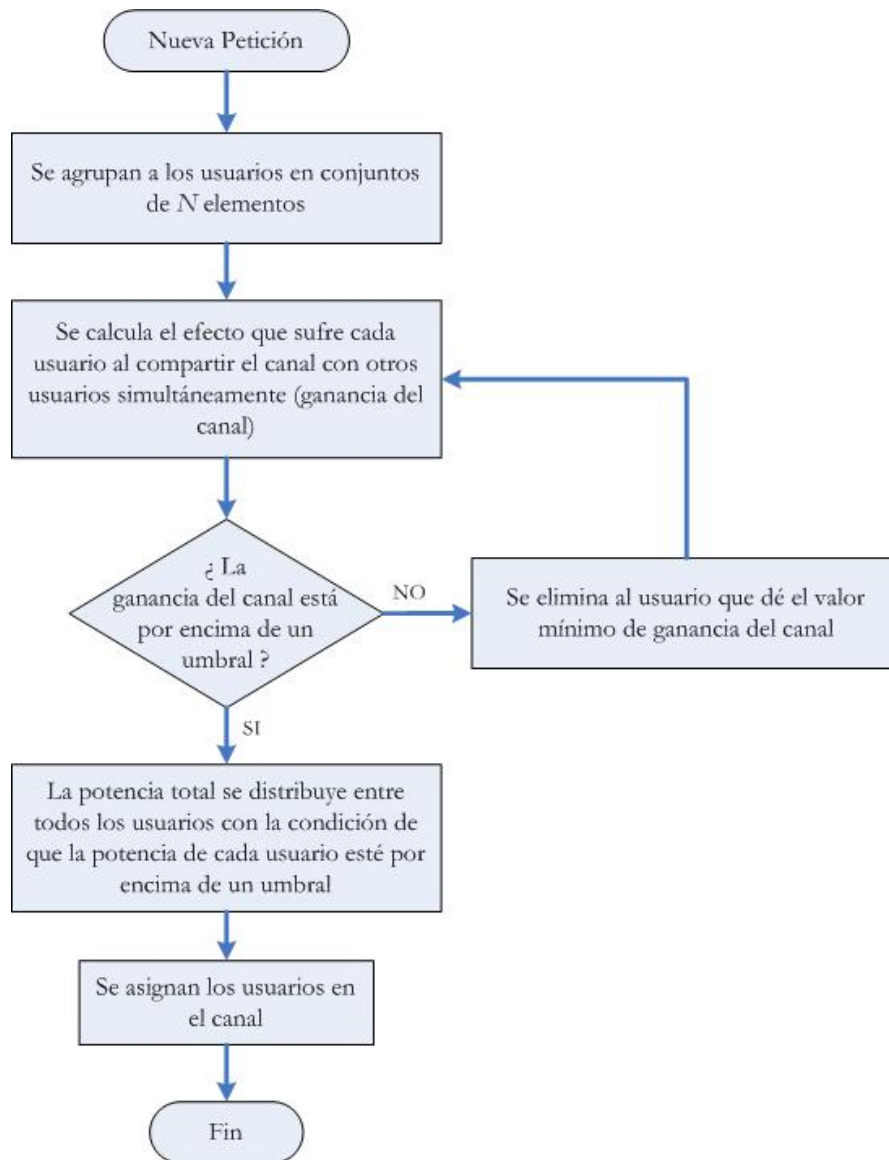


Figura 3.5 Algoritmo UPA.

Con el criterio de asignación basado en la SINR únicamente. En [7] se hace un análisis del *Algoritmo de Duplicar Primero* propuesto en [13] para cualquier valor entero de k . El sistema consta de una sola celda circular con 4 canales y dos arreglos lineales (para tener una cobertura completa de la celda), con una separación entre elementos de 0.5λ .

El criterio de asignación de canales es la SINR, es decir, se acepta al usuario siempre y cuando su SINR está por encima de un umbral $SINR_{Th}$ (en el artículo se utilizó $SINR_{Th}=15$ dB y $SINR_{Th}=18$ dB).

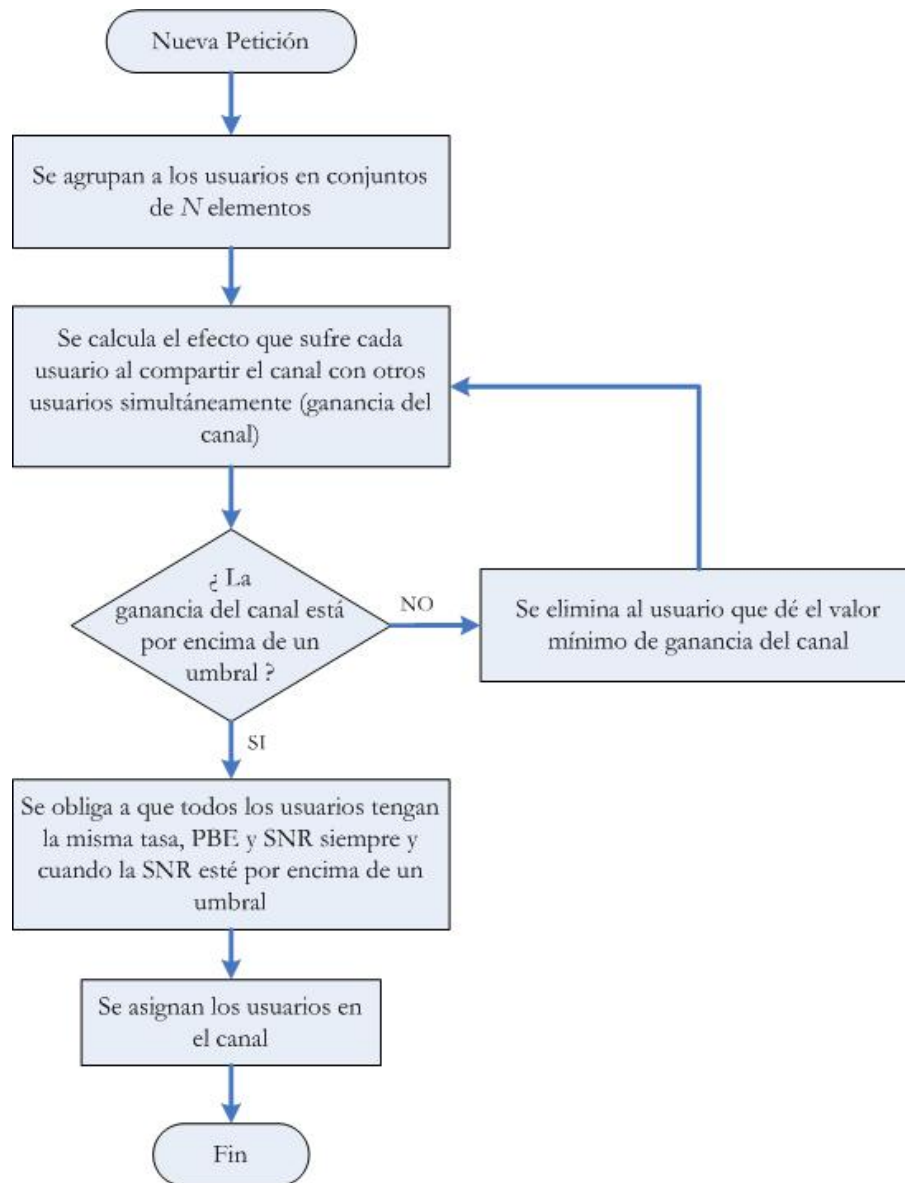


Figura 3.6 Algoritmo ERB.

El ángulo de arribo de los usuarios se considera uniforme, el exponente de propagación es de 4, el ensombrecimiento tiene una distribución lognormal con una desviación estándar de 6 dB y no se considera control de potencia. Los resultados obtenidos por simulación se comparan con un sistema sin SDMA y muestran que conforme se aumenta el número de elementos de los arreglos (4, 8, 16), la probabilidad de bloqueo disminuye, para ambos valores de $SINR_{Th}$.

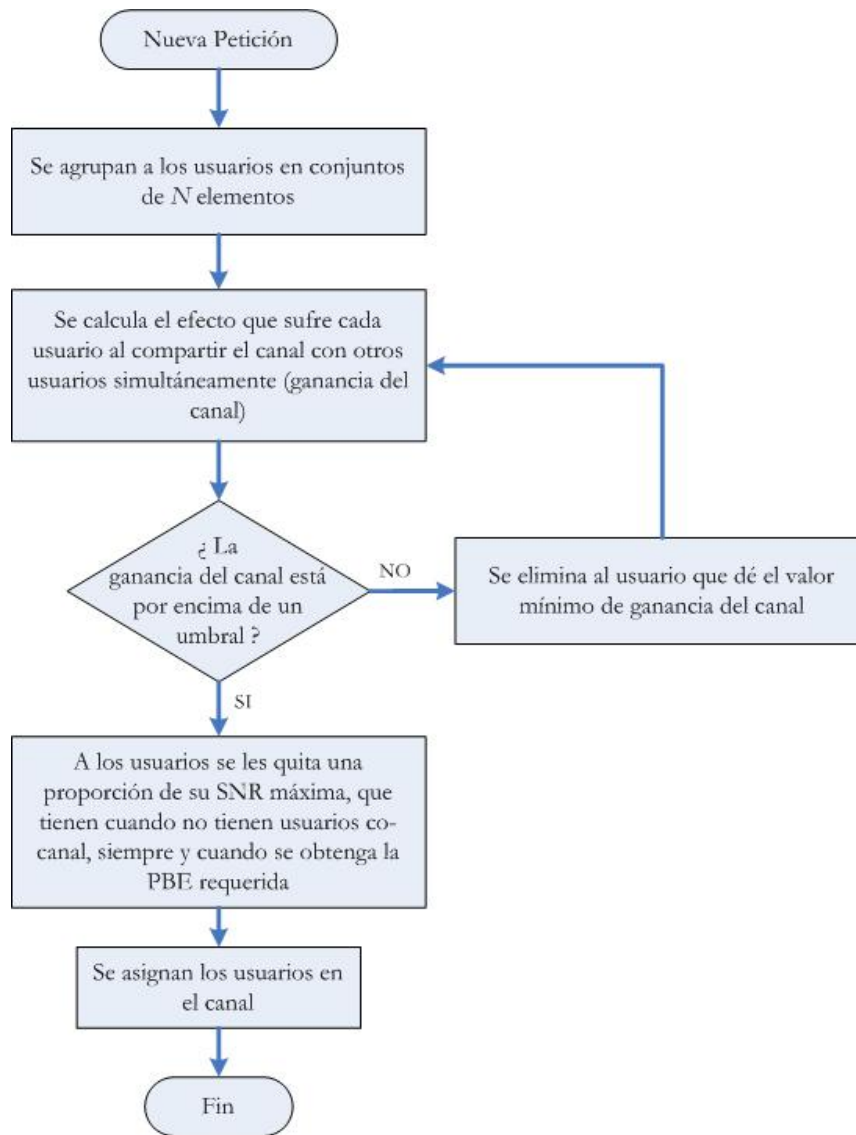


Figura 3.7 Algoritmo EPS.

Sin embargo, se observa que el sistema no aumenta su capacidad k veces tal como se esperaba debido a que P_s , los efectos de ensombrecimiento y las pérdidas por la distancia, impactan en el sistema en forma negativa.

También se hace una comparación para diferentes valores de k con 2 canales, 8 elementos en cada arreglo y una $SINR_{Th}=15$ dB y se observa que conforme se aumenta el valor de k , la probabilidad de bloqueo disminuye siempre y cuando se tome en cuenta que para tráfico bajo, k no excede el valor de 2 y no se presenta la ventaja de utilizar

SDMA en el sistema, ya que no hay suficientes usuarios para asignar a un solo canal y se tiene casi el mismo comportamiento con tráfico bajo para diferentes valores de k .

Los resultados a pesar de mostrar un incremento en la capacidad del sistema, presentan una probabilidad de bloqueo muy grande para el escenario de comunicaciones probado, por lo que se deduce que el incremento de capacidad que se logran con SDMA depende de las características del sistema en que se evalúe. Sin embargo, en este artículo solo se considera un solo tipo de arreglo y no se analiza el caso de utilizar un arreglo circular, con el cual se reduciría el número de antenas en el arreglo de la estación base y cambiaría la SINR de cada usuario. Además de que al considerar una sola celda, no se toma en cuenta la interferencia que se origina en otras celdas ni tampoco se considera la movilidad de los usuarios, parámetros que influyen en la calidad del sistema debido a que la SINR no sería constante durante el tiempo de servicio.

Con el criterio de asignación basado en la SINR marginal. En [18] se propone un protocolo nuevo para la capa de control de acceso al medio (MAC) para un sistema TDMA/SDMA para incrementar el desempeño de un sistema y la reducción del retardo del mismo. El sistema consta de una sola celda y tiene tráfico de voz y de datos. Se supone control de potencia perfecto, es decir, todos los usuarios transmiten con la misma potencia y los paquetes son de longitud fija.

Para asignar un usuario a una ranura, se propone el algoritmo de *Mejor Ajuste*, el cual selecciona aleatoriamente un usuario y calcula su SINR y la de los usuarios ya asignados como si el nuevo usuario ya hubiese sido admitido. Después se calcula la $SINR_{res}$ que se define como la diferencia entre la $SINR_{Th}$ y la SINR de los usuarios en esa ranura. Finalmente, se obtiene la SINR marginal, la cual se define como el valor mínimo de las $SINR_{res}$ calculadas. Esta operación se hace para todas las ranuras y el usuario es asignado a la ranura que tenga la SINR marginal más grande, siempre y cuando este valor sea mayor a cero y los usuarios tengan una SINR mayor a la $SINR_{Th}$. De otra forma, se bloquea al nuevo usuario. Este algoritmo considera que el tráfico es estático, es decir, los usuarios transmiten todo el tiempo.

Para el tráfico no estático se considera el algoritmo de *Mejor Ajuste Parcial*, el cual asigna a los usuarios en las ranuras en base a sus firmas espaciales. De esta manera,

cuando se tenga que asignar a un nuevo usuario, se calcula la SINR de todos los usuarios sin tomar en cuenta a los que no estén transmitiendo y se obtiene la SINR marginal de cada ranura. El usuario será asignado en la ranura que presente la SINR marginal más grande.

La estación base consta de un arreglo con 4 elementos y el algoritmo de procesamiento de señales es el de error cuadrático medio mínimo presentado en la sección 2.3.3.1. Las firmas espaciales son vectores Gaussianos, la SNR se fija a 20 dB y la $SINR_{Th}$ es igual a 10 dB. El orden de las ranuras depende de la prioridad de cada una de ellas, la cual depende de la tasa de transmisión agregada y a los paquetes restantes acumulados después de este paquete. Esto con el fin de que los paquetes más sensibles tengan una prioridad más alta y se pueda determinar el número de ranuras que necesita un usuario en una trama. Una vez que los paquetes tienen prioridad se acomodan en una cola que maneja un esquema FCFS (por sus siglas en inglés- *First Come First Serve*).

Se presentan dos escenarios de simulación y se comparan el algoritmo de *Mejor Ajuste*, el de *Mejor Ajuste Parcial*, el *Aleatorio* y el de *Mejor Ajuste para Servicios Multimedia*, el cual es una variante del algoritmo de mejor ajuste pero con la diferencia de que ahora se debe considerar la calidad de servicio requerida para cada usuario.

El primer escenario consta de un tráfico de ráfagas homogéneo, el cual tiene un proceso de arribo tipo Poisson y se supone que la firma espacial de los paquetes transmitidos no varía mientras éstos se encuentren activos. Se tienen 160 usuarios y 10 ranuras. El tiempo de transmisión es fijo con una longitud de media trama, mientras que el tiempo de apagado tiene una distribución exponencial con una media de 100 tramas. Para un tráfico bajo, el *throughput* es casi proporcional al tráfico dentro de la celda y todos los algoritmos tienen el mismo comportamiento, mientras que para tráfico alto el algoritmo de mejor ajuste es el que tiene el *throughput* más alto. Con respecto al retardo, el que presenta un mejor desempeño también es el de mejor ajuste, mientras que el aleatorio es el que presenta el peor desempeño en ambos criterios.

En el segundo escenario se maneja tráfico de voz y datos. Cada usuario solo genera un tipo de tráfico y se supone que existe el mismo número de usuarios tanto de voz como de datos. La longitud del paquete y el intervalo de arribo del paquete se modelan con una distribución exponencial. El número de ranuras, número de antenas y

la SNR son los mismos que para el escenario anterior. La SINR requerida para el tráfico de voz es de 9 dB mientras que para el tráfico de datos es de 12 dB. Los resultados presentan que el algoritmo de mejor ajuste multimedia presenta un *throughput* mayor en comparación con el algoritmo de mejor ajuste debido a la prioridad basada en la calidad de servicio que el algoritmo de mejor ajuste multimedia utiliza. En términos de la tasa de paquetes perdidos de voz el algoritmo de mejor ajuste multimedia es capaz de mantener esta tasa en un nivel aceptable, inclusive cuando se tiene una gran cantidad de usuarios activos debido a que le da prioridad a los paquetes de acuerdo a su calidad de servicio. Sin embargo, al asignar prioridades, los paquetes de voz tienen prioridad alta mientras que los de datos tienen prioridad baja, provocando que el retardo de los paquetes de voz sea pequeño y el retardo de los paquetes de datos sea alto, por lo que el algoritmo de mejor ajuste multimedia es el que presenta un retardo mayor en comparación con el algoritmo de mejor ajuste.

Con el criterio de asignación basado en la correlación únicamente. En [19] utilizan los coeficientes de correlación espacial como el criterio para la asignación de canales en un sistema con SDMA, con el propósito de no calcular la dirección de arribo que serviría para asignar canales tomando en cuenta la separación espacial entre los usuarios que comparten el mismo canal. De esta manera, en un ambiente con multitrayectorias, la estimación de la dirección de arribo sería muy difícil de realizar, en cambio, con el criterio propuesto y los nulos en el patrón de radiación dirigidos a los usuarios que comparten el canal con el usuario deseado, es posible mejorar el desempeño del sistema.

El ambiente de propagación del sistema está compuesto por un rayo de línea de vista y por los rayos reflejados de primer orden y no se considera el retardo de propagación. La estación base consta de una arreglo lineal de 4 elementos con una separación entre elementos de 0.5λ . Cada usuario transmite con la misma potencia y la modulación usada es BPSK. La SNR varía de 10 a 30 dB. Para los resultados obtenidos, el desempeño del sistema se mide con la PBE y se considera que solo hay dos usuarios y uno de ellos está fijo mientras el otro solamente puede moverse en la dirección del eje y .

Los resultados muestran que cuando los usuarios están muy cerca, el coeficiente de correlación es muy grande. Se consideró una PBE umbral y si la PBE calculada está

por encima de este umbral, quiere decir que los coeficientes son altamente correlacionados. Como la probabilidad de tener coeficientes de alta correlación es baja en un ambiente con multitrayectorias, el artículo muestra que inclusive cuando los usuarios tienen una separación angular pequeña, todavía pueden ser asignados al mismo canal, siempre y cuando estos coeficientes hagan que la PBE esté por debajo de un umbral. Además de que estos coeficientes dependen o se relacionan con la separación espacial entre los usuarios y no necesitan el cálculo de la dirección de arribo. Sin embargo, los resultados de este artículo están condicionados al movimiento espacial de un solo usuario (la separación espacial solo es radial), por lo que faltaría ver el desempeño del sistema cuando el movimiento no solo es de este tipo.

Con los criterios de asignación basados en la correlación y la SNR. En [20] el sistema consta de una sola celda con 10 canales y la estación base tiene un arreglo lineal uniforme de 2 elementos con una separación de 0.5λ . Se consideran dos usuarios, donde uno de ellos se mantiene fijo y el otro se mueve dentro de la celda. La modulación que se utiliza es QPSK, el ruido se considera Gaussiano y el desempeño del sistema está en función de la PBE y para duplicar un canal, la PBE de ambos usuarios debe satisfacer la calidad requerida ($PBE=0.01$). Las llamadas están distribuidas uniformemente en la celda y arriban con una distribución de Poisson, su tiempo de servicio tiene una distribución exponencial negativa con una media de 100 segundos. Se supone que la SNR no cambia durante el tiempo de servicio y para eliminar el bloqueo debido a una SNR baja, las llamadas con una SNR debajo de 20 dB no se toman en cuenta, en este caso, la llamada es reemplazada con otra que satisfaga la condición de SNR. El exponente de propagación es de 4 y el ensombrecimiento es de tipo lognormal con una desviación estándar de 6.5 dB.

El primer algoritmo trata de asignar los canales libres, en caso de que todos los canales estén ocupados, el primer canal con el coeficiente de correlación menor a 0.9 es asignado, en caso contrario, el usuario es bloqueado.

El segundo algoritmo trata de asignar los canales libres, en caso de que todos los canales estén ocupados, se verifica la SNR del usuario y si es mayor a 30 dB, entonces se

asigna el primer canal que proporcione un coeficiente de correlación menor a 0.99, en caso de que ningún canal cumpla con las dos condiciones la llamada es bloqueada.

Los resultados muestran que entre más grande sea el coeficiente de correlación, la PBE promedio aumenta. También se presenta que la posibilidad de duplicar un canal aumenta si se incrementa la SNR de cada usuario. El desempeño del sistema se basa en la probabilidad de bloqueo. Al comparar los dos algoritmos propuestos se observó que con el uso de SDMA se incrementa casi al doble la capacidad del sistema y que el segundo algoritmo propuesto es el que presenta una probabilidad de bloqueo menor lo cual se debe a que es más probable duplicar el canal cuando la SNR de ambos usuarios es grande.

Con el criterio de asignación basado en la SIR únicamente. En [21] se muestra el efecto de SDMA en la capa MAC, el cual depende del acceso múltiple que tenga el sistema (TDMA, CDMA, OFDMA) ya que con cada acceso múltiple se tienen diferentes niveles de interferencia co-canal e intercelular que afectan el desempeño del sistema. El sistema consta de una sola celda y se analiza el enlace de bajada. Se considera un esquema de transmisión basado en ranuras. Los paquetes llegan de capas superiores y se descomponen en grupos de bits antes de ser transmitidos a los usuarios. Cada usuario tiene una tasa requerida mínima en un intervalo de tiempo el cual consiste de varias ranuras. La calidad del enlace permanece constante en cada ranura pero cambia entre ellas. Se transmite un número fijo de símbolos en una ranura. En el modelo se supone que el ruido es desconocido y que solo se considera la interferencia, por lo que la SINR es reemplazada por la SIR.

Se presentan tres algoritmos, los cuales se prueban con diferentes esquemas de acceso múltiple para probar su eficiencia. El primer algoritmo trata de asignar un conjunto grande de usuarios en cada canal, con la condición de mantener la complejidad del algoritmo en un nivel razonable. Se considera que los usuarios se asignan en forma secuencial y no hay reasignaciones. El control de potencia es considerado cuando no se cumple con la SIR requerida. El usuario asignado debe ser el que produzca una menor cantidad de interferencia co-canal e intercelular a los usuarios que ya están conectados en el sistema, así como también el que reciba una menor cantidad de interferencia de otros

usuarios. El segundo algoritmo trata de maximizar la SIR mínima de los usuarios, es decir, se asigna al usuario que maximice la SIR mínima de los usuarios ya asignados en el sistema. Este algoritmo no solo considera la interferencia inducida y recibida, sino que también intenta que el número de SIR's que tienen un valor cercano a SIR_{Th} se maximice y se incremente el número de usuarios en cada canal. El tercer algoritmo asigna a todos los usuarios en cada canal, ejecuta el primer algoritmo y encuentra la SIR común máxima de los usuarios. Si la SIR común es igual o está por encima de un valor establecido para todos los usuarios entonces el algoritmo termina, en caso contrario para cada canal elimina al usuario que tenga la SIR más grande y vuelve a verificar si la SIR común es igual o está por encima de un valor establecido.

El sistema consta de una sola celda con 10 usuarios que son distribuidos uniformemente en la celda con la condición de que cada usuario necesita al menos tres canales para transmitir. La estación base tiene un arreglo lineal uniforme con 4 elementos separados una distancia 0.5λ y tiene 10 canales. El exponente de propagación es 4, el ensombrecimiento es de tipo lognormal con una desviación estándar de 6 dB y el modelo de 2 rayos es utilizado para simular las multitrayectorias, donde el ángulo de la primera trayectoria está distribuido uniformemente en $[0,2\pi]$ mientras que el ángulo de la segunda trayectoria varía de la primera por una variable aleatoria distribuida uniformemente en $[0,0.1\pi]$. Para CDMA se supone que la correlación de los códigos está uniformemente distribuida entre $[0,0.02]$ y $[0,0.1]$, casos para los cuales se considera baja y alta correlación.

Los algoritmos se probaron con TDMA, OFDMA y CDMA tomando en cuenta que con TDMA y OFDMA un usuario experimenta la interferencia co-canal de otros usuarios que comparten el mismo canal, lo que provoca que disminuya la SIR de cada uno de ellos. En cambio, con CDMA un usuario que es asignado a un código recibe la interferencia co-canal de otros usuarios que usan el mismo código, así como la interferencia de otros usuarios que usan códigos correlacionados, debido a que los códigos utilizados no son perfectamente ortogonales. Para OFDMA se presenta la tasa total del sistema en función de la SIR_{Th} , tomando en cuenta que una SIR_{Th} grande implica una condición de PBE muy estricta. Considerando control de potencia, el tercer algoritmo tiene el mejor desempeño para cualquier valor de SIR_{Th} , mientras que el

primer algoritmo tiene mejor desempeño que el segundo algoritmo. Comparando los algoritmos sin control de potencia, el segundo algoritmo tiene un mejor desempeño que el primero. De esta manera, se muestra que el control de potencia ayuda a obtener un mejor desempeño cuando se aplica en el primer algoritmo. Sin embargo, el segundo algoritmo sin control de potencia tiene un desempeño semejante al primer algoritmo con control de potencia, lo cual sugiere que el segundo algoritmo puede implementarse en situaciones donde la complejidad del sistema tenga que ser lo más baja posible. Para TDMA el tercer algoritmo es el que presenta un mejor desempeño y el segundo algoritmo supera el desempeño del primer algoritmo y la diferencia de desempeño entre algoritmos es más pequeña en comparación con OFDMA. Para CDMA, se presentan los resultados con diferentes valores de correlación cruzada considerando control de potencia. Para valores pequeños de correlación cruzada el tercer algoritmo permite una mayor capacidad. Al comparar los otros algoritmos sin control de potencia, el primer algoritmo tiene un mejor desempeño que el segundo con y sin control de potencia. También se observa que conforme la correlación cruzada aumenta, el desempeño del primer y tercer algoritmo disminuye.

Finalmente se hicieron pruebas variando el número de elementos del arreglo de antenas, comprobando que el aumento de capacidad depende de las características de la capa física y de la asignación de canales en la capa de control de acceso al medio. En general, los resultados muestran que el tercer algoritmo, al considerar un balance de la SIR de los usuarios y el control de potencia, permite un incremento en el desempeño en comparación con los otros algoritmos, especialmente en los esquemas de acceso con canales ortogonales o no correlacionados.

Con el criterio de asignación basado en el nivel de interferencia únicamente. En [22], se tiene un sistema que consta de una picocelda en un ambiente de interiores con un radio menor a 100 m, cuya estación base consta de una antena inteligente con un arreglo lineal uniforme y una separación entre elementos de 0.5λ , el algoritmo para el bloque de procesamiento de señales es RLS, presentado en la sección 2.3.3.2 y para este caso, el algoritmo para el cálculo del ángulo de arribo es ESPIRIT [22]. Se toma en cuenta la dispersión, se utiliza el Código Reed-Solomon [22] para la corrección de

errores, la modulación es QPSK, la trama tiene una duración de 2 ms, se consideran 6 usuarios uniformemente distribuidos en la celda y el proceso de arribo para el enlace de subida se utiliza el Proceso de Arribo Markoviano en Grupo, BMAP (por sus siglas en inglés- *Batch Markovian Arrival Process*) que se supone determinístico y con un solo servidor (BMAP/D/1).

El primer algoritmo es FCFS que considera a todos los paquetes iguales por los que los transmite en el orden de arribo. El segundo algoritmo es SP (por sus siglas en inglés- *Static Priorities*) donde las prioridades se asignan de acuerdo a la calidad de servicio requerida por el usuario. La desventaja de esta calendarización es el incremento de retardos en la transmisión de paquetes conforme el número de prioridades aumenta.

El tercer algoritmo es EDDF (por sus siglas en inglés- *Earliest Due Date First*) en donde a cada paquete se le da una prioridad de acuerdo a su tiempo de espera para transmitir, es decir, conforme el tiempo de espera se vaya terminando, la prioridad de enviar el paquete aumenta. De esta manera, el calendarizador selecciona el paquete con mayor prioridad.

El cuarto algoritmo es ORU (por sus siglas en inglés- *Optimized Relative Urgency*) el cual se basa en el retardo máximo y la tasa de paquetes perdidos permitida. Cuando un paquete tiene que ser retransmitido, el retardo y la urgencia por enviarlo se incrementan. El criterio para aplicar SDMA en cada ranura es el nivel de interferencia que existe, es decir, para que una ranura se duplique su nivel de interferencia debe estar por debajo de un umbral.

Los resultados fueron obtenidos variando el número de elementos del arreglo (6, 8 y 16 antenas) y se observa que conforme el número de elementos incrementa, las ranuras pueden soportar una mayor cantidad de paquetes simultáneamente. El retardo también se probó para los diferentes algoritmos. Para el algoritmo FCFS, como todos los paquetes se consideran iguales el retardo que sufren los usuarios es el mismo, mientras que para los otros algoritmos, el retardo es mayor y diferente para cada usuario. Sin embargo, como el algoritmo ORU hace un compromiso entre el retardo y la tasa de paquetes erróneos, es el que presenta un justo y eficiente uso de las ranuras.

3.2.1.3 Con movilidad.

Con el criterio de asignación basado en la separación espacial únicamente. En [23] se presentan dos algoritmos de asignación de canales donde se toma en cuenta la separación espacial umbral entre usuarios que comparten un canal dentro de la misma celda y que durante una llamada, el tiempo entre dos reasignaciones debe ser maximizado. Esto con el fin de reducir la carga de señalización debido a las transferencias intracelulares, pero considerando que estas condiciones dependen de ciertos costos, tales como: el ambiente de propagación de la celda, de la distribución de los usuarios, de su velocidad y del ancho del haz principal generado por la antena inteligente que está dirigido al usuario deseado.

El algoritmo 1 presentado en la figura 3.8, asigna primero los canales que no tengan ningún usuario. En caso de que no existan canales libres, se buscan los canales que ya tengan un usuario asignado y se verifica si la separación espacial entre el nuevo usuario y los usuarios de estos canales está por encima de un umbral y de los canales que cumplan esta condición se selecciona aleatoriamente uno de ellos y se asigna el usuario. El algoritmo 2 mostrado en la figura 3.9, también asigna primero los canales libres y en caso de que no existan, se busca un canal que ya tenga un usuario asignado y a este canal se le calcula los costos establecidos; si el canal cumple con los costos se asigna al usuario, en caso contrario, se busca otro canal. Si ningún canal cumple con los costos se bloquea al usuario nuevo.

El sistema consta de una sola celda rectangular la cual está dividida en sectores cuadrados, por lo que la posición del usuario se identifica con el sector donde éste se encuentre. Los costos para el segundo algoritmo que se requieren para asignar un canal están en función de la probabilidad de que dos usuarios que comparten el mismo canal colisionen, el intervalo de tiempo estimado antes de que la colisión entre esos usuarios ocurra, la dirección y la velocidad de los usuarios. Para la dirección de movimiento, la estación base monitorea el ambiente de cada usuario activo dentro de la celda, es decir, almacena el número de sectores por el cual ha estado el usuario para determinar su trayectoria y las colisiones que ha tenido anteriormente, así como el sector y el instante de tiempo donde ocurrió. Mientras que para la velocidad de los usuarios se definen diferentes tipos de velocidades.

La celda aparte de ser dividida en sectores, tiene un trazado de calles, las cuales pueden ser paralelas o perpendiculares entre ellas. El número de usuarios activos en la celda se mantiene constante en toda la simulación, es decir, si un usuario es bloqueado, forzado a terminar o simplemente ya terminó su llamada, inmediatamente se produce el nacimiento de otro usuario dentro de la celda. La duración de las llamadas es una variable aleatoria que tiene una función de densidad geométrica. El modelo de movilidad usado permite el movimiento de los usuarios de acuerdo al trazado de las calles y el movimiento de un punto a otro se basa en las probabilidades de transición de cada dirección con la condición de que no pueden regresar a un punto anterior. El tiempo que dura el usuario en un punto está dado por una variable aleatoria con una función de densidad geométrica. La posición inicial del usuario se escoge aleatoriamente de acuerdo a una distribución uniforme y la velocidad también se escoge de acuerdo a una distribución uniforme entre dos valores de velocidad, V_{\max} y V_{\min} . Cuando el usuario llega al límite de la celda se elimina y se genera un nuevo usuario dentro de la celda.

El desempeño del sistema está en función de la tasa de transferencias intracelulares por llamada y de la tasa de asignaciones fallidas por celda.

Para la simulación del sistema se consideraron 15 canales y 3 escenarios. El primer escenario representa un ambiente rural donde se cruzan autopistas y solo existen usuarios de alta velocidad. El segundo escenario representa un ambiente urbano con usuarios de baja velocidad y el tercer escenario representa un ambiente residencial donde los usuarios se encuentran casi estáticos. Se probaron diferentes valores del factor de reuso de un canal (de 2 a 5 veces) en los escenarios y los resultados muestran que ambas tasas aumentan conforme se incrementa el factor de reuso. Además de que la tasa de transferencias intracelulares aumenta debido al incremento de la velocidad del usuario.

El desempeño del sistema depende del tipo de escenario que se considere porque se observó que cuando se tiene un escenario donde el usuario tiene pocas trayectorias los algoritmos presentan un buen desempeño. En cambio, cuando un usuario tiene muchas alternativas el desempeño de los algoritmos disminuye.

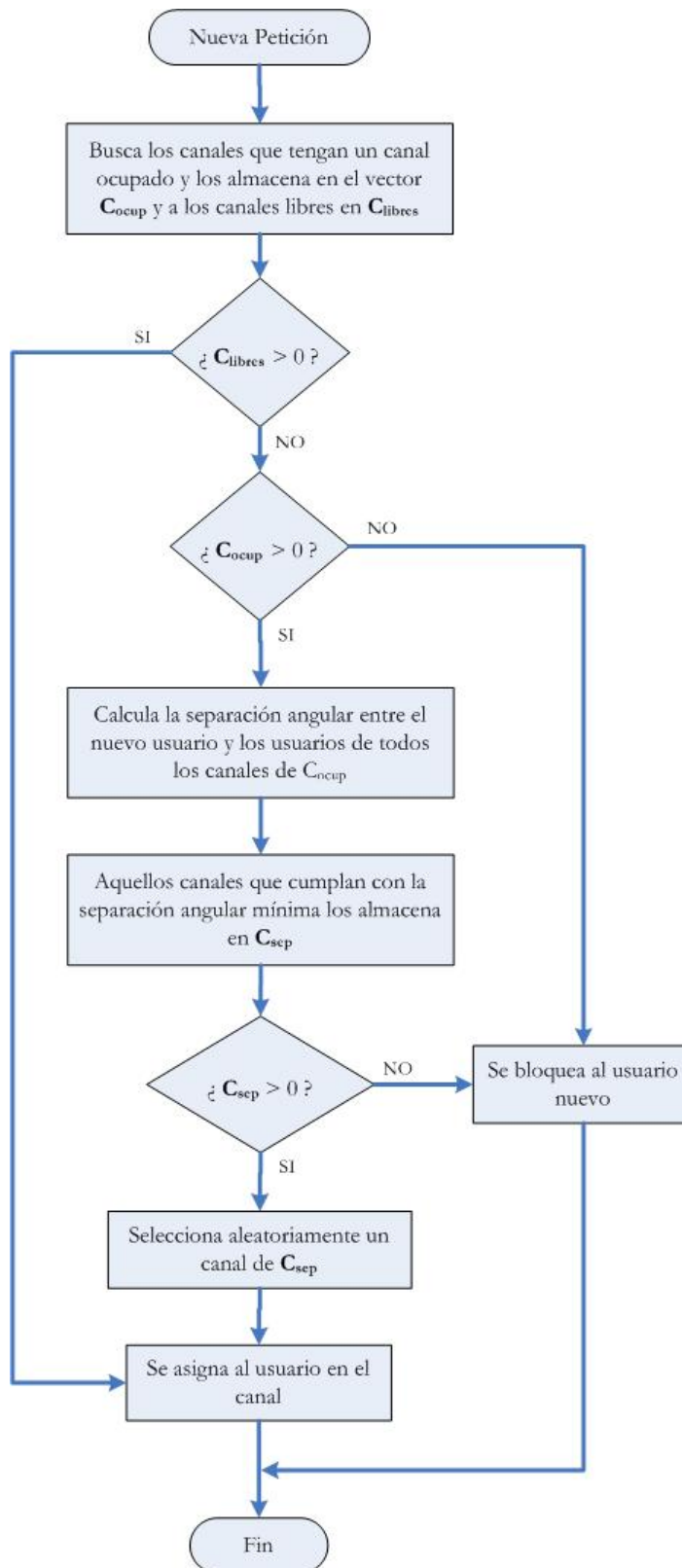


Figura 3.8 Algoritmo 1.

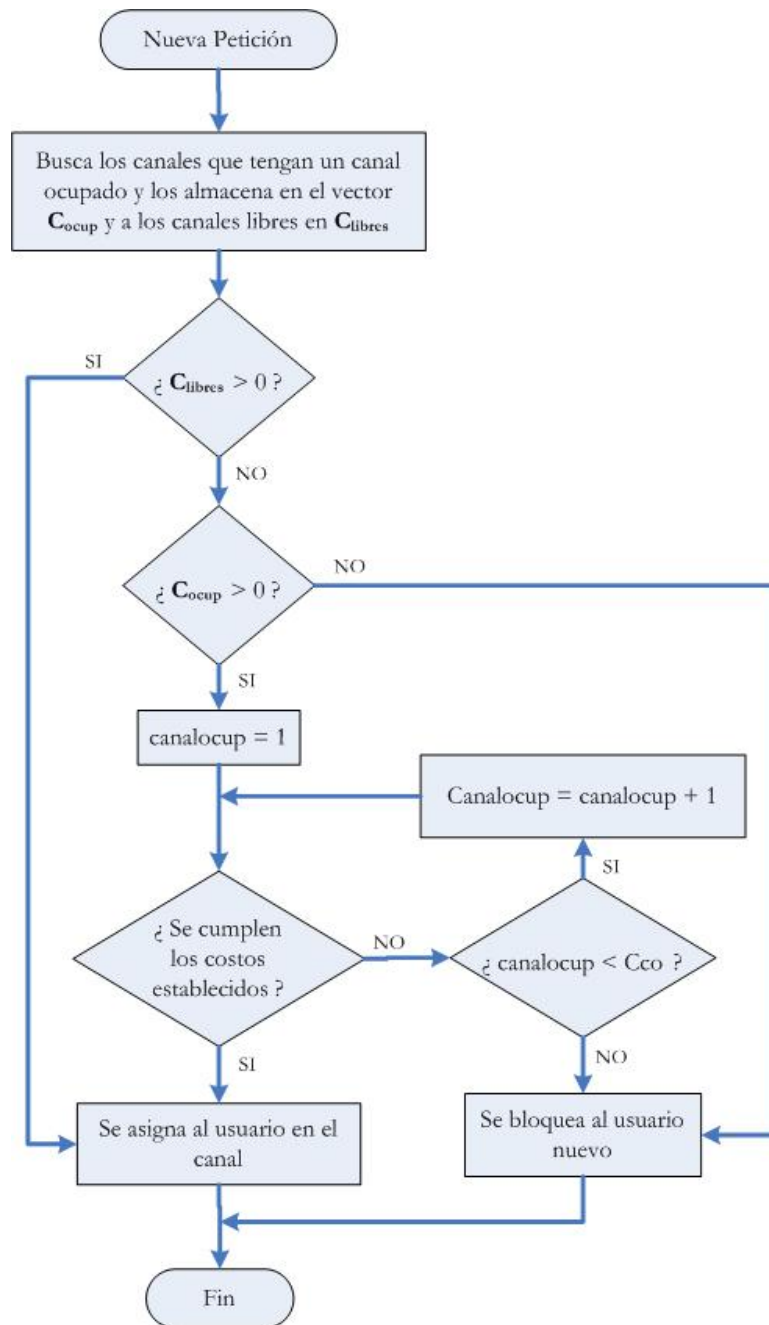


Figura 3.9 Algoritmo 2.

Finalmente al comparar los algoritmos, se observó que sin importar el tipo de escenario, el algoritmo 1 a pesar de que es el más simple, es el que presenta el peor desempeño. En cambio, el algoritmo 2 fue el que tuvo mejor desempeño con la desventaja de que se debe conocer la topografía de la celda, lo que genera un alto grado

de complejidad para procesarla, es decir, la información necesaria para calcular los costos anteriormente mencionados es demasiada, lo cual se ve reflejado en una gran cantidad de tiempo para obtenerlos y realizar la asignación del canal a un usuario.

Con los criterios de asignación basados en la SIR y la separación espacial. En [29], se presenta un sistema de una sola celda circular donde la estación base consta de una antena inteligente con un arreglo lineal uniforme de 8 elementos, el algoritmo del bloque de procesamiento de señales es LMS y la modulación es BPSK. El algoritmo para encontrar el ángulo de arribo del usuario con respecto a la estación base es TLS-ESPIRIT.

El desvanecimiento es tipo Rayleigh donde todas las señales transmitidas de diferentes puntos no están correlacionadas. Se toma en cuenta la conversión digital a analógica, donde las señales de entrada se toman de señales de voz digitalizadas y codificadas con la técnica de no retorno a cero. La PBE mínima aceptable es de 0.0025.

El modelo utilizado para simular la movilidad consta de 4 trayectorias que forman un rectángulo donde las intersecciones están en el perímetro de la celda, por lo que se utilizan 4 haces por canal. Es decir, se tiene un haz para cada lado del rectángulo y de esta manera, solamente los usuarios que están en diferentes trayectorias pueden compartir el mismo canal.

La celda tiene un radio de 5 km y consta de 5 canales. Los usuarios son generados uniformemente en las 4 trayectorias, con la condición de que la posición inicial de los usuarios en cada trayectoria es escogida de una distribución tipo beta. El arribo de llamadas tiene una distribución tipo Poisson y el tiempo de servicio tiene una distribución exponencial con una media de 180 segundos.

La separación angular umbral es de 26 grados y en caso de que la separación angular entre los usuarios no esté por encima de este umbral, se realiza una transferencia intracelular, en la cual se trata de asignar al usuario a un canal en el que se cumplan todas las condiciones y en caso de no encontrarlo, el usuario es forzado a terminar su llamada.

En este artículo se presentan dos esquemas de asignación de canales, MIN y MAX, los cuales se presentan en las figuras 3.10 y 3.11 respectivamente.

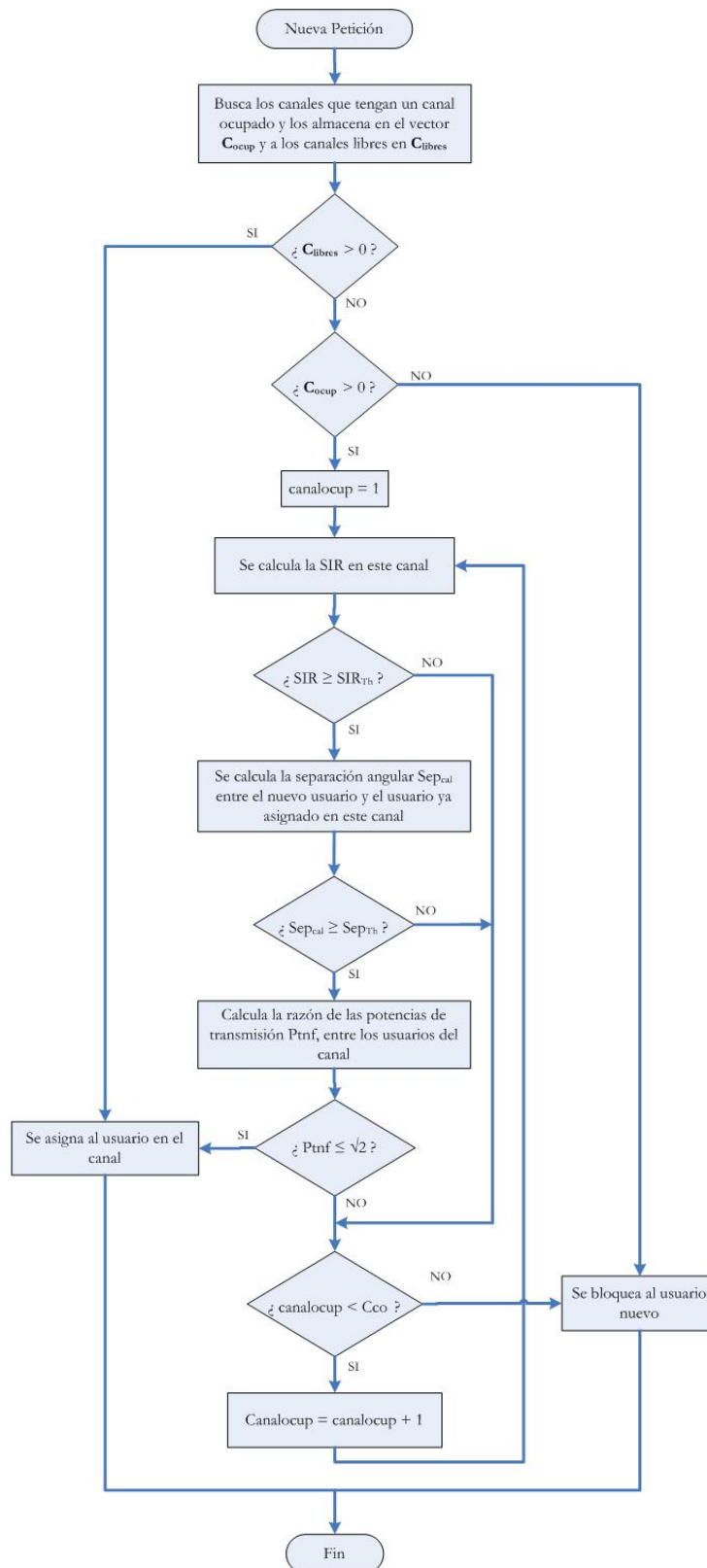


Figura 3.10 Algoritmo MIN.

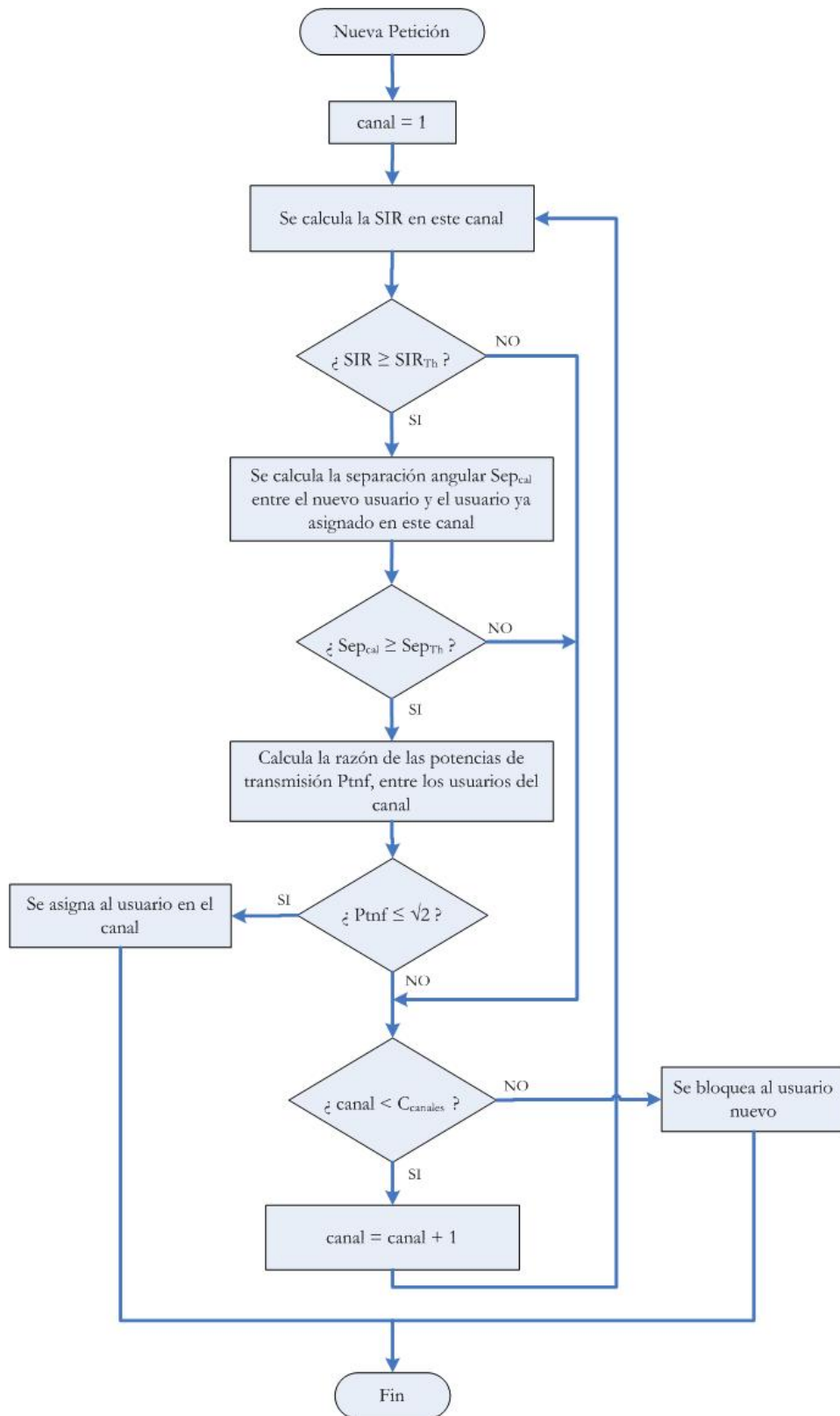


Figura 3.11 Algoritmo MAX.

Los usuarios se clasifican en usuarios estáticos y dinámicos, los cuales tienen diferentes velocidades. Se supone que el 20% de los usuarios son estáticos. La velocidad de los usuarios tiene una distribución normal, donde los usuarios estáticos tienen una media de 3 km/h y una varianza de 1 km/h, y los usuarios dinámicos tienen una media de 60 km/h y una varianza de 20 km/h. La dirección de movimiento se selecciona aleatoriamente, pero en caso de que un usuario llegue a una intersección, tiene dos opciones: tomar otra trayectoria dentro de la celda o salir de ella, en estos casos, la probabilidad de que el usuario tome otra trayectoria dentro de la celda es de 0.333. Si el usuario sale de la celda se supone que el usuario será atendido por otra celda.

Los resultados de ambos algoritmos se comparan entre sí y con un sistema sin SDMA. Tomando como referencia la probabilidad de bloqueo se observa que los algoritmos propuestos tienen un desempeño muy similar, donde ambos tienen una probabilidad de bloqueo menor al que presenta el sistema sin SDMA. Con respecto a las transferencias de llamadas, se observa que para tráfico bajo el algoritmo MAX es el que proporciona una tasa de transferencias de llamadas más pequeña que el algoritmo MIN, sin embargo, para tráfico pesado, ambos algoritmos tienen casi el mismo desempeño. Finalmente, para ambos algoritmos, la tasa de terminación forzada es casi la misma.

3.2.2 Sistemas multicelulares.

3.2.2.1 Sin movilidad y sin efectos de propagación.

En [24] se presenta el uso del *Algoritmo Duplicar Primero* para una red de telefonía local inalámbrica WLL (por sus siglas en inglés- *Wireless Local Loop*). En este artículo se tienen cuatro escenarios diferentes:

- ◆ El sistema convencional, el cual consta de estaciones base con una antena omnidireccional y usuarios con una antena direccional.
- ◆ Una antena inteligente en la estación base y una antena direccional en el usuario.
- ◆ Una antena inteligente en la estación base y antena omnidireccional en el usuario.
- ◆ Una antena inteligente en la estación base y un arreglo de antenas en el usuario.

El sistema consta de 4 celdas con 5 canales cada una. El modelo de tráfico es de Poisson, el tiempo de servicio tiene una distribución exponencial negativa y no existe cola de espera en el sistema. Los efectos de ensombrecimiento y de desvanecimientos no se consideran. La separación angular entre usuarios fue considerada como el criterio para asignar canales en los casos que utilizan la antena inteligente.

Los resultados obtenidos por simulación muestran que el sistema convencional presenta el peor desempeño. El segundo y tercer caso tienen un comportamiento muy similar y el cuarto escenario, el cual es el sistema propuesto, es el que presenta un mejor desempeño en términos de la probabilidad de bloqueo. Esto se debe a que en el primer caso, el sistema se encuentra limitado al número de canales que le han sido asignados, mientras que para los casos 2-4 el uso de SDMA aumenta la capacidad del sistema debido al uso más eficiente de los canales. Si se comparan estos casos, se puede ver que el sistema propuesto tiene un mejor desempeño que los otros dos debido a que el uso de un arreglo de antenas en el usuario da mayores oportunidades de que éste se conecte a estaciones base distantes, lo que con una antena direccional fija o una omnidireccional no es posible.

3.2.2.2 Sin movilidad y con efectos de propagación.

Con el criterio de asignación basado en la SINR y con control de potencia de lazo abierto. Los esquemas presentados en [25] se proponen para el enlace de subida de un sistema multicelular de 19 celdas donde el factor de reutilización establecido para la asignación fija es de 3. En estos algoritmos, una ranura de tiempo es asignada a un usuario nuevo dependiendo de la calidad de la señal de este usuario y de la calidad de los usuarios que ya han sido asignados. El control de potencia es de lazo abierto y se utiliza para comunicarse a las ranuras de tiempo y no para la petición de señal.

El primer algoritmo de asignación de canales lo denominan *Algoritmo de SINR más grande* y el diagrama de flujo se presenta en la figura 3.12. Cuando se recibe una petición de una ranura, la estación base calcula la SINR del nuevo usuario y busca una ranura disponible que le proporcione la mayor SINR a este usuario. Así, la estación base calcula la SINR de los usuarios asignados en la ranura que cumpla la condición anterior y si todas las SINR's están por encima de una $SINR_{Th}$ el nuevo usuario se asigna a esta

ranura. En caso de que no se cumpla esta condición, el algoritmo busca en la siguiente ranura que proporcione la mayor SINR al nuevo usuario y así sucesivamente hasta que logre asignarlo. Si ninguna ranura logra cumplir las condiciones anteriores, se bloquea al nuevo usuario.

El segundo algoritmo lo denominan *Algoritmo de menor diferencia* y el diagrama de flujo se muestra en la figura 3.13. En este algoritmo, se calcula la SINR del nuevo usuario y de los usuarios activos en todas las ranuras y la estación base calcula la diferencia de SINR's entre la $SINR_{max}$ y la $SINR_{min}$ en cada ranura. De esta manera, la estación base asigna al nuevo usuario a la ranura de tiempo con la menor diferencia de SINR's con la condición de que todas las SINR's estén por encima de una $SINR_{Th}$. Si ninguna ranura cumple con la condición anterior, el nuevo usuario es bloqueado.

Como ambos esquemas de asignación no garantizan la calidad de la señal de los usuarios asignados, se realizan transferencias intracelulares cuando la calidad de los usuarios se degrada. Por este motivo, la estación base calcula periódicamente la SINR de todos los usuarios. Si la SINR de los usuarios está por debajo de la $SINR_{Th}$, se busca una nueva ranura de tiempo siguiendo el algoritmo seleccionado. Si no se encuentra una ranura disponible, el usuario es forzado a terminar su transmisión.

Para obtener el desempeño del sistema se considera que los desvanecimientos son de tipo Rayleigh, el ensombrecimiento tiene una desviación estándar de 6 dB, el exponente de pérdidas es de 3.5, la $SINR_{Th}$ es de 10 dB, se tienen 6 ranuras, se consideran dos anillos de interferencias y el modelo de tráfico es de Poisson.

Los autores comparan el sistema propuesto SDMA/TDMA, con un sistema TDMA convencional y un sistema con celdas sectorizadas y prueban que el sistema propuesto aumenta la capacidad de un sistema de comunicaciones móviles.

Los resultados obtenidos por simulación muestran que el algoritmo de menor diferencia presenta una probabilidad de bloqueo y una probabilidad de terminación forzada más baja que el algoritmo de SINR más grande y los sistemas convencionales, ya que en este algoritmo las SINR's de los usuarios que comparten una ranura se encuentran casi al mismo nivel. También se observa que el sistema propuesto tiene un mejor desempeño que los otros sistemas y que este desempeño aumenta conforme el

número de antenas en el arreglo aumenta. El número de antenas varía de 2 a 4 elementos.

A pesar de que el artículo menciona que tiene dos configuraciones de arreglos, en los resultados no especifican la configuración utilizada ni realizan una comparación entre configuraciones, ya que como se mostró en el capítulo anterior, el uso de un tipo de arreglo determina la cantidad y la magnitud de las señales interferentes, lo cual hace que el desempeño del sistema no sea el mismo.

Con el criterio de asignación basado en la SINR y con control de potencia de lazo cerrado. En [26], se evalúa el desempeño de un sistema TDD SDMA/TDMA multicelular con 7 celdas y un arreglo circular uniforme de 3 elementos con una separación entre elementos de 0.5λ . El resto de los parámetros son los mismos que en [25] pero con la diferencia de que ahora se propone un algoritmo para el control de potencia de lazo cerrado para compensar la diferencia en la calidad de la señal de los diferentes usuarios.

En un sistema con SDMA, debido a que la calidad de la señal de un usuario dentro de un canal depende de las señales de los usuarios que comparten dicho canal, es necesario que cada señal sea transmitida con la menor cantidad de potencia y que se mantenga cierta calidad en el enlace, por lo que se deduce que el control de potencia tiene impacto en el desempeño del sistema completo. El algoritmo de control de potencia inicia calculando la SINR en cada enlace, las cuales deben estar por encima de una $SINR_{Th}$, por lo que la potencia de transmisión de cada usuario es ajustada para satisfacer esta condición. De esta forma, el algoritmo converge al valor óptimo de potencia y al patrón de radiación adecuado cuando la SINR de cada usuario es igual a la $SINR_{Th}$ establecida, es decir, el algoritmo propuesto minimiza la potencia total asignada debido a que cada señal es transmitida con la potencia mínima que pueda mantener la calidad de la señal requerida. El enlace de subida y de bajada se consideran recíprocos por lo que el vector de pesos del enlace de subida se utiliza como el vector de pesos para el enlace de bajada.

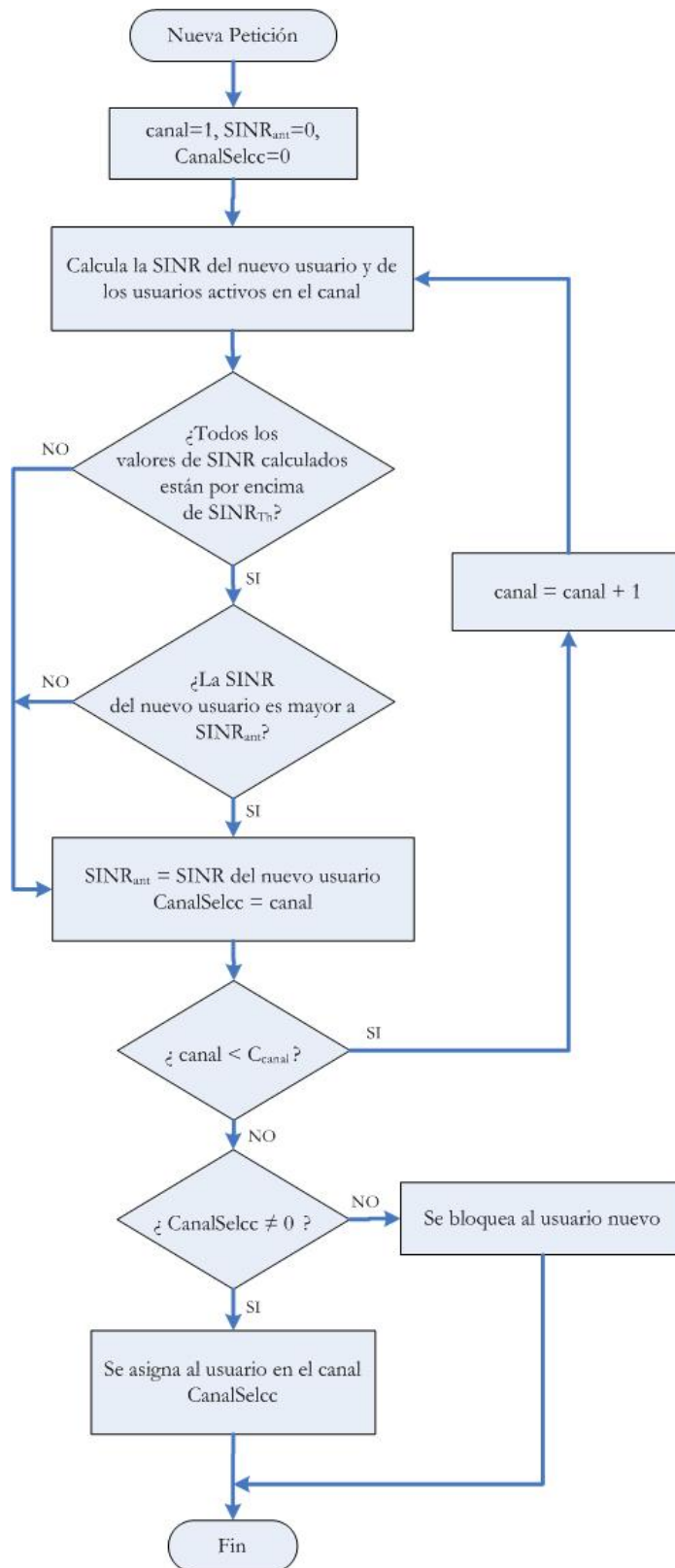


Figura 3.12 Algoritmo de SINR más grande.

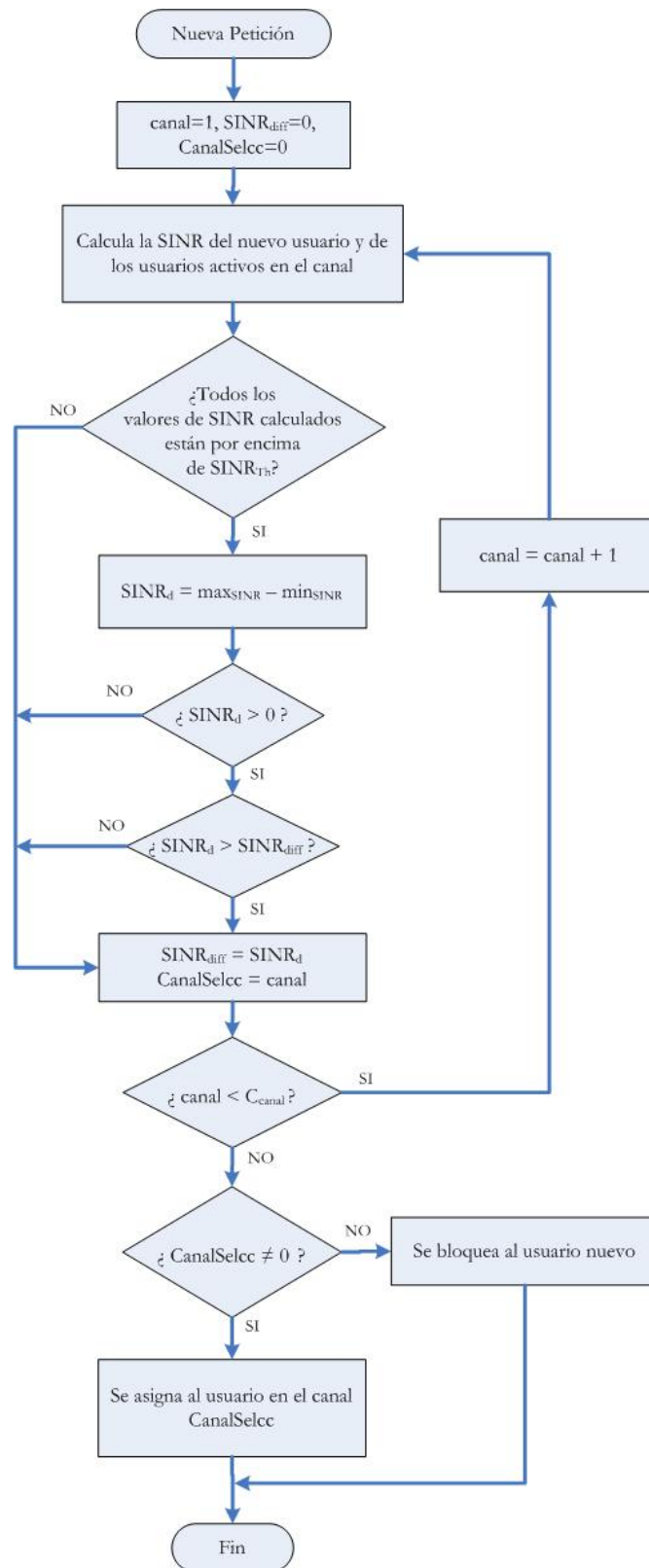


Figura 3.13 Algoritmo de menor diferencia.

El desempeño del control de potencia de lazo cerrado se presenta en términos de la probabilidad de bloqueo y la probabilidad de terminación forzada, dependiendo del número de iteraciones que realizan para la convergencia del control de potencia. En el artículo muestran que para ambos enlaces la probabilidad de bloqueo disminuye conforme el número de iteraciones incrementa, pero la probabilidad de bloqueo se mantiene casi igual cuando el número de iteraciones es mayor a 9, por lo que el algoritmo converge a una solución óptima. El desempeño de este sistema se compara con un sistema que utiliza un control de potencia de lazo abierto y los resultados muestran que el sistema con control de potencia de lazo cerrado es mejor porque se controla la potencia transmitida a la celda permitiendo que más usuarios sean admitidos reduciendo significativamente la probabilidad de bloqueo. Otro efecto observado al aplicar control de potencia, es que los usuarios no se interfieren en gran medida en comparación con un sistema sin control de potencia por lo que la probabilidad de terminación forzada del sistema propuesto también se reduce.

Con el criterio de asignación basado en la SINR y con tráfico no homogéneo. En [27] se hace una modificación al *Algoritmo de SINR más grande* presentado en [25], donde ahora se toma en cuenta un sistema TDD SDMA/TDMA multicelular de 19 celdas con servicios de datos aparte de los servicios de voz, tales como transferencia de archivos, correo electrónico y acceso a Internet tanto para el enlace de subida como para el enlace de bajada. Se considera que el número de llamadas promedio de servicios de conmutación de circuitos es equivalente al de servicios de conmutación de paquetes. Además de que los servicios de conmutación de circuitos utilizan una modulación BPSK (8 kbps) mientras que los servicios de conmutación de paquetes se pueden escoger entre BPSK (8 kbps), QPSK (16 kbps), 16QAM (32 kbps), 64QAM (48 kbps) y 256QAM (64 kbps).

Cuando se recibe la petición de una ranura, la estación base estima todas las SINR's de los usuarios activos y del nuevo usuario. Para ambos enlaces, se asigna la ranura que le proporcione la mayor SINR al nuevo usuario, con la condición de que su SINR y las SINR's de los usuarios que ocupan esa ranura estén por encima de una $SINR_{Th}$. Para el enlace de bajada, si el nuevo usuario desea tener servicio de conmutación

de paquetes, se selecciona un nivel de modulación adecuado para que la PBE esté por encima de un umbral. Si el nuevo usuario es asignado a una ranura exitosamente tanto en el enlace de subida como en el de bajada, el usuario es admitido al sistema, de otra forma, el usuario es bloqueado. Para las transferencias intracelulares se monitorea periódicamente la SINR de los usuarios. Si los usuarios son de conmutación de circuitos y la SINR está por debajo de la $SINR_{Th}$, la estación base trata de asignarlo a otra ranura de acuerdo al algoritmo anterior y en caso de que no encuentre una ranura disponible, el usuario es forzado a terminar la transmisión. En cambio, si los usuarios son de conmutación de paquetes, se espera a transmitir hasta que la calidad de la señal se recupere, tomando en cuenta que el retardo del sistema se debe principalmente a la espera de servicios de este tipo de usuarios.

Los parámetros son los mismos que en [25] con la diferencia de que ahora se tienen 10 ranuras, un arreglo circular uniforme de 3 elementos con una separación entre elementos de 0.5λ y un control de potencia de lazo cerrado. Los resultados obtenidos por simulación se comparan con un sistema TDMA convencional y un sistema sectorizado y se observa que la probabilidad de bloqueo, la probabilidad de terminación forzada y el retardo promedio son menores para el sistema propuesto debido a que con SDMA se puede suprimir la interferencia además de que se tiene más ranuras para asignar a más usuarios, por lo que se aceptan a más usuarios, se interfieren menos entre ellos y es más rápido darles el servicio, con lo que se comprueba que el sistema SDMA/TDMA puede soportar el tráfico de multimedia en forma eficiente.

Con el criterio de asignación basado en la SINR y con tráfico asimétrico. En [28] se propone un sistema TDD SDMA/TDMA que maneja tráfico asimétrico con un control de potencia de lazo cerrado basado en la calidad de los enlaces, donde la potencia total de transmisión es ajustada a un mínimo con la condición de que cada señal esté por encima de un umbral. En el enlace de bajada, el sistema asigna más de una ranura a cada usuario, mientras que para el enlace de subida se asigna una sola ranura a cada usuario. La asignación de ranuras, se basa en [25], pero ahora las ranuras tienen prioridades, donde la ranura que tiene la prioridad más alta es aquella que tiene una

menor cantidad de usuarios. El diagrama de flujo del algoritmo para la asignación de ranuras se muestra en la figura 3.14.

El proceso de arribo es de Poisson y se considera una cola donde los usuarios se procesan de acuerdo a un orden FCFS. Para cada usuario el sistema verifica continuamente la calidad de la señal y la ajusta. En caso de que el usuario no pueda mantener la calidad de la señal, es forzado a terminar y su petición de servicio se mantiene en la cola para esperar a ser admitido otra vez. Los criterios de desempeño del sistema son la tasa de transmisión promedio y el retardo promedio, que se define como el tiempo promedio entre la generación de la llamada hasta el final de su transmisión, incluyendo el tiempo de espera en la cola y el tiempo de procesamiento cuando los datos son transmitidos.

El sistema fue evaluado utilizando el Simulador MONSTER [26]. Se consideraron 7 celdas con 12 ranuras por trama, el exponente de pérdidas por distancia es 3.5, el ensombrecimiento tiene una distribución lognormal y el desvanecimiento es de tipo Rayleigh. Los usuarios están uniformemente distribuidos en el sistema. Cada estación base consta de un arreglo circular uniforme con 3 elementos con una separación de 0.5λ y el factor de reuso es de 3.

Los resultados del sistema propuesto se compararon con diferente número de ranuras para cada enlace y con un sistema sin SDMA con asignación de ranuras simétrico, es decir, el número de ranuras en el enlace de subida y en el enlace de bajada es el mismo. Se observa que con el sistema propuesto, el retardo promedio es reducido conforme se incrementa el número de ranuras asignadas en el enlace de bajada, y entre las configuraciones de ranuras propuestas, la configuración de 3-para subida, 9-para bajada (que es la asignación de ranuras más grande), es el que tiene el retardo promedio más bajo. De esta manera, se concluye que el retardo promedio se reduce conforme se incrementa el número de ranuras en el enlace de bajada. También se observó que la tasa de transmisión promedio es mucho más grande para el sistema con SDMA en comparación con el sistema convencional debido a que SDMA incrementa el número de ranuras en el sistema provocando que se transmita una mayor cantidad de información, además de que se hace un eficiente uso de las ranuras, incrementándose el desempeño

del sistema. De igual forma que con el retardo promedio, la configuración 3-para subida, 9-para bajada es el que presenta un mejor desempeño.

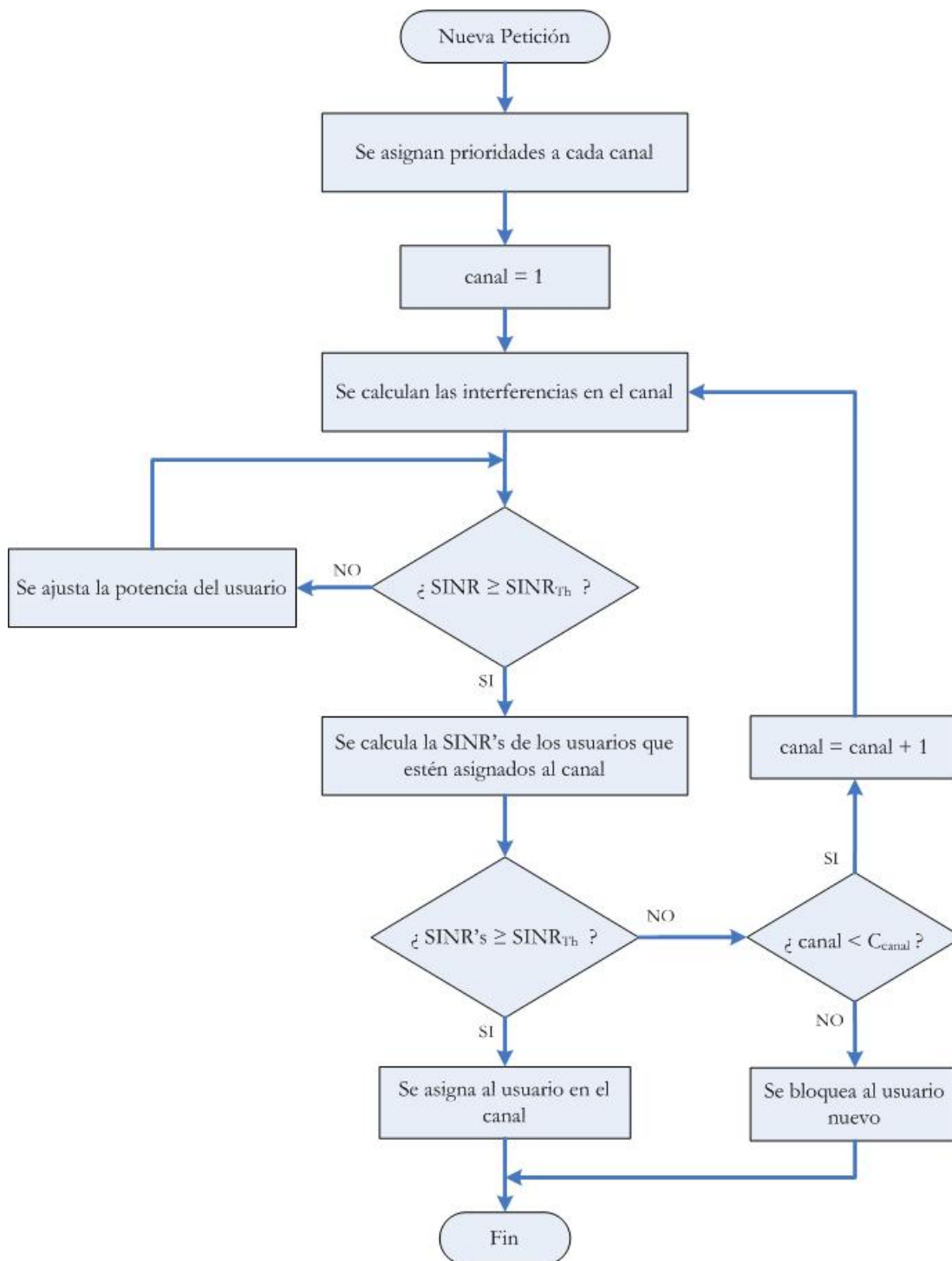


Figura 3.14 Algoritmo para la asignación de ranuras.

3.3 Esquemas de asignación dinámica de canales espacio – tiempo para SDMA.

3.3.1 Sin movilidad.

Con el criterio de asignación basado en la SIR sin control de potencia. En [30] se considera el enlace de bajada de un sistema multicelular con 3 estaciones base con un arreglo de 4 elementos cada una en una celda circular, donde los usuarios están uniformemente distribuidos y son estáticos. Se considera que la trama tiene 10 ranuras. El exponente de propagación es 3 y el ensombrecimiento se considera lognormal con una desviación estándar de 6 dB. El patrón de radiación de la antena inteligente genera nulos en la dirección de los usuarios interferentes, por lo que se supone que los usuarios están perfectamente separados y no hay interferencia intracelular. El ruido térmico se supone insignificante en comparación con la interferencia intercelular, por lo que solo se considera la SIR como criterio de asignación de canales. Cada usuario puede transmitir voz o video. Cada paquete tiene un tiempo de vida, después del cual, si no ha sido transmitido se elimina de la cola y se consideran retransmisiones entrando a la cola con el tiempo de arribo original.

Para la calendarización se basa en [18] el cual tiene un bloque que da prioridad a los paquetes de acuerdo a su tiempo de vida. Además se tiene un bloque de asignación el cual acomoda los paquetes en las ranuras de cada trama con el algoritmo Ajuste Max-Min distribuido DMMF (por sus siglas en inglés – *Distributed Max-Min Fit*), el cual trata de asignar a los usuarios en las ranuras considerando la separación espacial entre ellos y estimando la interferencia intercelular calculada como una fracción de la interferencia en el peor caso. DMMF toma cada paquete de acuerdo a su prioridad, lo verifica en todas las ranuras y lo asigna en la que sea más compatible espacialmente hablando y que maximice el mínimo de la SIR estimada para los usuarios ya asignados en la ranura y el nuevo usuario, siempre y cuando su SIR esté por encima de un umbral. Además de que se usa un mecanismo de compensación que limita el número máximo de paquetes por usuario de acuerdo a su prioridad.

Los resultados muestran que conforme se aumenta el número de elementos del arreglo el *throughput* del sistema aumenta. El algoritmo propuesto se compara con un sistema que se basa en FCFS y con un sistema con EDDF. Para un nivel de tráfico bajo se observa que el algoritmo de asignación de ranuras da servicio a casi todos los usuarios

sin SDMA, en cambio, conforme el número de usuarios incrementa, el algoritmo aplica SDMA para dar servicio a más usuarios por trama y al mismo tiempo reducir la interferencia para los usuarios que no están en una posición favorable con respecto a los haces de celdas interferentes.

El algoritmo propuesto garantiza un *throughput* normalizado por encima de 0.9 a los usuarios de video ya que siempre se trata de garantizar una tasa dada sin importar el número de usuarios que tenga el sistema, mientras el desempeño de los otros algoritmos disminuye conforme el número de usuarios incrementa. También se muestra que el desempeño del sistema mejora si se tienen desvanecimientos rápidos debido a que los usuarios recuperan más rápido la potencia de señal requerida para transmitir, es decir, la retransmisión de paquetes se hace en menos tiempo, haciendo que el retardo promedio del sistema disminuya, además de que hay menos pérdidas de paquetes al hacer menos retransmisiones.

Con el criterio de asignación basado en la SIR con control de potencia. En [31] se presenta el enlace de bajada de un sistema multicelular TDMA/SDMA con control distribuido con el fin de reducir la señalización. Los usuarios son estáticos, el desvanecimiento es tipo Rayleigh, el ensombrecimiento es lognormal con una desviación estándar de 6 dB y el exponente de propagación es 3. No se toma en cuenta el ruido del sistema y el algoritmo de procesamiento de señales de la antena inteligente es MVDR, presentado en la sección 2.3.3.1. El criterio de asignación de una ranura es que la SIR del usuario esté por encima de una $SIR_{Th} = 6.8$ dB. Las estaciones base cuentan con un arreglo de 3 elementos y las tramas constan de 9 ranuras. El control de potencia utilizado es DCPC (por sus siglas en inglés – *Distributed Constrained Power Control*) el cual intenta que la SIR de los usuarios que comparten una ranura sea igual a la SIR_{Th} .

Los algoritmos propuestos son DRF-IA (por sus siglas en inglés – *Distributed Reverse Fit with Interference Avoidance*) donde el objetivo del algoritmo es provocar que los usuarios que tengan una SIR grande sean interferidos antes que los usuarios más sensibles y DMMF-IA (por sus siglas en inglés – *Distributed Max-Min Fit with Interference Avoidance*) el cual trata de asignar las ranuras de acuerdo a una secuencia de rechazo de interferencias predefinida. Estos algoritmos se comparan con DMMF, con CMMF (por

sus siglas en inglés – *Centralized Max – Min Fit*) en el cual se utiliza el control centralizado para asignar al usuario más compatible dentro y con la asignación aleatoria en el cual tanto el usuario como la ranura se escogen aleatoriamente.

Se utilizaron dos escenarios: el primero que representa una zona con tráfico alto, consta de 3 estaciones base y los usuarios están uniformemente distribuidos dentro del círculo circunscrito al triángulo equilátero que forman las estaciones base y sin control de potencia. El segundo escenario consta de 12 celdas hexagonales en el cual se eliminan los efectos de borde. En el primer escenario, al comparar los algoritmos en términos del *throughput*, CMMF es el que presenta el mejor desempeño y la asignación aleatoria es el que tiene el peor desempeño, mientras que los algoritmos propuestos están entre estos dos por lo que se puede observar que al menos en parte reducen la diferencia de desempeño que existe entre CMMF y la asignación aleatoria, además de que se concluye que los algoritmos con rechazo de interferencia al poder admitir más usuarios, tienen mejor desempeño en comparación con los que no lo tienen. En el segundo escenario, a pesar de que el número de usuarios interferentes aumenta, los algoritmos mantienen el mismo comportamiento gracias al control de potencia.

3.3.2 Con movilidad.

Con el criterio de asignación basado en la SIR únicamente. En [32] se presentan 4 algoritmos de asignación dinámica de canales en un sistema multicelular con 81 celdas donde no se consideran los efectos de borde del sistema. Cada estación base consta de una antena inteligente que genera un patrón de radiación con un ancho de haz principal de 45° y lóbulos laterales con una atenuación de 30 dB con respecto a la ganancia máxima. El exponente de propagación es de 3.5 y el ensombrecimiento es lognormal con una desviación estándar de 8 dB. Se simularon dos trayectorias además de la trayectoria de línea de vista, donde no hay retardo entre ellas. El sistema consta de 63 canales. El proceso de arribo tiene una distribución de Poisson y la duración de las llamadas tiene una distribución exponencial con una media de 100 segundos. Un canal es asignado a un usuario si su SIR está por encima de 21 dB, un usuario se reasigna cuando su SIR está por debajo de 14 dB y la SIR que puede tener el usuario en ese nuevo canal debe estar por encima de 19 dB. Las llamadas son forzadas a terminar si la SIR del usuario está por

debajo de 12 dB durante 5 segundos. El control de potencia se aplica en ambos enlaces utilizando la técnica de balanceo autónomo de SIR el cual tiende a ajustar la SIR para que los usuarios que comparten el mismo canal tengan la misma SIR.

El primer algoritmo es el de carga de canal concentrada CCL (por sus siglas en inglés - *Concentrated Channel Load*) y el diagrama de flujo se presenta en la figura 3.15. En este algoritmo se trata de maximizar el reuso de los canales dentro de una celda, por lo que primero se busca asignar el canal que tenga más usuarios asignados siempre y cuando su SIR esté por encima de un umbral.

El segundo algoritmo es el de carga de canal uniforme ECL (por sus siglas en inglés - *Equal Channel Load*) y el diagrama de flujo se muestra en la figura 3.16. Este algoritmo distribuye el tráfico uniformemente en los canales, al tratar de asignar primero a los canales que tengan una menor cantidad de usuarios asignados, siempre y cuando la condición de la SIR se cumpla.

El tercer algoritmo es el de reuso de partición autónoma ARP (por sus siglas en inglés - *Autonomous Partitioning Reuse*) el cual trata de crear un patrón de reuso de anillos concéntricos dentro de las celdas, donde diferentes anillos utilizan un patrón de reuso diferente. Su diagrama de flujo es mostrado en la figura 3.17.

El cuarto algoritmo es el de menor interferencia LIA (por sus siglas en inglés - *Least Interference Algorithm*), el cual selecciona el canal que tenga una menor cantidad de interferencias, siempre y cuando la SIR del usuario esté por encima del umbral. El diagrama de flujo se presenta en la figura 3.18.

Hay dos tipos de usuarios: estáticos y dinámicos. La velocidad de ambos se define como una variable aleatoria que tiene una función de densidad de medio coseno:

$$f_v(v) = \begin{cases} K \text{sen}(v\pi / v_{\max}) & 0 \leq v \leq V_{\max} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde K es la amplitud de la señal. Para los usuarios estáticos, $V_{\max} = 5$ km/h y para los usuarios dinámicos $V_{\max} = 60$ km/h. Una vez establecida su velocidad, ésta se mantiene constante durante el tiempo de servicio. Los usuarios se mueven en segmentos de línea recta y cambian su dirección cada 10 segundos.

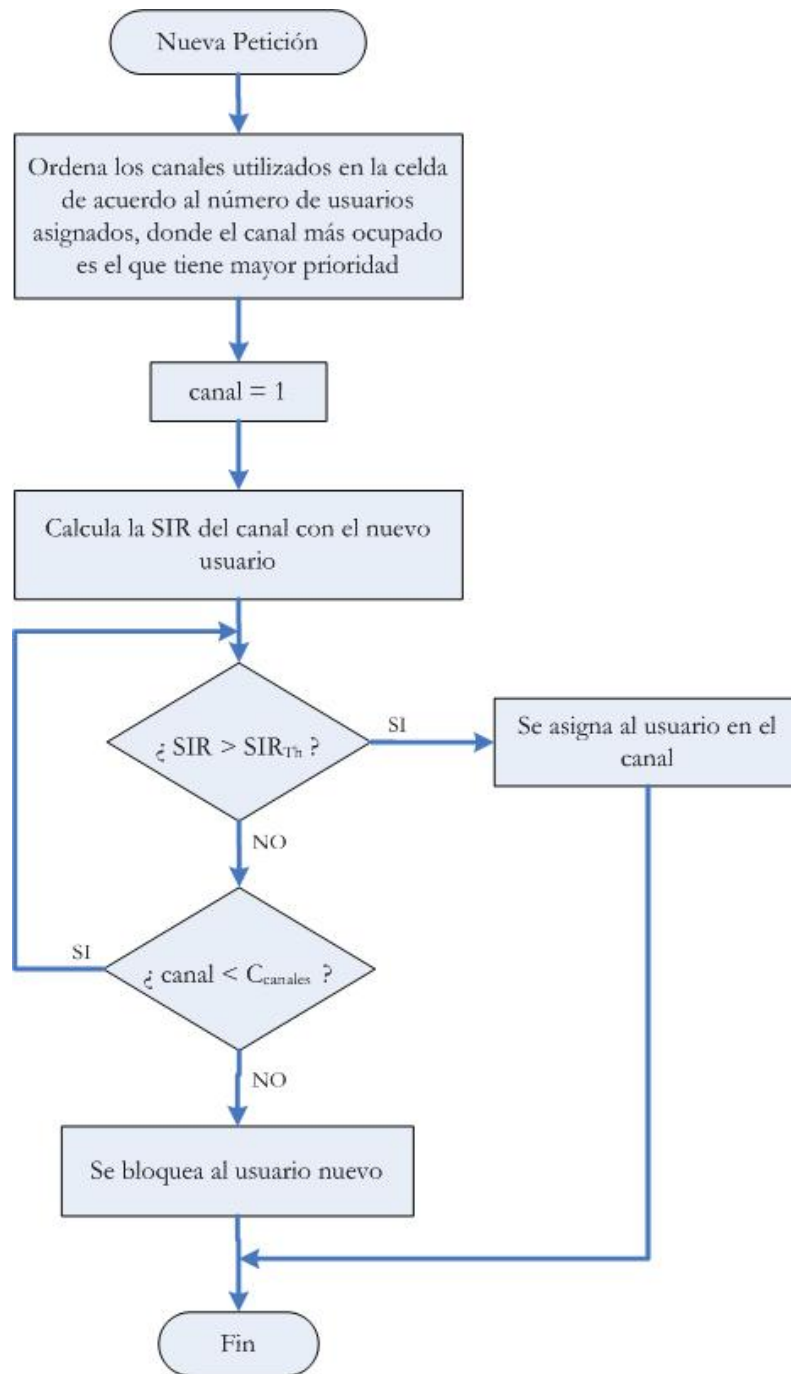


Figura 3.15 Algoritmo CCL.

Los algoritmos fueron probados en dos escenarios, el primero consta de 80% de usuarios estáticos y el 20% dinámicos y el segundo donde el 20% son estáticos y el 80% dinámicos.

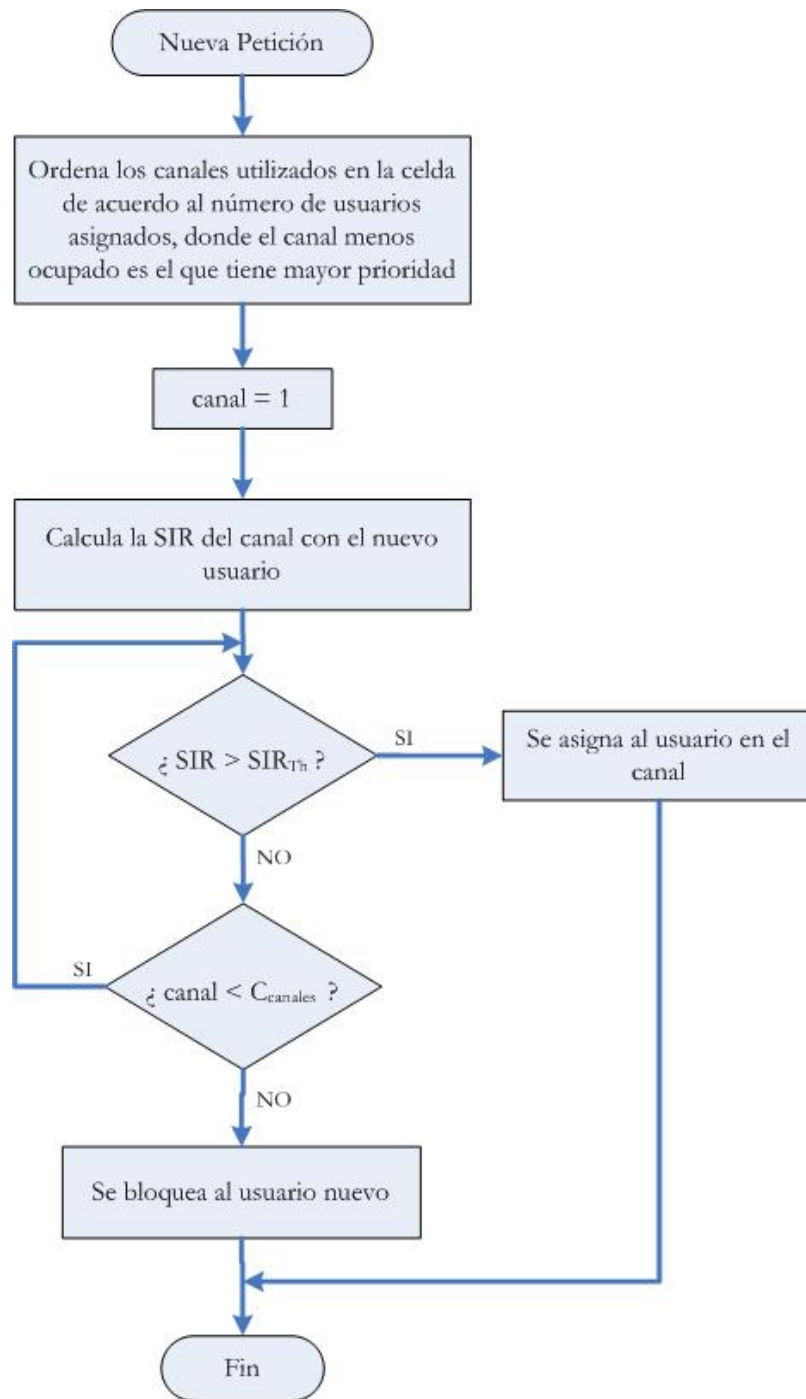


Figura 3.16 Algoritmo ECL.

Primero se compara un sistema con antenas omnidireccionales, un sistema con antenas inteligentes pero sin SDMA y el sistema propuesto con SDMA y los algoritmos LIA y ARP con el primer escenario de movilidad.

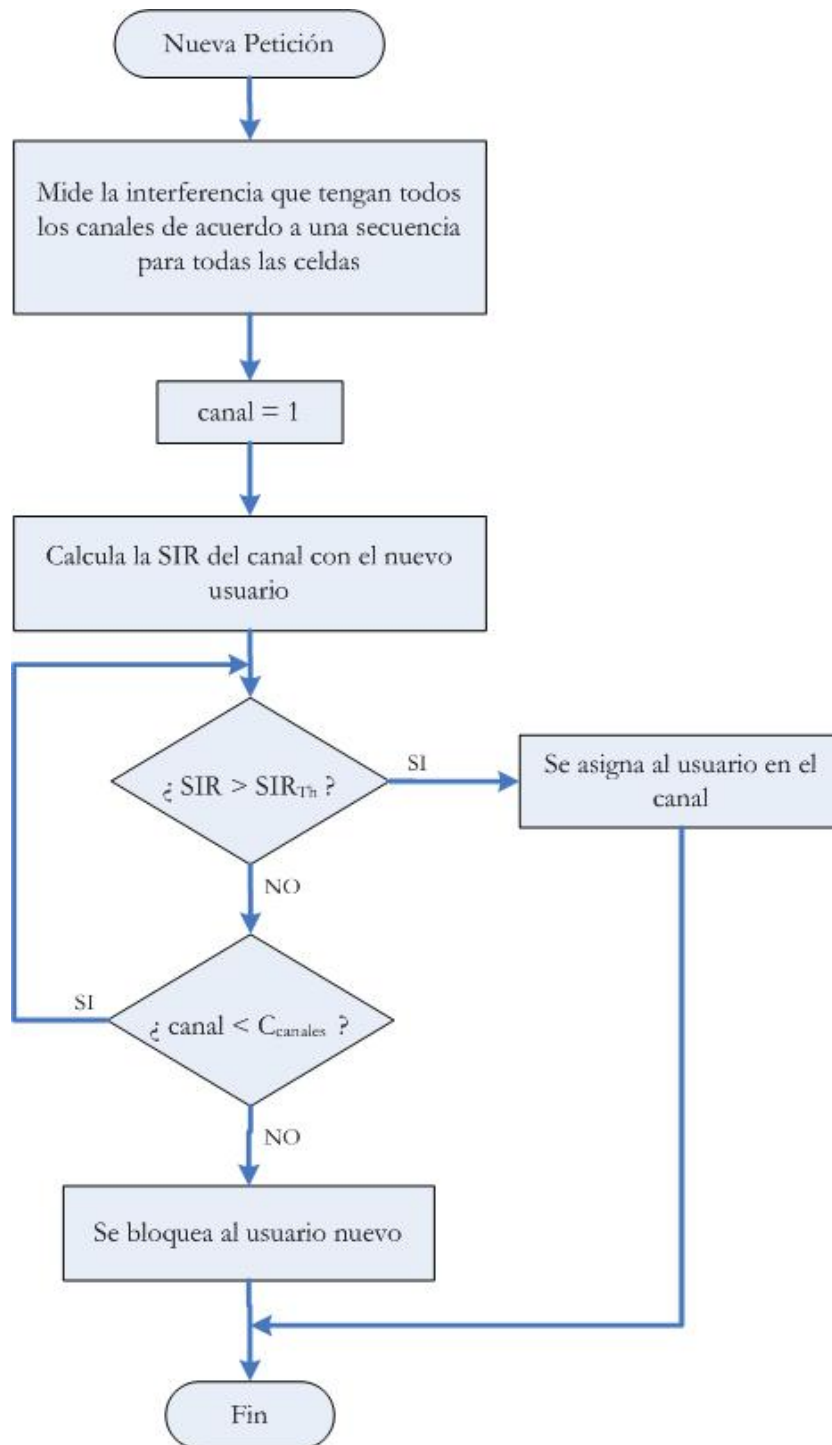


Figura 3.17 Algoritmo ARP.

Los resultados muestran que el sistema con antenas omnidireccionales es el que presenta la probabilidad de bloqueo más grande.

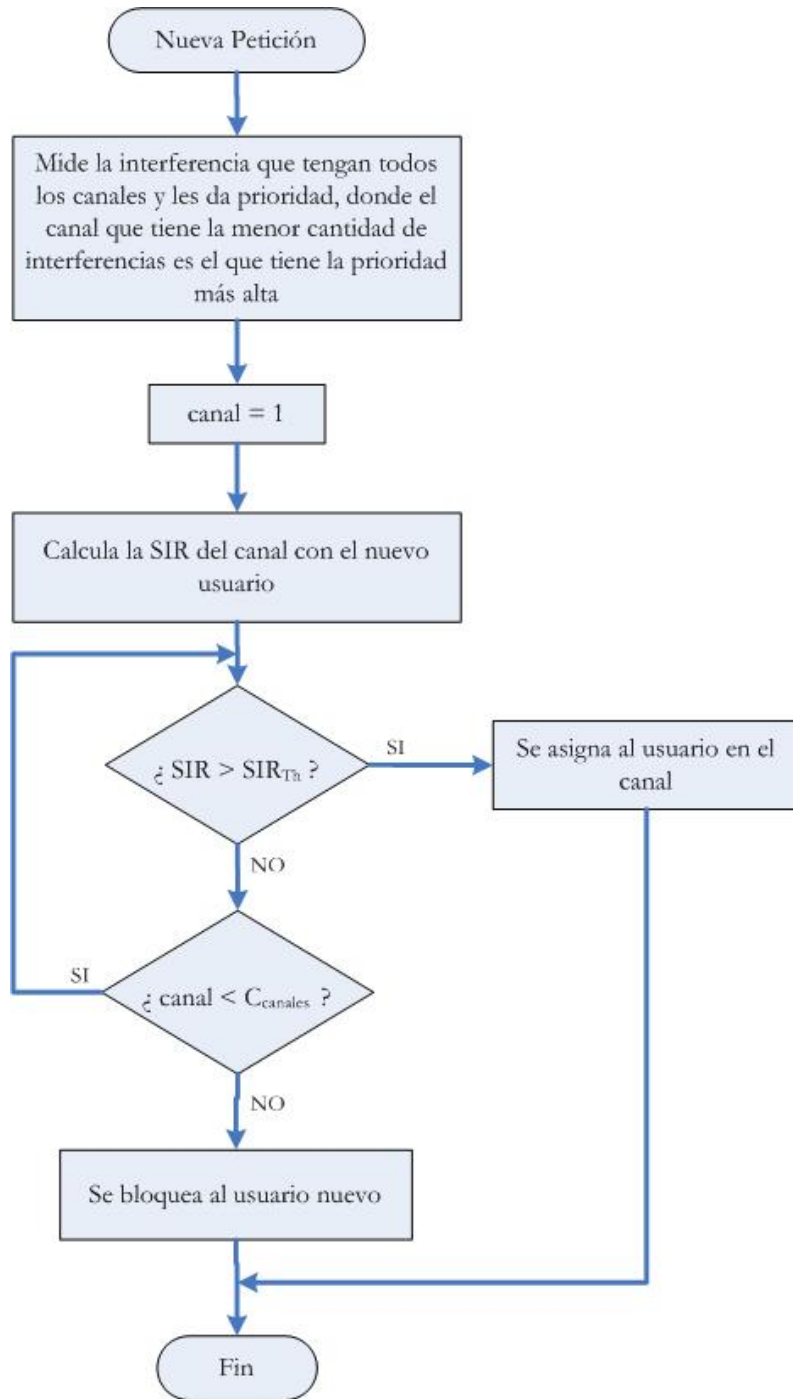


Figura 3.18 Algoritmo LIA.

En cambio, con el sistema de antenas inteligentes sin SDMA se reduce considerablemente la probabilidad de bloqueo con respecto al sistema anterior, debido a que la antena inteligente forma patrones directivos que reducen significativamente las

interferencias en comparación con las antenas omnidireccionales que radían en todas direcciones. Sin embargo, los algoritmos LIA y ARP que se basan en SDMA son los que presentan la probabilidad de bloqueo más baja, lo que demuestra que al reutilizar canales dentro de la misma celda aumenta la capacidad del sistema y el número de usuarios rechazados por falta de recursos disminuye.

Al comparar los algoritmos propuestos en el primer escenario de movilidad, se observa que el algoritmo CCL es el que ofrece una probabilidad de bloqueo más grande a pesar de que este algoritmo se diseñó para maximizar el reuso de los canales dentro de las celdas, mientras que ARP es el que resulta con el mejor desempeño. El bajo desempeño de CCL se justifica analizando la distribución del reuso de canales, donde se muestra el número promedio de canales que utiliza una estación base en el sistema. Claramente se muestra que CCL usa en promedio 30 de los 63 canales disponibles, lo que significa que los mismos canales son reutilizados por las celdas frecuentemente, provocando que la interferencia en ese canal sea lo suficientemente grande como para que no sea reutilizado en otra celda cercana. Como consecuencia, algunos canales desocupados en otras estaciones base no pueden asignar ningún usuario debido al alto nivel de interferencias, reduciendo así, la capacidad del sistema. Por otro lado, una pequeña cantidad de usuarios co-canal provoca un desempeño muy pobre, tal como es el caso de ECL que es algoritmo que en desempeño se acerca a CCL. En cambio, con el algoritmo ARP un número moderado de usuarios comparten un canal dentro de una celda y una fracción moderada de canales se comparte entre las celdas, por lo que ARP muestra un buen balance entre el reuso de canales dentro de una celda y el reuso de canales entre celdas. Sin embargo, el buen desempeño del algoritmo ARP tiene un alto costo, ya que es el algoritmo que más reasignaciones por llamada y probabilidad de indisponibilidad presenta, lo cual refleja que el algoritmo necesita una gran cantidad de señalización y la calidad del enlace casi siempre será muy pobre, condiciones no deseadas en un sistema de comunicaciones. Este comportamiento se debe a que el algoritmo logra aceptar una gran cantidad de usuarios gracias a que agrupa a los usuarios co-canal lo más cerca posible y así tener distancias de reuso más pequeñas, pero al mismo tiempo los usuarios experimentarán momentos de interferencia excesiva debida a su movimiento y a los efectos de propagación en el canal. En cambio el algoritmo LIA a pesar de que no

tiene el mejor desempeño en función de la probabilidad de bloqueo, es el que tiene una menor cantidad de reasignaciones por llamada y probabilidad de indisponibilidad, debido a que tiende a asignar a los usuarios en los canales que tengan un nivel de interferencia mínimo.

Finalmente, al comparar los escenarios de movilidad se observó que un gran nivel de movilidad provoca cierta degradación en la probabilidad de bloqueo para todos los algoritmos, además de que el número de reasignaciones por llamada y la probabilidad de terminación forzada aumentan, debido a que en cada posición del usuario no se tienen las mismas condiciones con las que fue aceptado en cierto canal.

Con los criterios de asignación basados en costos intracelulares y costos intercelulares. En [33] se presenta un esquema de asignación de canales llamado HSDCA (por sus siglas en inglés – *Hierarchical SDMA DCA*) el cual combina SDMA y DCA eficientemente ya que se busca que SDMA optimice el reuso de canales dentro de una celda y que DCA optimice el reuso de canales entre celdas. En HSDCA el proceso de asignar un canal a un usuario se divide en dos etapas: la asignación de un canal a una estación base (asignación intercelular) y la asignación de un canal a un usuario (asignación intracelular) donde los criterios de asignación se basan en un conjunto de costos. En caso de que un usuario no pueda ser atendido por un canal que ya ha sido asignado a la celda, el algoritmo trata de adquirir un canal adicional vía DCA usando la asignación intercelular y si esta asignación falla, el usuario es bloqueado.

Para SDMA existen dos criterios, el primero permite que dos usuarios compartan el mismo canal si su separación angular (vista desde la estación base) excede cierta separación angular umbral y si la razón de sus distancias (medidas desde la estación base) no excede un valor umbral. El segundo se basa en la SINR y se permite la asignación de los usuarios en el mismo canal si su SINR está por encima de una $SINR_{Th}$.

Para la asignación de canales a una estación base es necesario desacoplar la asignación intercelular de la asignación intracelular, por lo que lo más apropiado es seleccionar un esquema de DCA que no aplique condiciones de SIR. Dos esquemas que cumplen con esta condición son: GDCA (por sus siglas en inglés – *Geometric Dynamic Channel Allocation*) y CFDCA (por sus siglas en inglés – *Cost Function DCA*). La diferencia

entre estos esquemas es la información que cada estación base necesita para el proceso de asignación de canales. En GDCA a cada celda se le asigna un valor de acuerdo a la prioridad de cada canal basado en un patrón de reuso fijo, mientras que en CFDCA no se le da prioridad a los canales, por lo que el algoritmo permite un empaquetamiento máximo de canales tomando en cuenta el uso actual de los canales localmente es decir, los costos de un canal se asocian con el número de celdas que lo usan en la vecindad interferente de la celda en cuestión.

Una variación de HSDCA es el nivel de agrupamiento de canales. Cuando un usuario termina su llamada, el canal es liberado permitiendo que regrese al conjunto de canales libres. Antes de que la llamada del usuario termine, el algoritmo verifica cuántos usuarios todavía operan en ese canal por medio de SDMA. Si no hay usuarios, el canal simplemente es liberado, y si hay usuarios, el algoritmo trata de acomodarlos en otros canales. Entre más usuarios sean atendidos por canal, la probabilidad de que un canal sea regresado al conjunto de canales libres para ser utilizado por otras estaciones base aumenta, lo que refleja un incremento en la capacidad del sistema, con la desventaja de que el número de transferencias por llamada aumenta.

El desempeño de los algoritmos se mide en función de la probabilidad de bloqueo, la probabilidad de terminación forzada y el promedio de transferencias durante una llamada y se comparan con un sistema con SDMA pero con asignación fija de canales. Se simularon dos escenarios, el primero consta de 49 celdas hexagonales y el segundo consta de 50 celdas irregulares. El exponente de propagación es de 4 y el ensombrecimiento es lognormal con una desviación estándar de 6 dB. Cada estación base consta de una antena inteligente que genera un patrón de radiación con un ancho de haz principal de 50° y lóbulos laterales con una atenuación de 20 dB con respecto a la ganancia máxima. El modelo de movilidad es Browniano donde la velocidad tiene una distribución normal donde la velocidad inicial es de 0 km/hr y la velocidad máxima es de 50 km/hr para el primer escenario y la velocidad máxima igual a 30 km/hr para el segundo escenario.

Debido a la adaptación dinámica de la asignación de canales en el sistema, los resultados muestran que HSDCA tiene un mayor desempeño en comparación con SDMA-FCA y conforme el agrupamiento de usuarios en HSDCA aumenta, el

desempeño es aun mejor, lo que se debe a que se liberan canales para atender a usuarios en otras celdas. Sin embargo, la mejora en desempeño no es tan significativa conforme el número de usuarios agrupados aumenta, por lo que se deduce que no es conveniente incrementar el nivel de agrupamiento tanto como se desee. Finalmente se observa que CFDCA tiene un mejor desempeño que GDCA debido a que CFDCA asigna los canales utilizando más información en tiempo real de las condiciones del tráfico del sistema que GDCA. No obstante, CFDCA tiene más transferencias por llamada que GDCA, indicando el esfuerzo más grande que realiza en comparación con GDCA causado por el nivel de libertad tan grande que tiene para adaptarse al tráfico.

3.4 Conclusiones.

En este capítulo se presentó el estado del arte de los esquemas de asignación de canales espacio – tiempo, donde se confirmó que SDMA puede ser aplicado en un sistema con cualquier esquema de acceso múltiple proporcionando mayor capacidad. Es importante mencionar que para niveles de tráfico bajo, SDMA casi no es utilizado debido a que los usuarios en su mayoría pueden ser atendidos por los algoritmos sin el reuso de canales, en cambio, conforme el tráfico aumenta se puede observar que los esquemas de asignación con SDMA se aplican en su totalidad mejorando el desempeño general del sistema en comparación con un sistema sin SDMA.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la tendencia en los sistemas de comunicaciones es proporcionar servicios de datos además de los de voz. SDMA puede atender esta demanda fácilmente debido al uso más eficiente de los recursos del sistema.

También se mostró que un punto clave en la implementación de SDMA es la selección de los criterios de asignación de canales, los cuales en su mayoría están en función de la interferencia que existe entre los usuarios que comparten un canal, debido a que con SDMA estos usuarios estarán dentro de la misma celda y al igual que con otras técnicas de acceso múltiple, se debe tener especial cuidado en proporcionar una buena calidad de servicio.

Con respecto a la asignación de canales, la combinación SDMA-DCA tiene un mejor desempeño que la combinación SDMA-FCA, lo que indica que SDMA conserva

las ventajas inherentes de DCA y en algunos casos relaja los criterios de asignación de los algoritmos de DCA para que sean más sencillos.

También se observó que un sistema con SDMA requiere más señalización debido al reuso de los canales dentro de una celda, ya que es necesario marcar la diferencia espacial que existe entre usuarios que comparten un canal para identificarlos correctamente.

Finalmente se concluye que el incremento en el desempeño que proporciona SDMA depende del ambiente del sistema de comunicaciones en que se opere, la movilidad de los usuarios, el tipo de información a transmitir y si el tráfico es homogéneo o no. Sin embargo, no se puede dictaminar qué algoritmo es el más apropiado para SDMA ya que cada uno de ellos fue diseñado pensando en un ambiente en particular. Por este motivo, en el siguiente capítulo se compararán algunos algoritmos bajo las mismas condiciones, con el objetivo de realizar una comparación más justa entre ellos y examinar su comportamiento, ventajas y desventajas.

Referencias

- [1] Bloch, J.S. and Hanzo, L., *Third-Generation Systems and Intelligent Wireless Networking. Smart antennas and adaptive modulation*, Wiley, 2002.
- [2] Katzela, I. and Naghsineh, M., “Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunications systems: A comprehensive survey”, *IEEE Personal Communications*, Vol. 3, Issue 3, pp. 10-31, June 1996.
- [3] Ngo, C.Y. and Li, V.O., “Fixed channel assignment in cellular radio networks using a modified genetic algorithm”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 163-172, February 1998.
- [4] Hansen, C.J. and Pottie, G.J., “A distributed access algorithm for cellular radio systems with channel partitioning”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 1, pp. 76-82, January 1999.
- [5] Ortigoza Guerrero, L., “Evaluación de esquemas de asignación de canales en sistemas telefónicos celulares”, *Cinvestav IPN, México, DF. Tesis de maestría, Ingeniería eléctrica*, Febrero 1996.
- [6] Janssen, J., Kilakos, K. and Marcotte, O., “Fixed preference channel assignment for cellular telephone systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 2, pp. 533-541, March 1999.
- [7] Ortigoza Guerrero, L. and Aghvami, A.H., “A prioritized handoff dynamic channel allocation strategy by PCS”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 4, pp. 1203-1215, July 1999.
- [8] Capone, A. and Trubian, M., “Channel assignment problem in cellular systems: A new model and a tabu search algorithm”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 48, No. 4, pp. 1252-1260, July 1999.
- [9] Leung, K.K. and Srivastava, A., “Dynamic allocation of downlink and uplink resource for broadband services in fixed wireless networks”, *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, Vol. 17, No. 5, pp. 990-1006, May 1999.
- [10] Cheng, M. and Chang, L.F., “Wireless dynamic channel assignment performance under packed data traffic”, *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, Vol. 17, No. 7, pp. 1257-1269, July 1999.
- [11] Godara, L.C., “Applications of antenna arrays to mobile communications, Part I: performance improvement, feasibility and system considerations”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 7, pp. 1031-1060, July 1997.
- [12] Galvan-Tejada, G.M. and Gardiner, J.G., “Theoretical model to determine the blocking probability for SDMA systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 50, Issue 5, pp. 1279-1288, September 2001.

- [13] Galvan-Tejada, G.M. and Gardiner, J.G., “Theoretical blocking probability for SDMA”, *IEEE Proceedings on Communications*, Vol. 146, Issue 5, pp. 303-306, October 1999.
- [14] Villordo-Jiménez I. and Galvan-Tejada, G. M., “Evaluation of spatial channel allocation algorithms for space division multiple access”, *First International Conference on Electrical and Electronics Engineering ICEEE-2004*, pp. 108-112, September 2004.
- [15] Wen-Jye, H. and Doherty, J.F., “An evaluation of blocking probability for three Fold. SDMA”, *IEEE Conference on Military Communications MILCOM-2001*, Vol. 2, pp. 1248-1252, October 2001.
- [16] Zhang, R, “Optimal space-time packet scheduling for reservation ALOHA networks”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2001 VTC-2001*, Vol. 4, pp. 2188-2191, October 2001.
- [17] Bartolome, D. and Perez-Neira, A.L., “Performance analysis of scheduling and admission control for multiuser downlink SDMA”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing 2004 ICASSP-2004*, Vol. 2, pp. 333-336, May 2004.
- [18] Hujun, Y. and Hui, L., “Performance of space-division multiple-access (SDMA) with scheduling”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1, Issue 4, pp. 611-618, October 2002.
- [19] Chen, S. and Karmakar, N.C., “Null forming SDMA scheme based on channel responses correlation coefficients”, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society 2003*, Vol. 1, pp. 85-88, June 2003.
- [20] Ohgane, T., Ogawa, Y. and Itoh, K., “A study on a channel allocation scheme with an adaptive array in SDMA”, *IEEE Vehicular Technology Conference 1997 VTC-1997*, Vol. 2, pp. 725-729, May 1997.
- [21] Koutsopoulos, I., Ren, T. and Tassiulas, L., “The impact of space division multiplexing on resource allocation: a unified approach”, *IEEE Conference on Computer and Communications Societies 2003 INFOCOM-2003*, Vol. 1, pp. 533-543, March 2003.
- [22] Vornefeld, U., “Packet scheduling in SDMA based wireless networks”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2000 VTC-2000*, Vol. 5, pp. 2132-2139, September 2000.
- [23] Piolini, F. and Rolando, A. “Smart channel assignment algorithm for SDMA systems”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, Issue 6, Part 1, pp. 693-699, June 1999.
- [24] Galvan-Tejada, G.M. and Gardiner, J.G., “Use of an antenna array at customer stations to improve the capacity in a WLL network”, *International Journal on Communication Systems*, Vol. 13, Issue 3, pp. 243-253, June 2000.
- [25] Hara, Y., Nabetani, T. and Hara, S., “Time slot assignment for cellular SDMA/TDMA systems with antenna arrays”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2001 VTC-2001*, Vol. 2, pp. 877-880, May 2001.

- [26] Yunjian, J., Hara, S. and Hara, Y., “Impact of close loop power control on SDMA/TDMA system performance”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2002 VTC-2002*, Vol. 3, pp. 1825-1829, September 2002.
- [27] Hara, Y., Nabetani, T. and Hara, S., “Performance evaluation of cellular SDMA/TDMA systems with variable bit rate multimedia traffic”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2001 VTC-2001*, Vol. 3, pp. 1731-1734, October 2001.
- [28] Yunjian, J., Hara, Y. and Hara, S., “Performance of TDD SDMA/TDMA system with multislot assignment in asymmetric traffic wireless networks”, *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2002*, Vol. 5, pp. 2317-2321, September 2002.
- [29] Purba, B., Harris, R., O’Shea, P. and Saidi, A., “A Performance analysis of a cellular SDMA system with an adaptive array”, *IEEE Conference on Speech and Image Technologies for Computing and Telecommunications TENCON’97*, Vol. 2, pp. 513-516, December 1997.
- [30] Binder, C.F., Veronesi, R. and Tralli, V., “Downlink scheduling with adaptive antennas in multicell SDMA packet access networks”, *IEEE Vehicular Technology Conference VTC-2005*, Vol. 3, pp. 1908-1912, May 2005.
- [31] Veronesi, R., Zander, J., Tralli, V., Zorzi, M., Berggren, F., “Distributed dynamic resource allocation for multicell SDMA packet access networks”, *IEEE International Conference on Communications 2004*, Vol. 1, pp. 202-207, June 2004.
- [32] Cardieri, P. and Rappaport, T.S., “Channel allocation in SDMA cellular systems”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2001*, Vol. 1, pp. 399-403, Fall 2001.
- [33] Hartmann, C., “Hierarchical DCA in SDMA Systems Variations and Performance Comparison”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2000*, pp. 721-725, May 2000.

4 CAPÍTULO

SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE ASIGNACIÓN DE CANALES ESPACIO – TIEMPO

En el capítulo anterior se presentó el estado del arte de los esquemas de asignación de canales espacio – tiempo, donde se concluyó que el desempeño obtenido por SDMA está en función del sistema en el que se aplique. Debido a que los algoritmos fueron propuestos para diferentes escenarios, no es posible compararlos entre ellos, por lo que en este capítulo se proponen tres escenarios diferentes para evaluar por simulación cuatro de estos esquemas con la finalidad de realizar una comparación justa entre ellos. Los escenarios fueron propuestos para seguir un proceso en el cual se parte de un ambiente sencillo, no tan realista y se llega a un ambiente más complejo y realista de un sistema de comunicaciones.

Los algoritmos fueron seleccionados de acuerdo a su desempeño y a su criterio para la reasignación de canales. El primer algoritmo es el de Máxima Separación [1], el cual utiliza la separación espacial entre los usuarios que comparten un canal como criterio de reasignación de canales. El segundo algoritmo, DLSAI, es aplicado para duplicar canales tomando en cuenta la separación espacial entre usuarios y el nivel de interferencias que se genera al reutilizar un canal [2]. Ambos algoritmos se presentaron en la sección 3.2.1.1. El tercer algoritmo toma en cuenta la correlación entre usuarios que

comparten un canal y la SNR que tiene cada uno de ellos, la cual debe estar por encima de un umbral [3], tal como se mostró en la sección 3.2.1.2. El cuarto algoritmo llamado FDSINR, presentado también en la sección 3.2.1.2, reasigna los canales siempre y cuando la SINR de los usuarios esté por encima de un umbral [4].

La medida de desempeño de los algoritmos en cada escenario es la probabilidad de bloqueo y en el caso del sistema de comunicaciones con usuarios móviles, se tiene como medida adicional de desempeño la probabilidad de terminación forzada.

4.1 Parámetros generales del sistema.

Los escenarios propuestos para la evaluación de los esquemas de asignación de canales espacio-tiempo son:

- ◆ El primero consta de una sola celda donde se evalúa un tráfico de 12 a 24 Erlangs.
- ◆ El segundo consta de 7 celdas y se evalúa un tráfico de 85 a 170 Erlangs. En este escenario se considera que cada celda tiene un conjunto diferente de canales, por lo que no existe interferencia cocanal intercelular.
- ◆ El tercero consta de 49 celdas y se evalúa un tráfico de 600 a 1180 Erlangs. En este escenario se considera un sistema con TDMA con interferencia cocanal intercelular, donde el factor de reutilización es de 7.

Las celdas son hexagonales con 12 canales cada una y las estaciones base están ubicadas en el centro de las celdas. Cada estación base consta de una antena inteligente con un arreglo circular de 8 elementos y una separación entre elementos de 0.6366λ . El factor de reuso de un canal con SDMA es de 2.

Los usuarios están uniformemente distribuidos en el área de servicio y cada uno de ellos consta de una antena omnidireccional. Las condiciones de propagación son las siguientes: el exponente de pérdidas por distancia es de 4, los desvanecimientos por ensombrecimiento se consideran como una variable lognormal con una desviación estándar de 6 dB y el ángulo de arribo se supone conocido. El proceso de arribo es de Poisson y el tiempo de servicio es de 180 segundos.

Para los escenarios multicelulares no se consideró el efecto de borde, los resultados se obtuvieron de la celda central y la selección de la estación base que dará el servicio a un usuario se basa en escoger aquella que presente las mejores condiciones de propagación, por lo que el nacimiento de un usuario en una celda en particular no significa necesariamente que será atendido por la estación base de esa celda.

Debido a que el haz principal generado por un arreglo de antenas con las características antes mencionadas, tiene un ancho de aproximadamente 30 grados, la separación espacial umbral aplicada en los algoritmos que lo requieren es de 30 grados [2]. De esta manera, se asegura que los haces principales de los usuarios no se interferirán entre sí. Para el algoritmo DLSAI, el nivel de interferencia permitido debe estar por debajo de 10 dB [2]. Para el algoritmo FDSINR la SINR debe estar por encima de 10 dB y para el algoritmo de correlación la SNR permitida debe estar por encima de 30 dB y el coeficiente de correlación entre usuarios que comparten el mismo canal debe estar por debajo de 0.99 [3]. El umbral para las transferencias de llamadas para el caso del algoritmo FDSINR en un sistema dinámico, $SINR_{Thif}$, es de 11 dB.

A menos que se indique lo contrario, los parámetros de simulación serán los mismos para los tres escenarios simulados en este capítulo.

4.2 Comparación de los algoritmos de asignación fija de canales espacio – tiempo sin movilidad.

Los algoritmos de asignación fija se simularon en el primer escenario y se obtuvieron los resultados de la figura 4.1. De esta figura se puede observar que para un tráfico ofrecido de 12 Erlangs el algoritmo de Máxima Separación tiene un desempeño casi 125 veces mayor que el algoritmo de Correlación. En cambio, la diferencia en desempeño con los otros algoritmos no es tan grande, por ejemplo, en comparación con el algoritmo DLSAI, el desempeño del algoritmo de Máxima Separación es aproximadamente 12 veces mayor y con el algoritmo FDSINR es aproximadamente 6 veces mayor. Sin embargo, conforme el tráfico aumenta la diferencia en desempeño entre los algoritmos disminuye, por ejemplo, para 24 Erlangs, el desempeño del algoritmo de Máxima Separación es aproximadamente 3 veces mayor que el algoritmo de Correlación, mientras que la diferencia con el algoritmo FDSINR y el algoritmo DLSAI es muy pequeña.

De esta manera, se aprecia que en este escenario, el algoritmo que presentó el mejor desempeño es el de Máxima Separación, mientras que el algoritmo que tiene el peor desempeño es el Algoritmo de Correlación. Esto se debe a que la correlación entre los usuarios que están en la misma celda es muy grande, por lo que la probabilidad de bloqueo es mucho mayor que los otros algoritmos simulados.

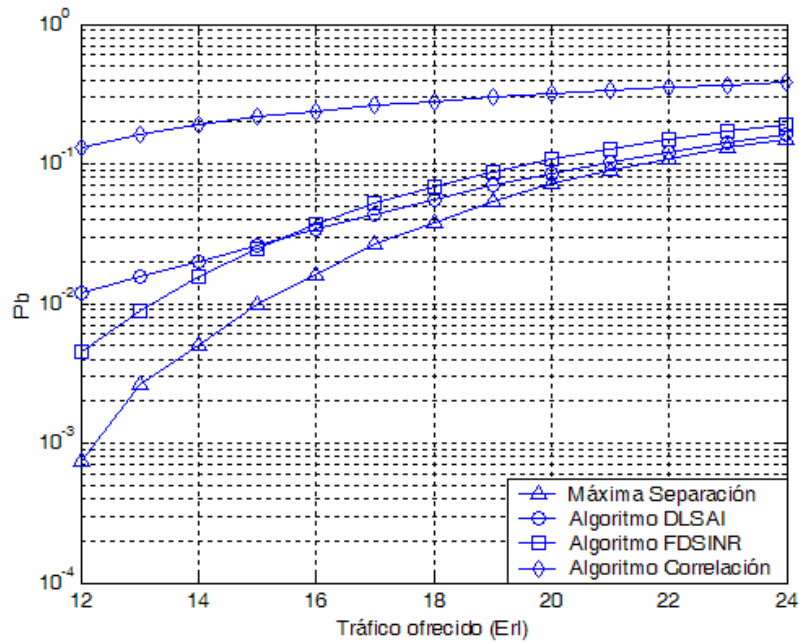


Figura 4.1 Probabilidad de bloqueo obtenida en una sola celda.

Para niveles de tráfico bajos, se observó que el uso de SDMA casi no es necesario y cuando se utilizaba los usuarios no se interferían en gran medida por lo que la SINR de los usuarios en su mayoría era relativamente grande, permitiendo que el algoritmo FDSINR sea el que tenga un mejor desempeño después del algoritmo de Máxima Separación. Mientras que el algoritmo DLSAI, al considerar la separación espacial y el nivel de interferencias entre usuarios que comparten un canal, bloquea más usuarios.

A medida que aumenta el nivel de tráfico dentro de la celda el uso de SDMA aumenta y se observa que el algoritmo DLSAI tiene mejor desempeño que el algoritmo FDSINR. Esto ocurre debido a que al tener una mayor cantidad de usuarios el nivel de interferencia aumenta, provocando que los niveles de SINR sean bajos, de tal forma que



se dificulta que ambos usuarios alcancen la SINR umbral. En el algoritmo DLSAI el objetivo es tener siempre la interferencia mínima posible en el sistema, asignando a un usuario en el canal donde genere la mínima interferencia. De esta manera, a pesar de que aumenta el nivel de interferencias, se pueden aceptar más usuarios y así, incrementar su desempeño en comparación con el algoritmo FDSINR. Sin embargo, a pesar de la mejora en el desempeño del algoritmo DLSAI, no iguala el desempeño de Máxima Separación.

En el segundo escenario se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.2, donde se puede apreciar que para un tráfico de 12 Erlangs el algoritmo FDSINR tiene un desempeño aproximadamente 130 veces mayor que el algoritmo de Correlación, mientras que con los algoritmos DLSAI y Máxima Separación, el desempeño de FDSINR es aproximadamente 16 y 1.5 veces mayor respectivamente. Al igual que en la figura 4.1, a medida que el tráfico aumenta, la diferencia en desempeño entre los algoritmos disminuye. De esta manera, se observa que el algoritmo que presenta un mejor desempeño es el de FDSINR, mientras que el algoritmo de Correlación tiene el peor desempeño. De la misma manera que en el primer escenario, el algoritmo de Correlación presenta valores de correlación muy grandes entre los usuarios que comparten un canal, a pesar de que en este escenario los usuarios están más espaciados. La disminución de la probabilidad de bloqueo en el algoritmo FDSINR se debe a que los usuarios están distribuidos en un área más grande (a consecuencia de que el usuario selecciona la estación base que le proporcione las mejores condiciones de propagación, no la de la celda en la que se ubica), por consiguiente la interferencia entre usuarios es menor y los valores de SINR aumentan, dando lugar a que se bloquee una menor cantidad de usuarios. El algoritmo de Máxima Separación ya no tiene el mejor desempeño debido a que solamente considera la separación angular entre los usuarios, por lo que no puede distinguir en qué medida impacta la distancia entre la estación base y los usuarios que comparten el mismo canal.

Mientras tanto, conforme el tráfico en el sistema aumenta, se observa que los algoritmos tienen el mismo comportamiento que con un nivel de tráfico bajo, sin embargo, la diferencia en desempeño entre ellos es cada vez menor debido al nivel de interferencias que existe en el sistema.

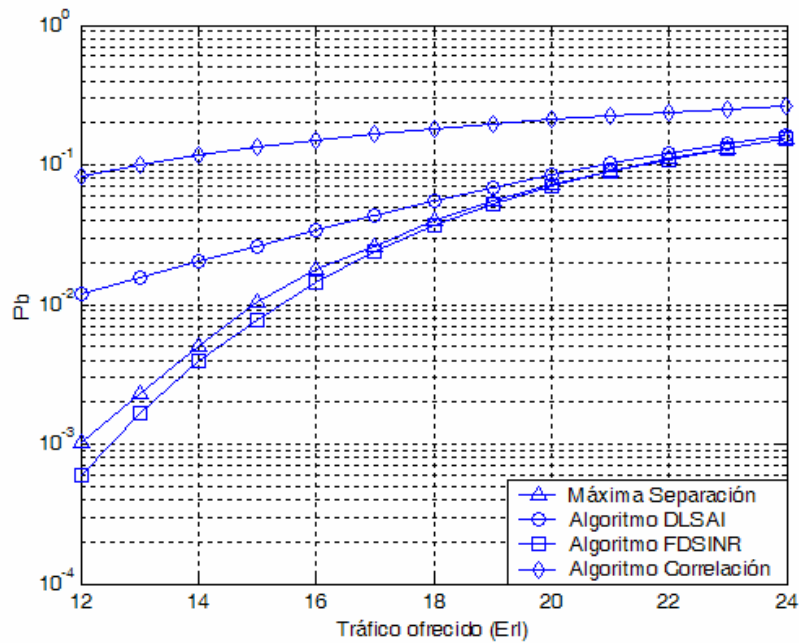


Figura 4.2 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 7 celdas.

Una ampliación a una ventana de tráfico entre 20 y 24 Erlangs se muestra en la figura 4.3, donde se observa que esta diferencia es pequeña especialmente entre los algoritmos de Máxima Separación y FDSINR.

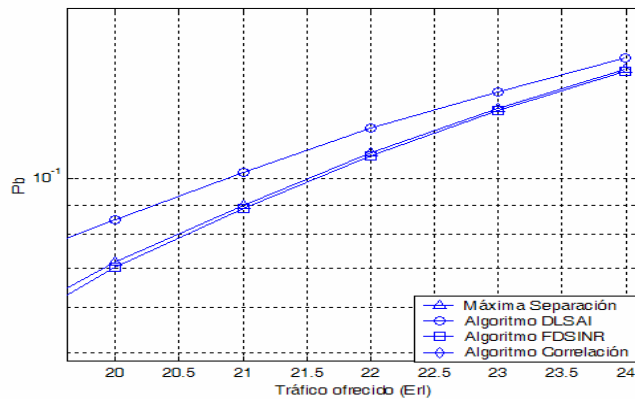


Figura 4.3 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 7 celdas para niveles de tráfico alto.

En la figura 4.4 se presentan las gráficas obtenidas para el tercer escenario. En esta figura se aprecia que para un tráfico ofrecido de 12 Erlangs, el algoritmo FDSINR tiene un desempeño aproximadamente 60 veces mayor que el algoritmo de Correlación y en comparación con el algoritmo DLSAI, tiene un desempeño aproximadamente 4 veces mayor mientras que con respecto al algoritmo de Máxima Separación tiene un desempeño aproximadamente 2 veces mayor. También se puede observar que conforme el tráfico aumenta en la celda, la diferencia en desempeño entre los algoritmos es cada vez menor debido a la gran cantidad de interferencias que existen a estos niveles de tráfico.

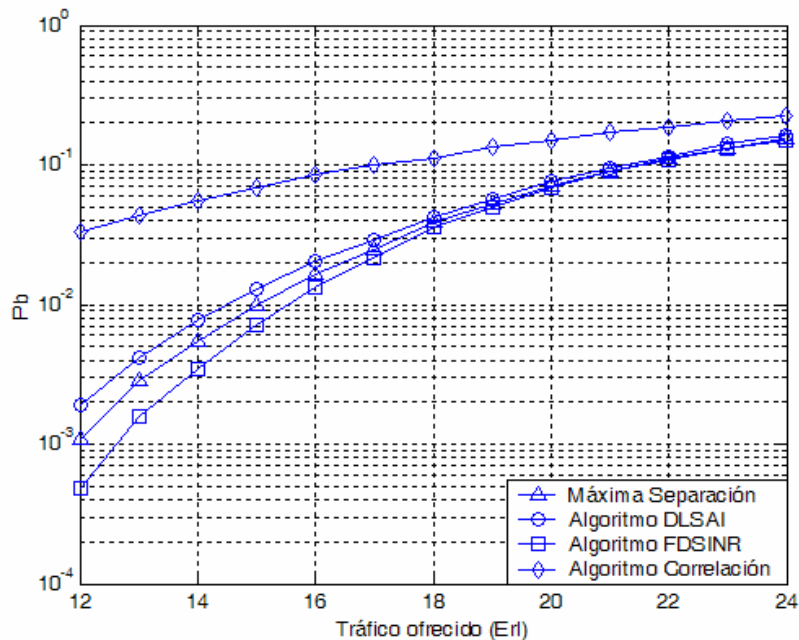


Figura 4.4 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 49 celdas.

Con lo anterior, se observa que el algoritmo que presenta el peor desempeño es el de Correlación y el algoritmo que presenta un mejor desempeño es FDSINR. Nuevamente la mejora en desempeño del algoritmo FDSINR se debe a que los usuarios al estar distribuidos en un área más grande tienen valores más grandes de SINR provocando que se bloquee una menor cantidad de usuarios.

Si se considera un tráfico entre 20 y 24 Erlangs se obtiene la figura 4.5, donde se aprecia que el algoritmo FDSINR sigue presentando el mejor desempeño, aunque la

diferencia en desempeño entre este algoritmo y el de Máxima Separación es muy pequeña. Esto se debe principalmente a que los criterios de reuso de un canal se comportan de la misma manera para una gran cantidad de interferencias.

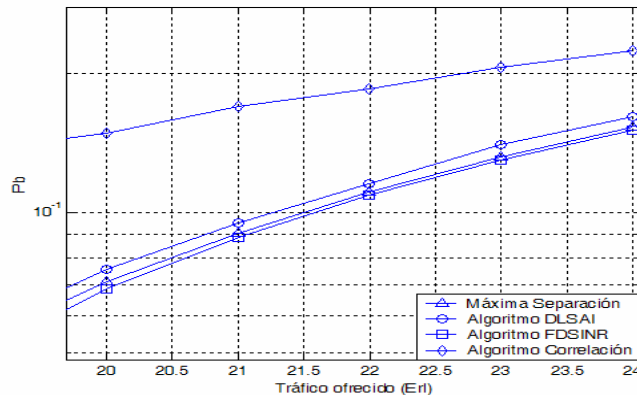


Figura 4.5 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 49 celdas para niveles de tráfico alto.

Al comparar los resultados obtenidos en las figuras 4.1, 4.2 y 4.4 se observa que a medida que crece el área en que se distribuyen los usuarios (debido a la asignación de la estación base que proporcione las mejores condiciones de propagación), la probabilidad de bloqueo disminuye.

Sin embargo, los algoritmos no toman en cuenta la interferencia intercelular, es decir, no consideran la interferencia provocada por otros usuarios que comparten el mismo canal en otras celdas, por lo que el efecto de los usuarios cocanal no se ve reflejado en los resultados obtenidos. Por este motivo, se realizó una extensión de los algoritmos: en el caso del algoritmo de Máxima Separación se selecciona el canal que tenga la máxima separación angular con el usuario que es atendido por la misma estación base y que además la separación angular con los usuarios de las celdas cocanal esté por encima de la separación angular umbral. Para el algoritmo DLSAI se selecciona el canal en el que el nuevo usuario provoque la mínima cantidad de interferencia tanto en el usuario que es atendido por la misma estación base como en los usuarios que están en las celdas cocanal, además de que la separación angular entre ellos debe estar por encima de una separación angular umbral. Para el algoritmo FDSINR en lugar de asignar el canal

en el que la SINR del usuario asignado en la misma estación base y la SINR del nuevo usuario estén por encima de una $SINR_{Th}$, ahora se selecciona el canal en el que la SINR de estos usuarios y la SINR de los usuarios de las celdas cocanal estén por encima de una $SINR_{Th}$. Para el algoritmo de Correlación, se selecciona el canal en el que la correlación con el usuario que es atendido por la misma estación base esté por encima de un valor umbral y que además la correlación con los usuarios de las celdas cocanal también esté por encima de un valor umbral.

Los resultados obtenidos en este escenario con la extensión en los algoritmos se presentan en la figura 4.6, donde se puede apreciar que para un tráfico de 12 Erlangs el algoritmo FDSINR tiene un desempeño casi 66 veces mayor que el algoritmo de Correlación, mientras que la diferencia en desempeño con los otros algoritmos es menor, por ejemplo, en comparación con el algoritmo DLSAI, el desempeño del algoritmo FDSINR es aproximadamente 33 veces mayor y con el algoritmo de Máxima Separación es aproximadamente 4 veces mayor. Sin embargo, conforme el tráfico aumenta, la diferencia en desempeño entre los algoritmos disminuye debido a la gran cantidad de interferencias que existen en el sistema.

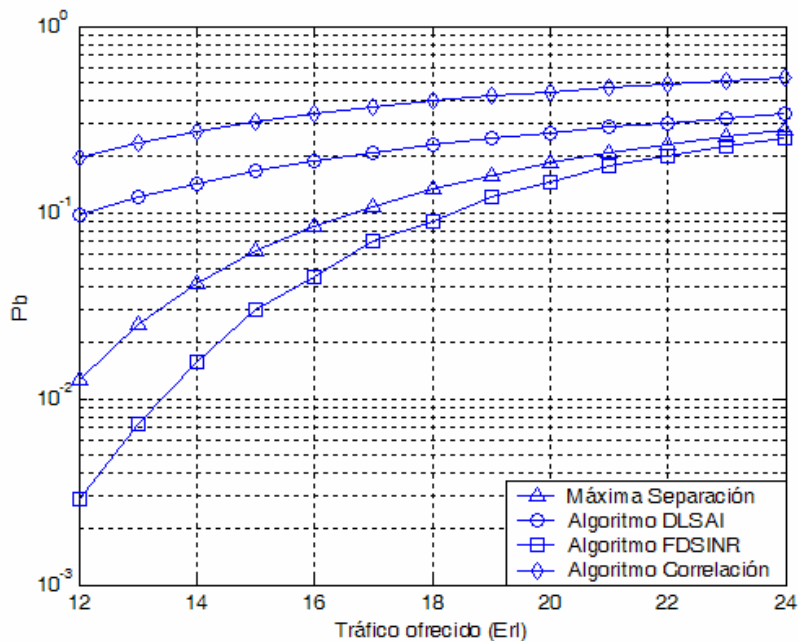


Figura 4.6 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 49 celdas.

Como era de esperarse, al considerar una mayor cantidad de interferentes, el desempeño de los algoritmos es menor en comparación con los algoritmos originales. Si se compara el desempeño del algoritmo FDSINR en la figura 4.4 y en la figura 4.6, la diferencia en desempeño es de 6 veces. En el algoritmo de Máxima Separación, la diferencia es aproximadamente un orden de magnitud, en el algoritmo DLSAI la diferencia es de 50 veces aproximadamente y en el algoritmo de Correlación la diferencia es de casi un orden de magnitud.

Sin embargo, a pesar de esta diferencia en desempeño se puede observar que el algoritmo que presenta el mejor desempeño sigue siendo FDSINR. El segundo algoritmo con el mejor desempeño es el de Máxima Separación, pero no iguala el desempeño de FDSINR debido a que no es posible que este algoritmo tome en cuenta la distancia entre los usuarios, por lo que bloquea a aquellos que simplemente no cumplan con la separación angular umbral a pesar de que algunos usuarios pueden estar lo suficientemente alejados de tal forma que la interferencia que provoquen no sea significativa. El desempeño del algoritmo DLSAI ya no es tan cercano al desempeño de FDSINR debido a que cada usuario, ya sea de la misma celda o de celdas cocanal, debe cumplir con los dos criterios de asignación de canales, por lo que entre más usuarios interferentes existan en el sistema, mayor será la cantidad de usuarios que se bloqueen. Mientras tanto, el algoritmo de Correlación sigue siendo el algoritmo que tiene el peor desempeño debido a que la correlación entre los usuarios es muy grande.

4.3 Comparación de los algoritmos de asignación dinámica de canales espacio – tiempo sin movilidad.

Como se mencionó en la sección 3.1.2, un sistema con asignación dinámica no tiene canales fijos en cada celda, por lo que es necesario que el sistema asigne los canales de acuerdo a uno o varios criterios de asignación de canales. En esta sección se comparan dos algoritmos: el primer algoritmo llamado LIA [5], presentando en la sección 3.3.2, selecciona el canal que tenga una menor cantidad de interferencias, siempre y cuando la SIR del usuario esté por encima de una SIR_{Th} . El segundo algoritmo llamado HSDCA [6], presentando también en la sección 3.3.2, divide el proceso de asignar un canal a un usuario en dos etapas: la asignación de un canal a una estación base

(asignación intercelular) y la asignación de un canal a un usuario (asignación intracelular), donde los criterios de asignación dependen de un conjunto de costos. En la figura 4.7, se presentan los resultados obtenidos para el tercer escenario propuesto en la sección 4.1, pero con 120 canales en el sistema y se observa que el algoritmo LIA es el que tiene un mejor desempeño debido a que la función de costos intercelulares en el algoritmo HSDCA bloquea muchos canales a pesar de que éstos pudieran dar servicio a los usuarios que cumplieran con cierta calidad de servicio.

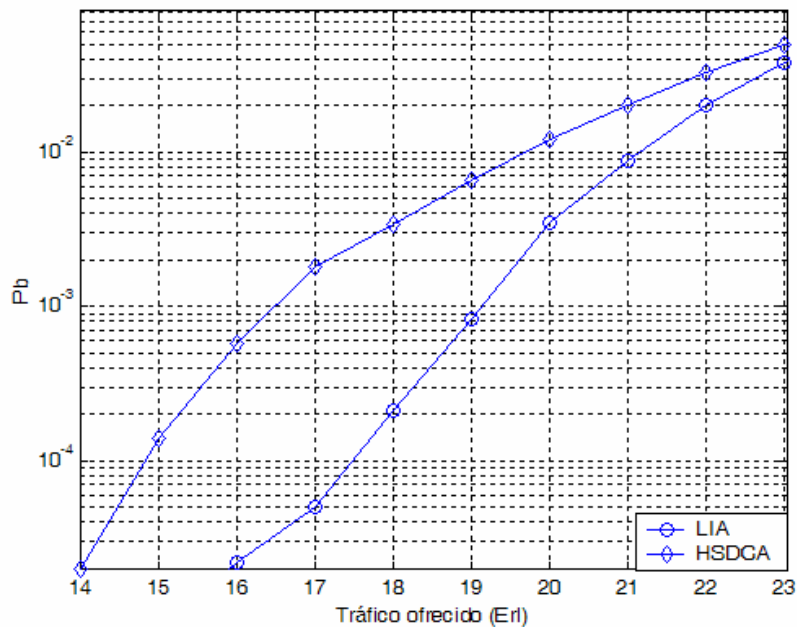


Figura 4.7 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 49 celdas.

Si se comparan las figuras 4.6 y 4.7, se observa que los algoritmos de asignación dinámica de canales proporcionan una probabilidad de bloqueo mucho menor que los algoritmos de asignación fija con una menor cantidad de canales. Sin embargo, el retardo de asignación de un canal debido a la cantidad de procesamiento que requieren estos algoritmos es muy grande, por lo que no son muy utilizados en sistemas reales, a pesar de su buen desempeño.

4.4 Efecto de la movilidad en los esquemas de asignación de canales espacio – tiempo.

Para mostrar el efecto del modelo de movilidad (presentado en el Apéndice B) en la SINR, se propone un sistema que consta de una celda con dos usuarios, tal como se presenta en la figura 4.8. Cada uno realiza 50 movimientos con un intervalo de la distribución uniforme del cambio de dirección comprendida entre $\rho = \pm 20^\circ$ de su dirección actual.

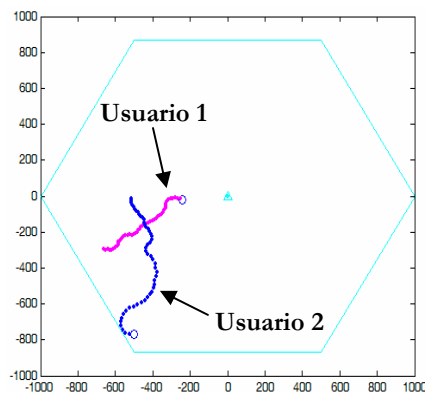


Figura 4.8 Movilidad de dos usuarios dentro de una celda.

Para una mayor comprensión de la figura 4.8, se presenta la figura 4.9 en la cual se puede ver las variaciones de la potencia recibida en la estación base, la separación angular entre ellos y los efectos de estos parámetros en la SINR de cada usuario. La primera posición de los usuarios está representada por el círculo en cada trayectoria. Como se puede ver en la figura 4.8, el usuario 1 está más cerca de la estación base que el usuario 2, por lo que la potencia que recibe la estación base de este usuario es mayor, tal como se aprecia en la figura 4.9(a). Por lo tanto, la SINR del usuario 1 es mayor que la SINR del usuario 2. Como se puede observar en la figura 4.9(c), conforme se aleja o se acerca un usuario a la estación base, la SINR disminuye o aumenta respectivamente.

Si ahora se considera la separación angular, se aprecia en la figura 4.9(b) que en el movimiento 35, la separación entre los usuarios es de casi cero, por lo que la SINR de ambos usuarios adquiere su valor más bajo. Y conforme la separación angular aumenta, la SINR de ambos usuarios aumenta, tal como se aprecia en la figura 4.9(c).

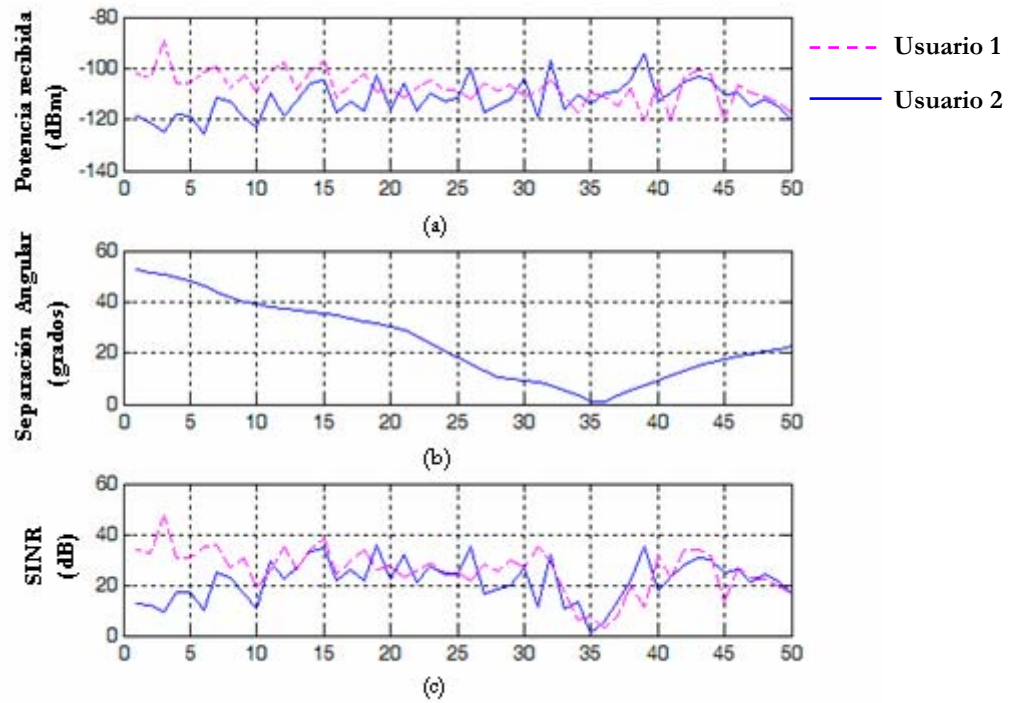


Figura 4.9. Efecto de la movilidad en la SINR para una $\rho=20^\circ$, (a) Potencia recibida, (b) Separación angular entre los usuarios, (c) SINR de cada usuario.

De esta manera, se puede observar que la SINR de un usuario no es constante durante su tiempo de servicio debido a la movilidad, por lo que en algunos casos será necesario realizar una transferencia de llamada cuando su SINR esté por debajo de una $SINR_{Th}$, o incluso forzarlo a terminar su llamada en caso de que en ningún canal tenga una SINR aceptable o que no existan canales disponibles.

Si ahora se tiene un sistema con una celda pero con las características presentadas en la sección 4.1 y se simula el algoritmo FDSINR, el cual tuvo el mejor desempeño en los sistemas propuestos, se tienen los resultados de las figuras 4.10 y 4.11, donde se presentan la probabilidad de bloqueo y la probabilidad de terminación forzada respectivamente. En este sistema, se aplica el modelo de movilidad presentado en el Apéndice B pero con la condición de que al llegar al límite de la celda regresen a ella, con la finalidad de que el sistema se mantenga estable.

Cuando la SINR de un usuario está por debajo de la $SINR_{Thf}$ se realiza una transferencia intracelular, siempre y cuando existan canales disponibles y se cumpla con la $SINR_{Th}$.

Si se compara la figura 4.1 con la figura 4.10, se observa que la probabilidad de bloqueo disminuye si en el sistema se tienen usuarios móviles. Este efecto se debe a que el dinamismo del sistema provoca que el tiempo en que un usuario ocupa un canal sea menor en comparación con el sistema estático, por lo que se liberan recursos y de esta manera es posible aceptar a más usuarios.

Sin embargo, este efecto también se ve reflejado en la probabilidad de terminación forzada, la cual muestra la cantidad de usuarios que fueron obligados a terminar la llamada debido a que en una transferencia de canal, no cumplieron con la $SINR_{Thf}$ o no había recursos disponibles.

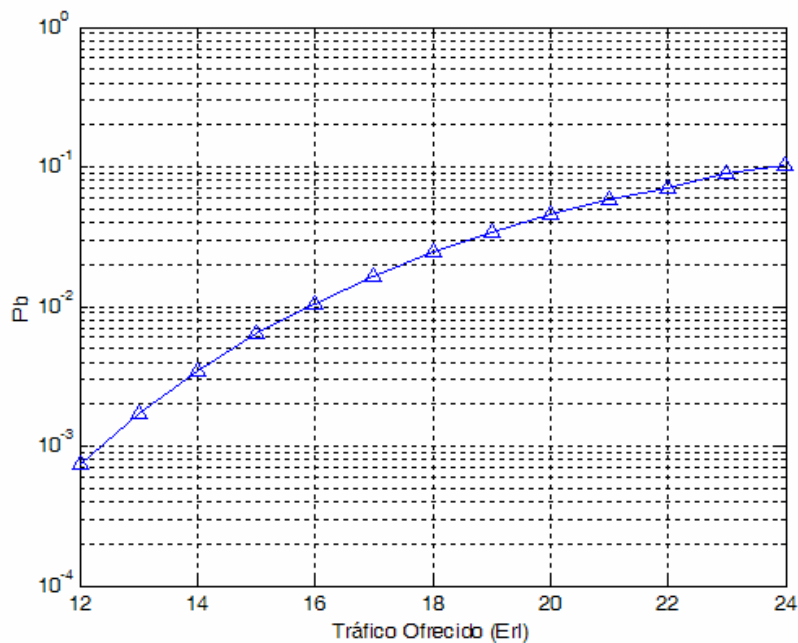


Figura 4.10 Probabilidad de bloqueo obtenida en una celda con usuarios móviles.

En un sistema estático, la probabilidad de terminación forzada es cero, ya que los usuarios son asignados a un canal y como no tienen movilidad, la SINR con la que fueron aceptados es constante, por lo que no es necesario cambiar de canal, en cambio, cuando el sistema es dinámico, las características del canal del usuario cambian en cada

movimiento, y como consecuencia es probable que su calidad se degrade mientras que en otro canal se mejore, por lo que para no terminar la llamada se hace un cambio de canal. Obviamente no todas las transferencias son exitosas, en la figura 4.11 se presenta la probabilidad de terminación forzada para cada punto de tráfico.

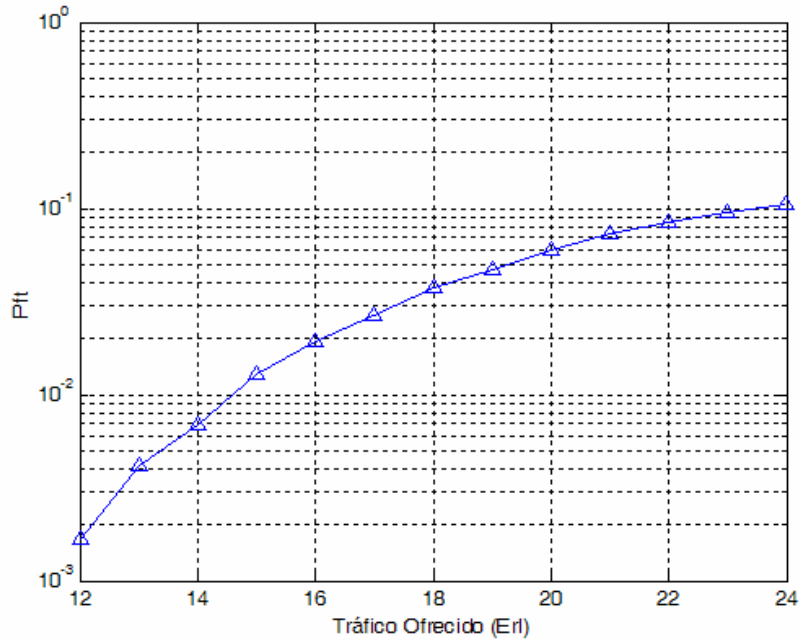


Figura 4.11 Probabilidad de terminación forzada obtenida en una celda con usuarios móviles.

Si ahora se tiene un sistema multicelular con las características del tercer escenario descrito en la sección 4.1, con el modelo de movilidad presentado en el Apéndice B y donde además de las transferencias intracelulares también se tienen transferencias intercelulares, se obtiene la probabilidad de bloqueo mostrada en la figura 4.12. Si se comparan las figuras 4.6 y la figura 4.12 se puede observar que la probabilidad de bloqueo tiene el mismo comportamiento que el caso anterior gracias al dinamismo del sistema, es decir, es menor que en el caso estático.

Como se puede observar en la figura 4.13 para un tráfico de 3.8 Erlangs, aproximadamente el 87% de los usuarios bloqueados no fueron aceptados en el sistema por falta de recursos, mientras que el 13% de los usuarios no cumplieron con la SINR umbral.

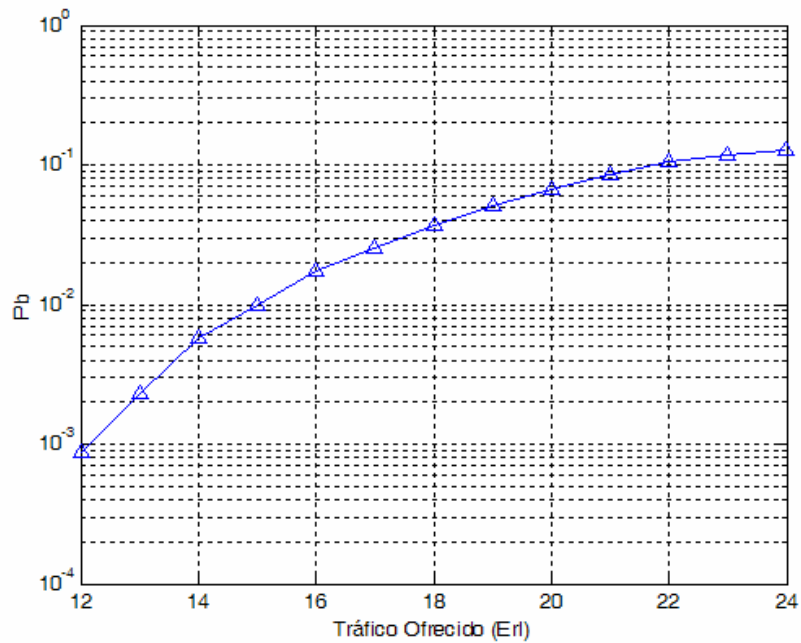


Figura 4.12 Probabilidad de bloqueo obtenida en un sistema multicelular con usuarios móviles.

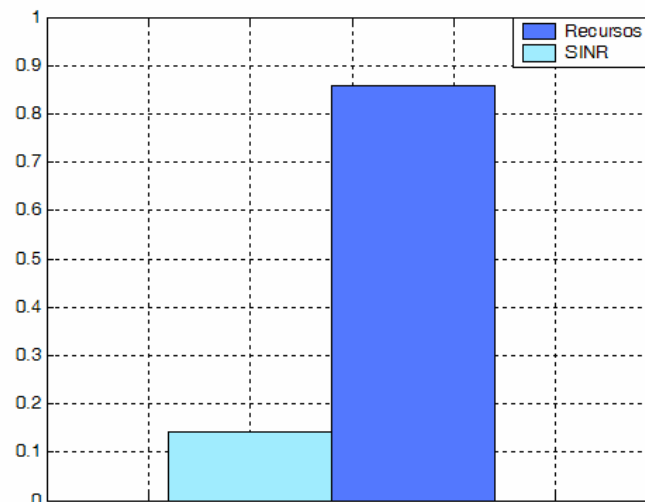


Figura 4.13 Porcentaje de usuarios bloqueados por falta de recursos y por no cumplir con la SINR requerida.

En este sistema, además de tomar en cuenta las transferencias intracelulares, también se consideraron las intercelulares debido a que los usuarios pueden moverse a través de las celdas y para comparar el número de cada una de las transferencias en un

punto particular de tráfico, se presenta la figura 4.14, donde se aprecia que el 80% de las transferencias realizadas en el sistema fueron intercelulares y el 12% aproximadamente fueron intracelulares. Esto se debe a que los usuarios no pueden ser atendidos por la misma celda todo el tiempo porque si el usuario se aleja de la celda, la SINR disminuye y no podrá ser atendido por algún otro canal dentro de la misma celda, por lo que es necesario buscar otro canal en otra celda que pueda darle la SINR requerida.

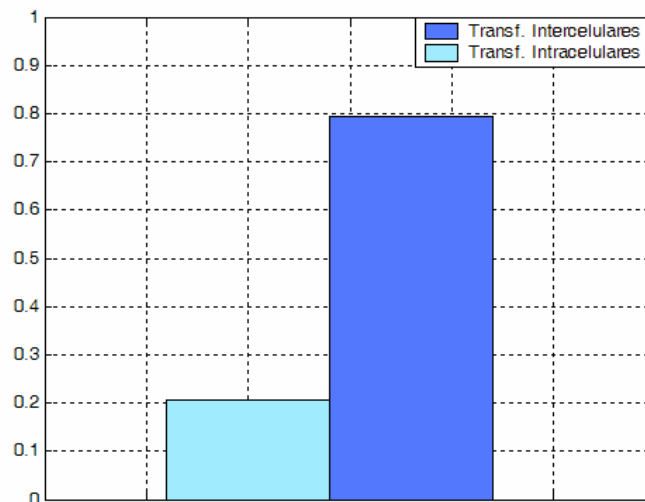


Figura 4.14 Porcentaje de transferencias intracelulares e intercelulares.

En la figura 4.15 se presenta la probabilidad de terminación forzada y en la figura 4.16 se presenta el porcentaje de usuarios que son obligados a interrumpir su conexión para ambos tipos de transferencias en un punto en particular de tráfico. Como se puede apreciar en la figura 4.16, para ambos tipos de transferencias, el porcentaje de usuarios forzados a terminar su llamada por falta de recursos es mayor a aquellos forzados a terminar por no cumplir con la SINR, sin embargo, la diferencia entre estos porcentajes es menor en el caso de las transferencias intercelulares debido a que la asignación de un recurso toma en cuenta la SINR no solo de la celda a la cual desea conectarse, sino que considera a los usuarios cocanal, motivo por el cual el número de canales que no cumplen con la SINR es mayor evitando que los usuarios sean aceptados en esa celda.

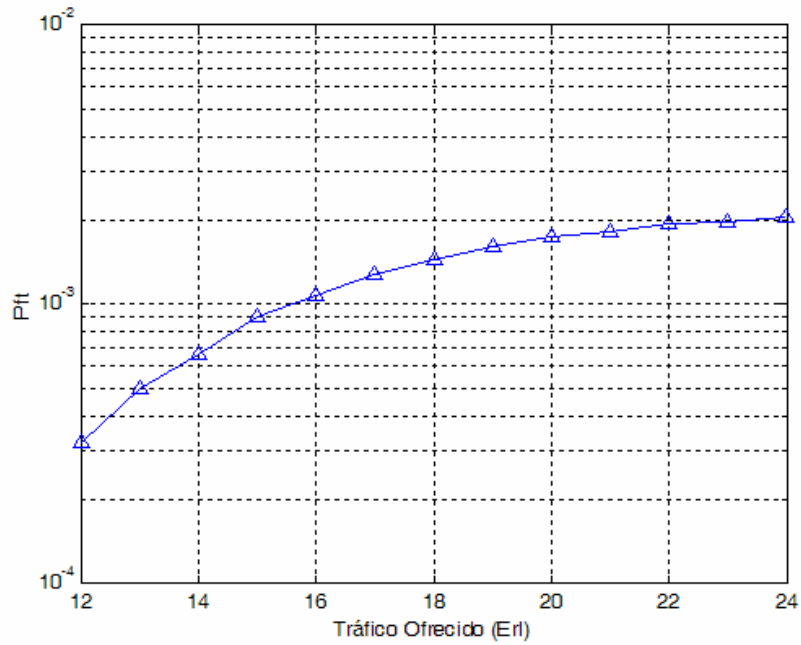


Figura 4.15 Probabilidad de terminación forzada obtenida en un sistema multicelular con usuarios móviles.

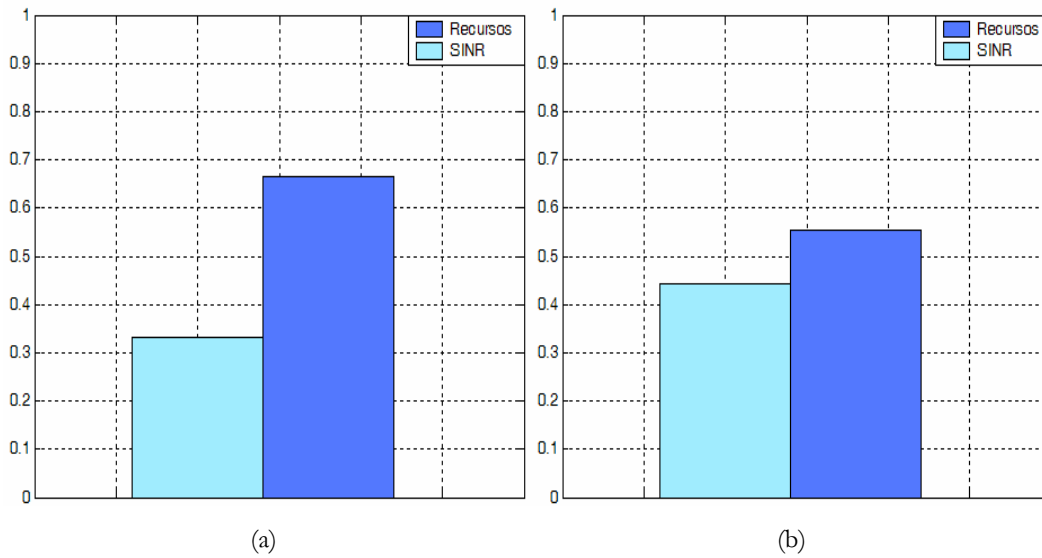


Figura 4.16 Porcentaje de usuarios forzados a terminar su llamada por falta de recursos y por no cumplir con la SINR requerida, (a) Para las transferencias intracelulares, (b) Para las transferencias intercelulares.

4.5 Conclusiones.

En este capítulo se evaluaron por simulación algunos algoritmos estudiados en el capítulo 3 en diferentes escenarios propuestos. Cada algoritmo fue seleccionado de acuerdo al criterio utilizado para reutilizar los canales y se observó que para una asignación fija de canales, el criterio que maximiza el reuso de canales es la SINR, por lo que el algoritmo con el mejor desempeño en casi todos los escenarios es el de FDSINR.

Para el caso de la asignación dinámica de canales se apreció que la probabilidad de bloqueo disminuye considerablemente en comparación con la asignación fija, sin embargo, el tiempo que requieren estos algoritmos para asignar un canal es muy grande, por lo que no son prácticos para aplicarse en un sistema de comunicaciones real.

También se observó que en un sistema con usuarios móviles la probabilidad de bloqueo disminuye pero con la desventaja de que la probabilidad de terminación forzada ya no es cero, debido a que los usuarios se desplazan a través de las celdas y no pueden ser atendidos por la misma celda durante todo su tiempo de servicio. Motivo por el cual, el número de transferencias intercelulares es mayor que el de intracelulares.

Aparte de mostrar el efecto de la movilidad en un sistema de comunicaciones, se observó que el número de usuarios bloqueados o forzados a terminar debido a la falta de recursos es mayor a aquellos que no cumplen con la SINR establecida, lo cual indica que el uso de SDMA en el sistema, ayuda a reducir la cantidad de interferencias y de esta manera se rechaza una menor cantidad de usuarios.

Referencias.

- [1] Villordo-Jiménez I. and Galvan-Tejada, G. M., “Evaluation of spatial channel allocation algorithms for space division multiple access”, *First International Conference on Electrical and Electronics Engineering ICEEE-2004*, pp. 108-112, September 2004.
- [2] Wen-Jye, H. and Doherty, J.F., “An evaluation of blocking probability for three Fold. SDMA”, *IEEE Conference on Military Communications MILCOM-2001*, Vol. 2, pp. 1248-1252, October 2001.
- [3] Ohgane, T., Ogawa, Y. and Itoh, K., “A study on a channel allocation scheme with an adaptive array in SDMA”, *IEEE Vehicular Technology Conference 1997 VTC-1997*, Vol. 2, pp. 725-729, May 1997.
- [4] Galvan-Tejada, G.M. and Gardiner, J.G., “Theoretical model to determine the blocking probability for SDMA systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 50, Issue 5, pp. 1279-1288, September 2001.
- [5] Cardieri, P. and Rappaport, T.S., “Channel allocation in SDMA cellular systems”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2001*, Vol. 1, pp. 399-403, Fall 2001.
- [6] Hartmann, C., “Hierarchical DCA in SDMA Systems Variations and Performance Comparison”, *IEEE Vehicular Technology Conference 2000*, pp. 721-725, May 2000.

5 CAPÍTULO

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este capítulo se presentan las conclusiones generales de la tesis y el trabajo a futuro que se propone para seguir en esta línea de investigación.

5.1 Conclusiones Generales.

A lo largo de esta tesis se puntualizó la importancia del manejo de recursos de un sistema de comunicaciones. Además de presentar su evolución, se ha presentado una nueva técnica de acceso múltiple que permite hacer un mejor uso del espectro electromagnético, en comparación con las técnicas anteriores.

También se presentaron los fundamentos de la tecnología de antenas inteligentes y de los bloques que la componen. Se observó que las antenas inteligentes son una tecnología muy prometedora ya que con ellas es posible explotar el dominio espacial, reducir el nivel de interferencias que recibe y transmite un sistema de comunicaciones y por lo mismo, permite aumentar la capacidad de los mismos.

Como parte central de esta tesis se presentó el Acceso Múltiple por División de Espacio, sus características, ventajas y desventajas. Entre sus ventajas está el aumento de la capacidad de un sistema de comunicaciones, lo que implica un incremento de la

eficiencia espectral. Sin embargo, se observó que esta mejora depende del área geográfica en la que se esté operando, bajo qué esquema de acceso múltiple se base y qué tipo de asignación se establece en el sistema. Este es un punto importante debido a que el o los criterios para reutilizar un canal con SDMA dependen de cada uno de estos factores. Sin embargo, al estudiar el estado del arte y evaluar por simulación algunos algoritmos propuestos, se observó que el criterio que toma en cuenta todos los parámetros del sistema es la Relación Señal a Interferencia mas Ruido, por lo que es considerada como el criterio de reasignación de canales más adecuado para SDMA.

También se observó en forma general que SDMA no puede ser totalmente explotada cuando el tráfico en el sistema es bajo, debido a que cuando no hay mucha carga en el sistema, los esquemas de asignación de canales no se ven en la necesidad de reutilizar canales, sin embargo, conforme el tráfico aumenta, el reuso de canales se hace más indispensable, es decir, el uso de SDMA es más visible.

La desventaja principal del uso de SDMA es la cantidad de señalización que necesita. Esto se debe a que cada usuario debe ser identificado o diferenciado de los demás por su posición espacial dentro del área de cobertura, y para que esta información pueda ser transmitida se requiere de más señalización. Otra desventaja de SDMA es la cantidad de procesamiento que se requiere para calcular los pesos del arreglo de antenas y formar el patrón de radiación adecuado para rechazar la mayor cantidad de usuarios interferentes.

Un sistema con SDMA además de tener interferencias intercelulares, también tiene interferencias intracelulares que son generadas por el reuso de canales dentro de cada celda, por lo que en algunos casos, esta interferencia puede ser dominante para un usuario que comparte el mismo canal. De esta forma se observa que no solo se deben considerar los efectos de otras celdas del sistema.

Comparando el sistema con usuarios estáticos y el sistema con usuarios móviles se observó que el efecto de la movilidad es fundamental debido a que la SINR de los usuarios no es la misma en todo el tiempo de servicio, hecho que provoca transferencias intracelulares (en el caso de que la misma estación base le pueda proporcionar servicio con otro canal) o intercelulares (cuando otra estación base le puede dar el servicio). Aunque parezca un aspecto negativo, los resultados presentados en el capítulo 4

muestran lo contrario, ya que el sistema con usuarios móviles tiene un mejor desempeño con respecto a la probabilidad de bloqueo, lo cual se debe a que con la movilidad la SINR de los usuarios cambia, por lo que en algunos casos es necesario que cambien de canal y de esta manera poder seguir siendo atendidos por el sistema. De esta manera el sistema va acomodando al usuario en el canal que le proporcione un mejor servicio y al mismo tiempo libera recursos. Sin embargo, no todas las transferencias de canales son exitosas, por lo que en este sistema aparece una nueva medida de desempeño que es la probabilidad de terminación forzada, la cual refleja la cantidad de usuarios que no pudieron hacer un cambio de canal ya sea intracelular o intercelular en forma exitosa.

Al analizar el o los motivos por los cuales un usuario no pudo ser atendido o tuvo que ser forzado a terminar su servicio, se observó que ambos efectos se debieron principalmente a la falta de recursos en el sistema y no a la falta de calidad en el servicio. A pesar de que SDMA proporciona un incremento en la capacidad de un sistema de comunicaciones, no es posible atender la demanda total de un sistema. En cambio, se apreció que con SDMA el nivel de interferencias en el sistema disminuye provocando que una mayor cantidad de usuarios puedan ser atendidos.

Con respecto a la asignación de canales, se pudo apreciar que la combinación SDMA-DCA tiene un mejor desempeño que SDMA-FCA, debido a que los recursos no están condicionados a utilizarse en una zona geográfica en particular, sino que pueden utilizarse en cualquier zona del sistema siempre y cuando cumplan con ciertos criterios de asignación. Sin embargo, estos sistemas se vuelven imprácticos ya que para asignar un canal es necesario que se revise el sistema completo para seleccionar el canal que cause el menor impacto negativo, por lo que el tiempo necesario para asignar un canal es muy grande en comparación con un sistema con asignación fija de canales.

5.2 Trabajo a Futuro.

De acuerdo a lo presentado en esta tesis, se proponen algunas líneas de investigación con las cuales se puede complementar el trabajo realizado.

- ◆ Desarrollar y/o aplicar algoritmos de control de potencia que eviten el problema cerca-lejos y mejoren la calidad de servicio en un sistema de comunicaciones con SDMA.

- ◆ Aplicar SDMA a sistemas con diferentes tipos de servicios para observar su comportamiento en otras medidas de desempeño, aparte de las presentadas en esta tesis.
- ◆ Dependiendo del tipo de acceso múltiple sobre el cual se implemente SDMA, se tendrá el incremento en capacidad, por lo que se propone hacer pruebas en CDMA y OFDMA para observar su comportamiento. Se propone el uso de CDMA debido a que es el acceso múltiple utilizado en sistemas de tercera generación de sistemas de comunicaciones celulares y ambos han sido propuestos para sistemas futuros.
- ◆ Aplicar SDMA en sistemas donde los usuarios no estén uniformemente distribuidos dentro del área geográfica.

A APÉNDICE

CÁLCULO DEL RADIO DE UN ARREGLO CIRCULAR EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE MODOS QUE DEBEN SER EXCITADOS

Para calcular el radio de un arreglo circular hay que recordar que el campo de un elemento es proporcional a su excitación y el vector de excitación consta de una amplitud y una fase en cada elemento del arreglo. Como se mostró en (2.7), la función del patrón de campo lejano en el espacio libre se obtiene sumando la contribución de cada elemento con respecto a algún punto distante.

Si ahora se considera un arreglo circular continuo¹, la función de excitación se considera periódica con un periodo de 2π radianes y puede ser analizada en términos de su contenido frecuencial con Series de Fourier, dando lugar a sus armónicas o modos.

Aplicando la forma compleja de las Series de Fourier, se tiene que la excitación del arreglo $F(\theta)$ se expresa como:

$$F(\theta) = \sum_{m=-Q}^Q C_m e^{jm\theta} \quad (\text{A.1})$$

Donde C_m son los coeficientes complejos de cada armónica.

¹ Un arreglo circular continuo se define como un arreglo en el cual la distancia entre elementos es tan pequeña que puede ser despreciada.

Cada término en (A.1) representa un modo de la excitación del arreglo y la función es formada por $(2Q+1)$ modos. Como se observa en (A.1), la m -ésima fase está formada por una excitación que es constante en amplitud y linealmente variante en fase con respecto a m , es decir, la fase es $m\theta$.

Si se analiza el modo m , el patrón de campo lejano se puede representar como [1]:

$$\begin{aligned} D_m(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_m e^{jm\theta} e^{j[\kappa R - \cos(\theta - \theta_0)]} d\theta \\ D_m(\theta) &= C_m j^m J_m(\kappa R) e^{jm\theta_0} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Donde $\kappa = 2\pi/\lambda$ y J_m es la función Bessel de primer tipo y de orden m .

Como cada armónica de la excitación corresponde a una armónica del patrón direccional de campo lejano, es posible descomponer cualquier patrón de campo lejano y excitar por separado cada uno de sus componentes tomando en cuenta la función Bessel apropiada que relacione la excitación del arreglo de ese modo en particular, a la correspondiente amplitud del patrón de campo lejano. Por ejemplo, el caso del modo de orden cero, aparece cuando todos los elementos son excitados en fase y da lugar a un patrón de campo lejano omnidireccional de fase constante. En cambio, los modos de alto orden forman un patrón omnidireccional pero con cambios de fase muy rápidos.

De esta manera, la selección del radio del arreglo se debe realizar cuidadosamente para evitar condiciones donde uno o más de los coeficientes de Bessel sean cero. Es decir, si el radio es menor al ideal, solo unos cuantos modos pueden ser excitados debido a que los valores de $J_m(\kappa R)$ son muy pequeños inclusive para valores grandes de m . Físicamente, el corrimiento de fase de los modos de alto orden es tan grande que las señales radiadas se cancelan en todas direcciones, por lo que el modo de más alto orden que puede ser excitado para que su contribución sea conmensurable, es $m = \kappa R$.

Si ahora se considera un arreglo circular con un número finito de elementos, la excitación del arreglo sigue siendo una función periódica y los conceptos de amplitud y fase siguen siendo válidos, solo que ahora se realiza un muestreo de la función de excitación del arreglo continuo [1].

De esta manera, si se aplica el teorema de muestreo, es aparente que la tasa de muestreo en la circunferencia (esto es, la distancia entre elementos), debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta de la excitación. Es decir, si la excitación contiene armónicas hasta de un orden máximo Q , entonces el arreglo de antenas debe tener al menos $2Q$ elementos. Como el modo máximo que puede ser fácilmente excitado es $m = \kappa R$, entonces $Q = \kappa R$.

Si un modo de orden m es excitado por un número finito de elementos, el patrón de campo lejano resultante se calcula introduciendo una función de muestreo $S(\theta)$, la cual corresponde a una serie de impulsos unitarios en la posición de cada elemento y se puede expresar de la siguiente manera:

$$S(\theta) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} e^{jqN\theta} = 1 + \sum_{q=1}^{\infty} e^{jqN\theta} + \sum_{q=1}^{\infty} e^{-jqN\theta} \quad (\text{A.3})$$

Donde N es el número de elementos del arreglo.

La excitación de un modo de orden m con un número finito de elementos omnidireccionales se define como:

$$F_m(\theta) = C_m e^{jm\theta} S(\theta) \quad (\text{A.4})$$

Al sustituir (A.3) en (A.4) se tiene:

$$F_m(\theta) = C_m e^{jm\theta} + C_m \sum_{q=1}^{\infty} (e^{j(qN+m)\theta} + e^{-j(qN-m)\theta}) \quad (\text{A.5})$$

De la misma forma que en (A.2), dado que se tiene $F_m(\theta)$, el patrón de campo lejano correspondiente puede ser expresado como [1]:

$$D_m(\theta) = C_m j^m J_m(\kappa R) e^{jm\theta} + \sum_{q=1}^{\infty} C_m j^{-g} J_g(\kappa R) e^{jg\theta} + \sum_{q=1}^{\infty} C_m j^h J_h(\kappa R) e^{jh\theta} \quad (\text{A.6})$$

Donde $g = (qN - m)$ y $h = (qN + m)$. El primer término representa el patrón de campo lejano deseado y los términos residuales corresponden a los modos de más alto orden.

Así como en el caso de un arreglo continuo pueden existir pequeñas radiaciones de modos más altos que κR , en un arreglo de elementos discretos también existen estas radiaciones que provocan que el patrón de campo lejano presente cierta distorsión.

Los primeros modos de alto orden ($q=1$) en (A.6), que son los modos que tendrían una contribución mayor, no radían con una amplitud grande si se tiene la siguiente condición [1]:

$$(N - m) > \kappa R \quad (A.7)$$

Como el valor máximo de m es κR , entonces:

$$N > 2\kappa R \quad (A.8)$$

Lo cual da como resultado que la distancia entre elementos debe ser:

$$d = \frac{2\pi R}{N} < \frac{\lambda}{2} \quad (A.9)$$

La amplitud de los modos de alto orden no deseados en un arreglo circular uniforme con un radio de 0.955λ se presentan en la figura A.1.

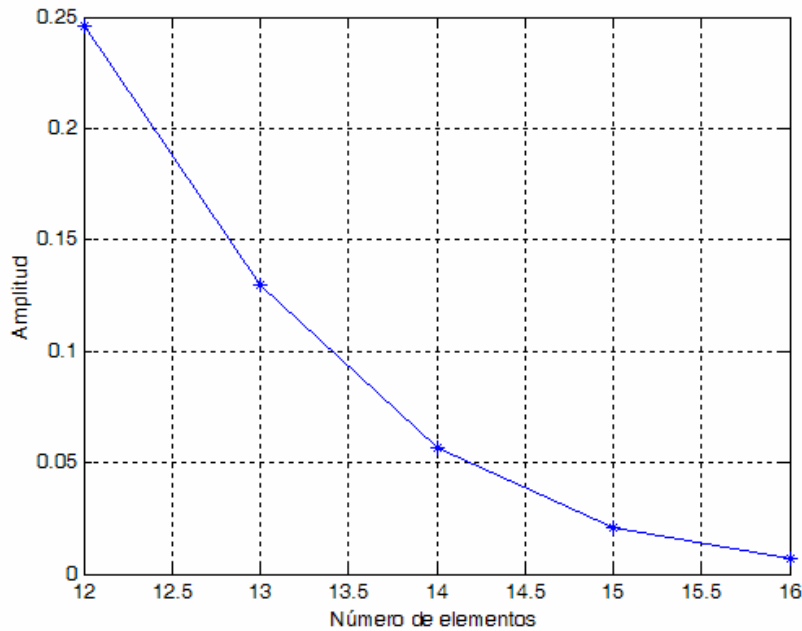


Figura A.1 Amplitud de los modos de alto orden no deseados.



En esta figura se observa que conforme aumenta el número de elementos en el arreglo, la amplitud de los modos no deseados disminuye. Sin embargo, al momento de diseñar un arreglo circular es necesario tener un compromiso entre la amplitud de los modos no deseados y el número de elementos, ya que hay que considerar que las dimensiones, peso y costo del arreglo están en función del número de elementos del mismo, por lo que no es posible tener una gran cantidad de elementos para que la contribución de los modos no deseados sea la mínima.

Referencias.

- [1] Davies, D.E.N., *The Handbook of Antenna Design*, Vol. 2, London Peregrinus, 1983.

B

APÉNDICE

MODELO DE MOVILIDAD

El modelo de movilidad es muy importante ya que permite realizar una evaluación más exacta del impacto de los usuarios en el desempeño de un sistema de comunicaciones móviles. Debido a que los resultados dependen del modelo propuesto, las características y la precisión de los modelos es esencial para determinar los costos de implementación y la evaluación de un sistema.

En la literatura existe una gran variedad de modelos de movilidad, donde algunos tienden a ser muy simplificados – dirigir al usuario en una sola dirección con velocidad constante – o ser muy sofisticados – realizar el modelado completo de un ambiente en particular. La ventaja de los modelos simplificados es que permiten analizar en forma sencilla y general el comportamiento de un sistema de comunicaciones con usuarios móviles. Su desventaja consiste en que las suposiciones que se hacen no son realistas o no concuerdan con el ambiente de simulación. En cambio, los modelos sofisticados son más realistas en cuanto al comportamiento de los usuarios en el sistema, lo que permite tener conclusiones más exactas pero con la desventaja de que esas conclusiones solamente son válidas para un escenario en particular.

En [1], además de definir la dirección, el tiempo entre cambios de dirección y la velocidad de los usuarios como variables aleatorias, se considera la longitud de las calles como una variable aleatoria, donde su media y su varianza son obtenidas por mediciones realizadas en una ciudad en particular.

En [2], Dintchev, et al. se basan en [1], donde extienden el modelo con un nuevo parámetro llamado tiempo de parada. Este parámetro modela la probabilidad de que un carro se detenga en un crucero debido a las luces de tráfico, de tal forma que se modela un patrón de movimiento interrumpido que es típico para un tráfico en áreas urbanas y suburbanas.

En [3] se presenta un modelo que es realista en el sentido de que captura el movimiento en grupos de acuerdo a un comportamiento social, es decir, a pesar de que los usuarios son autónomos, éstos transitan juntos en la misma calle o autopista, tomando en cuenta que en un sistema existen zonas restringidas de paso, tales como cruceros, edificios, etc. En este modelo existen parámetros de movimiento grupal, donde dependiendo del área en la que se encuentre el usuario, será el tipo de movilidad que se le atribuya, además de que se considera otro parámetro de libertad individual, el cual hará que en cualquier momento el usuario se separe del grupo simulando decisiones individuales en su trayectoria. Esto con el fin de que el movimiento del usuario, dependa del área en el que se encuentre y al mismo tiempo pueda tener decisión propia con respecto a su trayectoria.

En [4], se presenta la integración de tres modelos de movilidad: el modelo de ciudad, el modelo de zona y el modelo de calles. El modelo de ciudad consta de un conjunto de zonas conectadas por rutas de gran capacidad, donde el centro de las ciudades son altamente pobladas, mientras que la densidad de población decrece en forma gradual conforme uno se dirige a los límites de la ciudad. La población se divide en grupos y para cada uno de ellos se determina el tipo de movimiento, la distribución de los usuarios, medio de transporte utilizado y el tiempo que un usuario permanece en una zona. El modelo de zona consta de una red de calles y un conjunto de edificios, los cuales están caracterizados por su tipo (residencial, de negocios, centros comerciales, estaciones de metro, etc.) y por su capacidad (número de personas). La distribución de los edificios depende del tipo de área de servicio (centro de la ciudad, zona urbana, etc.).

Una calle se caracteriza por su longitud, su orientación y por la velocidad promedio de los automóviles que circulan por ella. Los usuarios pueden ser estáticos, peatones o pasajeros de transporte público. Otros parámetros considerados son: el tiempo que un usuario pertenece a cierto grupo, el tiempo requerido para cruzar una calle y la probabilidad de que un usuario seleccione una dirección en particular. El modelo de calles describe el ambiente de simulación de los usuarios en un área de unos cuantos metros. Un segmento de calle se caracteriza por su longitud, el número de carriles, su capacidad (automóviles/hr). En base al control del flujo de tráfico vehicular se considera que las calles pueden ser de alta velocidad (tipo autopistas), de flujo controlado por semáforos, de tráfico pesado, de tráfico ligero o con prioridades. Debido a que las condiciones de movilidad en una ciudad son dinámicas, el modelo está en función del tiempo, es decir, se toma en cuenta el tiempo de mayor y menor afluencia de tráfico. Como se puede concluir, el modelo es bastante realista y los resultados obtenidos son muy precisos para este ambiente en particular. Sin embargo, el costo computacional es bastante alto debido a la gran cantidad de parámetros que necesita.

Los modelos anteriores están diseñados para ambientes específicos, por lo que si el sistema por una u otra razón llega a cambiar, los resultados obtenidos no corresponderán a lo planteado. Además la desventaja de estos modelos son la cantidad de parámetros de entrada que necesitan y la cantidad de procesamiento que requieren dentro de un sistema.

Por este motivo, para la simulación de los esquemas de asignación de canales con SDMA se utiliza el modelo de movilidad propuesto por Zonoozi, et al. en [5]. Este modelo tiene parámetros de movilidad bajo condiciones generales, para que pueda ser aplicado en la mayoría de los sistemas de radiocomunicaciones móviles.

Los parámetros que considera el modelo son: los atributos de un usuario en el momento en que arriba al sistema (posición inicial, dirección y velocidad), sus atributos durante el tiempo de servicio (cambios de posición, dirección y velocidad) y sus atributos al final de su tiempo de servicio (posición final, dirección y velocidad). El modelo se describe a continuación:

- ◆ Los usuarios son independientes y están distribuidos uniformemente en el sistema.
- ◆ En el punto inicial, los usuarios pueden moverse en cualquier dirección con la misma probabilidad, tal como se muestra en la figura B.1, donde ρ_0 representa el primer ángulo de movimiento.
- ◆ La velocidad inicial se supone una variable aleatoria que tiene una función de densidad Gaussiana truncada en el intervalo $[0 - 100 \text{ km/hr}]$ y con una desviación estándar $\sigma_v = (\mu_v + 5)/3 \text{ km/hr}$, donde μ_v es la media.
- ◆ La probabilidad de un cambio de dirección tiene una distribución uniforme limitada en el intervalo de $\pm\rho$ con respecto a la dirección actual. En la figura B.1, ρ_1 y ρ_2 representan estos cambios de dirección.
- ◆ El cambio de velocidad es una variable aleatoria distribuida uniformemente en el intervalo de $\pm 10\%$ de la velocidad actual.
- ◆ Los cambios de dirección ocurren en pasos que tienen una distribución exponencial con una media de 60 segundos.

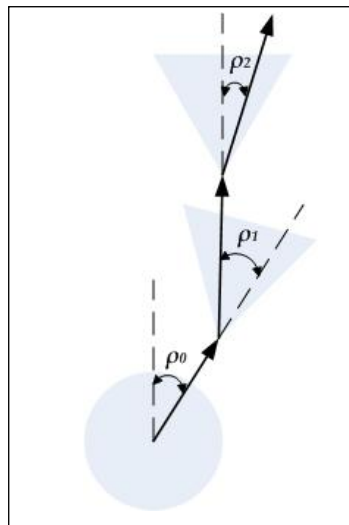


Figura B.1. Ángulos de movimiento.

En la figura B.2 se presentan las trayectorias de un usuario para diferentes valores de ρ .

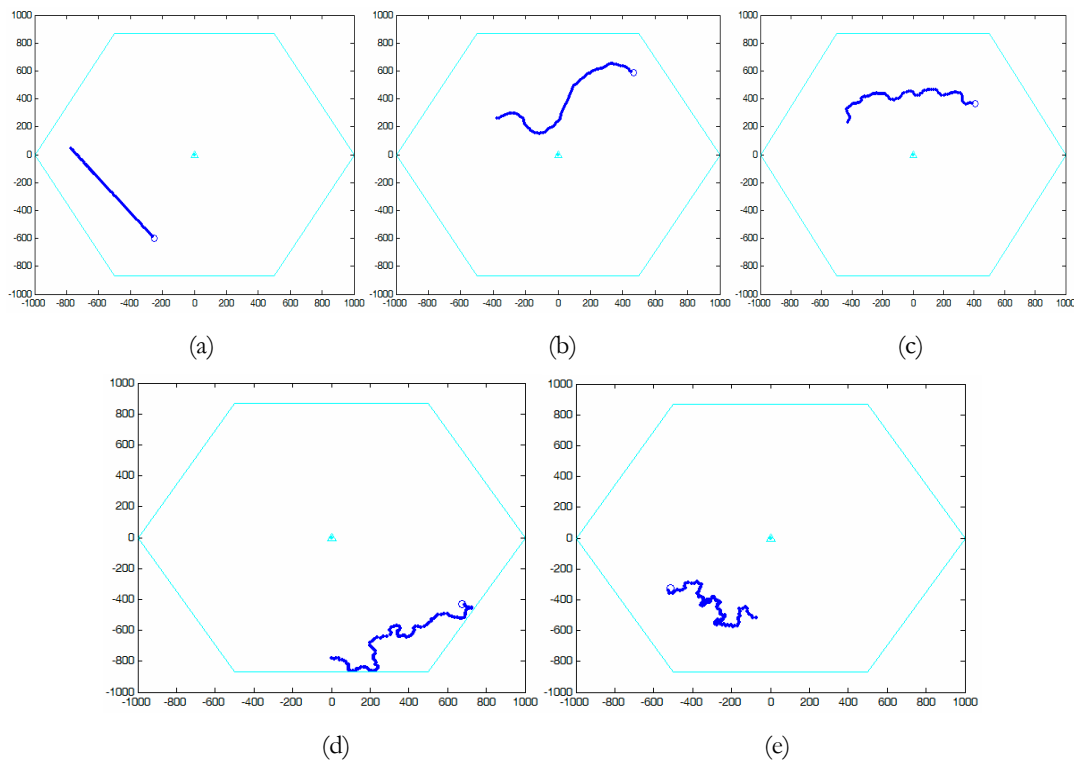


Figura B.2. Trayectorias de un usuario para diferentes valores de ρ , (a) 0° , (b) 20° , (c) 40° , (d) 60° , (e) 90° .

Dependiendo de la estructura de las calles, un usuario puede moverse a diferentes direcciones y velocidades. De esta manera, se puede observar que el valor de ρ cambia dependiendo del tipo de escenario que se evalúe, por ejemplo, si ρ es pequeño, la estructura de la celda presenta calles más largas donde no hay cambios de dirección, en cambio, si ρ es grande, entonces se tiene un sistema donde las calles son más cortas, permitiendo una gran cantidad de cambios de dirección. Con respecto a la velocidad, es poco realista suponer que está distribuida uniformemente y que permanece constante durante el tiempo de servicio de un usuario, sobretodo porque la velocidad y sus cambios dependen de la estructura de las calles por el que transite, de ahí que otra ventaja de este algoritmo es que con la distribución Gaussiana truncada se tiene un movimiento acorde a la estructura de las calles (cambios de dirección).

Otra ventaja, además de que el modelo es más general, es que es más eficiente con respecto a los costos computacionales en comparación con los modelos anteriores.

Referencias.

- [1] Bratanov, P.I., “User mobility modeling in cellular communications networks”, Ph.D. dissertation, Vienna University of Technology, 1999.
- [2] Dintchev, P.A., Perez-Quiles, B. and Bonek, E., “An improved mobility model for 2G and 3G cellular systems”, *IEEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies 2004*, pp. 402-406, 2004.
- [3] Tugcu, T. and Ersoy, C., “Application of a realistic mobility model to call admissions in DS-CDMA cellular systems”, *IEEE Vehicular Technology Conference VTC-2001*, Vol. 2, pp. 1047-1051, Mayo 2001.
- [4] Markoulidakis, J.G., Lyberopoulos, G.L., Tsirkas, D.F. and Sykas, E.D., “Mobility modeling in third generation mobile communications systems”, *IEEE Personal Communications*, Vol. 4, Issue 4, pp. 41-56, Agosto 1997.
- [5] Zonoozi, M.M. and Dassanayake, P., “User mobility modeling and characterization of mobility patterns”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 15, Issue 7, pp. 1239-1252, Septiembre 1997.

Lista de figuras

1.1	Clasificación de los esquemas de acceso múltiple.....	4
1.2	Representación del Acceso Múltiple por División de Frecuencia.....	6
1.3	Representación del Acceso Múltiple por División de Tiempo.....	9
1.4	Representación del Acceso Múltiple por División de Código	13
1.5	Representación de FDMA/TDMA.....	17
1.6	Representación de FDMA/CDMA.....	18
2.1	Representación del Acceso Múltiple por División de Espacio.....	26
2.2	Diagrama a bloques de una Antena Inteligente.....	27
2.3	Patrones de radiación de un arreglo lineal uniforme con 12 elementos.....	29
2.4	Arreglo lineal de antenas.....	31
2.5	Arreglo lineal uniforme.....	31
2.6	$F(\theta)$ de un arreglo lineal uniforme con 6 elementos.....	33
2.7	Efecto del número de elementos en un arreglo lineal uniforme.....	35
2.8	Efecto de la distancia entre elementos en un arreglo lineal uniforme.....	36
2.9	Arreglo circular uniforme.....	38
2.10	Arreglo circular uniforme cuando $\varphi=\pi/2$	38
2.11	$F(\varphi,\theta)$ de un arreglo circular uniforme con 6 elementos.....	40
2.12	Efecto en el patrón de radiación de un arreglo circular uniforme con 8 elementos debido a variaciones del radio.....	42
2.13	Efecto del número de elementos en un arreglo circular uniforme.....	43
2.14	Sistema con conmutación de haces.....	55
2.15	Comparación entre arreglos.....	62
2.16	Arreglos con diferente número de elementos.....	63
2.17	SINR promedio para cada arreglo.....	63

2.18 Patrones de radiación con 12 elementos.....	64
2.19 SINR promedio dependiendo del número de usuarios en la celda.....	65
3.1 Algoritmo Duplicar Primero.....	81
3.2 Algoritmo Duplicar al Final.....	82
3.3 Algoritmo para Duplicar.....	86
3.4 Algoritmo para Triplicar.....	87
3.5 Algoritmo UPA.....	90
3.6 Algoritmo ERB.....	91
3.7 Algoritmo EPS.....	92
3.8 Algoritmo 1.....	103
3.9 Algoritmo 2.....	104
3.10 Algoritmo MIN.....	106
3.11 Algoritmo MAX.....	107
3.12 Algoritmo de SINR más grande.....	112
3.13 Algoritmo de menor interferencia.....	113
3.14 Algoritmo para la asignación de ranuras.....	117
3.15 Algoritmo CCL.....	122
3.16 Algoritmo ECL.....	123
3.17 Algoritmo ARP.....	124
3.18 Algoritmo LIA.....	125
4.1 Probabilidad de bloqueo obtenida en una sola celda.....	138
4.2 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 7 celdas.....	140
4.3 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 7 celdas para niveles de tráfico alto.....	140
4.4 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 49 celdas.....	141
4.5 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 49 celdas para niveles de tráfico alto.....	142
4.6 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 49 celdas.....	143
4.7 Probabilidad de bloqueo obtenida en la celda central de un sistema con 49 celdas.....	145

4.8	Movilidad de dos usuarios dentro de una celda	146
4.9	Efecto de la movilidad en la SINR para una $\rho=20^\circ$	147
4.10	Probabilidad de bloqueo obtenida en una celda con usuarios móviles	148
4.11	Probabilidad de terminación forzada obtenida en una celda con usuarios móviles.....	149
4.12	Probabilidad de bloqueo obtenida en un sistema multicelular con usuarios móviles.....	150
4.13	Porcentaje de usuarios bloqueados por falta de recursos y por no cumplir con la SINR requerida.....	150
4.14	Porcentaje de transferencias intracelulares e intercelulares	151
4.15	Probabilidad de terminación forzada obtenida en un sistema multicelular con usuarios móviles.....	152
4.16	Porcentaje de usuarios forzados a terminar su llamada por falta de recursos y por no cumplir con la SINR requerida.....	152
A.1	Amplitud de los modos de alto orden no deseados.....	162
B.1	Ángulos de movimiento.....	168
B.2	Trayectorias de un usuario para diferentes valores de ρ	169

Lista de tablas

2.1	Parámetros de un arreglo lineal uniforme y sus efectos.....	37
2.2	Parámetros de un arreglo circular uniforme y sus efectos.....	44
2.3	Radio de un arreglo circular para diferente número de elementos.....	61

Lista de Variables

α	Corrimiento de fase entre elementos adyacentes.
β	Angulo relativo entre elementos adyacentes.
γ	Factor de pesos.
Δd	Diferencia de distancia entre trayectorias de una señal.
$\Delta\varphi$	Diferencia de fase.
ε	Error.
θ	Angulo azimutal.
θ_0	Angulo de arribo.
κ	Número de onda.
λ	Longitud de onda de operación.
μ	Constante que controla la convergencia del vector de pesos.
ρ	Intervalo de la distribución uniforme del cambio de dirección.
σ_n^2	Potencia del ruido térmico.
σ_s^2	Potencia de la señal de salida.
σ_u^2	Potencia de la interferencia total.
τ	Retardo.
φ	Angulo de elevación.
A_n	Amplitud de las señales.
c	Velocidad de la luz.
C_m	Coficiente complejo de una armónica o modo.
d	Distancia entre elementos de un arreglo.
$d^*(t)$	Señal de referencia.
$D(\theta)$	Patrón de campo lejano.

f	Frecuencia de operación.
$f(\theta, \varphi)$	Función que representa el patrón de radiación de una antena.
$F(\theta, \varphi)$, $F(\theta)$	Factor de arreglo.
$f_v(v)$	Función de densidad de la velocidad de un usuario.
$G(\theta, \varphi)$	Función que representa el patrón de radiación de un arreglo de antenas.
$J(w)$	Función de costo de los pesos.
J_m	Función Bessel de primer tipo y de orden m .
k	Factor de reuso de un canal con SDMA.
K_u	Señales interferentes.
L	Número de señales interferentes.
M	Número de canales en un sistema.
\mathbf{n}	Vector de ruido.
N	Número de elementos de un arreglo de antenas.
P_s	Probabilidad de utilizar un canal más de una vez al mismo tiempo.
Q	Orden máximo de las armónicas de la excitación de un arreglo circular.
$\hat{\mathbf{r}}, \tilde{\mathbf{r}}$	Estimado de los valores instantáneos.
R	Radio de un arreglo de antenas circular.
\mathbf{R}	Matriz de covarianza del arreglo.
$\hat{\mathbf{R}}, \tilde{\mathbf{R}}$	Estimado del vector \mathbf{R} .
\mathbf{R}_{mm}	Matriz de correlación de la interferencia más ruido.
\mathbf{R}_s	Matriz de correlación de la señal deseada.
\mathbf{R}_u	Matriz de correlación de la interferencia.
$s(t)$	Señal deseada.
$\hat{s}(t)$	Estimado de la señal deseada.
\mathbf{s}	Vector de las señales deseadas.
$S(\theta)$	Función de muestreo.
\mathbf{u}	Vector de señales interferentes.
v	Velocidad de un usuario.
\mathbf{v}	Vector de direccionamiento.

\mathbf{v}_0	Vector de direccionamiento del usuario deseado.
\mathbf{v}_i	Vector de direccionamiento del i -ésimo usuario interferente.
V_{\max}	Velocidad máxima permitida a un usuario.
V_{\min}	Velocidad mínima permitida a un usuario.
\mathbf{w}	Vector de pesos.
\mathbf{w}_{opt}	Vector de pesos óptimo.
\mathbf{x}	Vector de la señal de salida del arreglo.
\mathbf{y}	Vector de la señal de salida de la antena inteligente.

Lista de Acrónimos

16,24,256 QAM	Modulación de amplitud en cuadratura con 16, 24 y 256 símbolos.
AMPS	Servicio Avanzado de Telefonía Móvil.
ARP	Algoritmo de reuso de partición autónoma.
ArrayComm	Red de Comunicaciones Celulares.
BMAP	Proceso de Arribo Markoviano en Grupo.
BPSK	Modulación por corrimiento de fase binario.
BSF-MF	Algoritmo con el primer subconjunto de usuarios de MF.
BUF-MF	Algoritmo con el primer usuario de MF.
CCL	Algoritmo de carga de canal concentrada.
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código.
cdma2000	Estándar Americano de 3ª. Generación basado en CDMA.
CEPT	Junta Europea de Administración de Telecomunicaciones y Correo Postal.
CFDCA	Asignación dinámica de canales con función de costos.
CMMF	Algoritmo de ajuste max – min centralizado.
CT 0, 1, 2	Telecomunicaciones Inalámbricas de 0, 1ª y 2ª Generación.
DAMPS	Servicio Avanzado de Telefonía Móvil Digital.
DCA	Asignación Dinámica de Canales.
DCPC	Control de Potencia restringido y distribuido.
DECT	Telecomunicaciones Digitales Mejoradas e Inalámbricas.
DL	Algoritmo Duplicar al final.
DLSAI	Algoritmo DL con los criterios de separación angular e interferencias.
DMMF	Algoritmo de ajuste max – min distribuido.
DMMF-IA	Algoritmo de ajuste max–min distribuido con rechazo de interferencia.

DRF-IA	Algoritmo de ajuste inverso distribuido con rechazo de interferencia.
ECL	Algoritmo de carga de canal uniforme.
EDDF	Algoritmo de primer usuario con prioridad debido al tiempo de espera.
EDGE	Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución de GSM.
EPS	Algoritmo de proporciones iguales de SNR.
ERB	Algoritmo de misma tasa y PBE.
ESPIRIT	Estimación de parámetros por medio de la técnica de invarianza rotacional.
FA	Algoritmo de primer canal disponible.
FCA	Asignación Fija de Canales.
FCFS	Algoritmo primero en llegar – primero en salir.
FD	Algoritmo Duplicar primero.
FDD	Duplexaje por División de Frecuencia.
FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FDSINR	Algoritmo FD con el criterio de la SINR.
FM	Frecuencia Modulada.
GDCA	Asignación dinámica de canales con costos geométricos.
GPRS	Servicio de Radio General de Paquetes.
GSM	Sistema Global para Comunicaciones Móviles.
HCA	Asignación Híbrida de Canales.
HSDCA	Asignación dinámica de canales con jerarquías.
IS-54	Norma IS-54.
IS-95	Norma IS-95.
IS-95B	Norma IS-95B.
ISI	Interferencia Intersímbolo.
JDC	Sistema Celular Digital Japonés.
LIA	Algoritmo de menor interferencia.
LMS	Mínimos Cuadrados Medio.
LODA	Algoritmo de asignación dinámica localmente optimizada.
MAC	Capa de acceso al medio.
MCF	Algoritmo del primer usuario max – min correlacionado.

MF	Algoritmo de máximo ajuste.
MONSTER	Simulador multimedia de redes móviles para prueba y evaluación de manejo de recursos de radio.
MSF	Algoritmo del primer subconjunto de <i>throughput</i> máximo.
MVDR	Varianza Mínima sin Distorsión.
NMT	Telefonía Móvil Nórdica.
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.
ORU	Algoritmo optimizado en función de la urgencia por transmitir.
PBE	Probabilidad de bit erróneo.
PCS	Servicios de Comunicaciones Personales.
QPSK	Modulación por corrimiento de fase en cuadratura.
R-ALOHA	ALOHA ranurado.
RF	Radio Frecuencia.
RLS	Algoritmo de mínimos cuadrados recursivo.
SDMA	Acceso Múltiple por División de Espacio.
SINR	Relación Señal a Ruido más Interferencia.
$SINR_{max}$	Relación Señal a Ruido más Interferencia máxima.
$SINR_{min}$	Relación Señal a Ruido más Interferencia mínima.
$SINR_{res}$	Relación Señal a Ruido más Interferencia residual.
$SINR_{Th}$	Relación Señal a Ruido más Interferencia umbral.
$SINR_{Thrf}$	Relación Señal a Ruido más Interferencia umbral para las transferencias de canales.
SIR	Relación Señal a Interferencia.
SIR_{Th}	Relación Señal a Interferencia umbral.
SNR	Relación Señal a Ruido.
SNR_{Th}	Relación Señal a Ruido umbral.
SP	Algoritmo de prioridades fijas.
TACS	Sistema de Comunicaciones de Acceso Total.
TDD	Duplexaje por División de Tiempo.
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TLS-ESPIRIT	ESPIRIT con error cuadrático total.
UHF	Ultra Alta Frecuencia.

UMTS	Servicio Universal de Telecomunicaciones Móviles.
UPA	Algoritmo de asignación de potencia uniforme.
UTRA-FDD	Interfaz de Radio Terrestre de UMTS con FDD.
UTRA-TDD	Interfaz de Radio Terrestre de UMTS con TDD.
WLL	Red de telefonía local inalámbrica.

