

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

“Determinación de la capacidad de rechazo de interferencia de arreglos de antenas en un sistema celular CDMA”

TESIS

para cubrir parcialmente los requisitos para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA presenta :

**JUAN PABLO GARCÍA VÁZQUEZ**

Directores de Tesis:

**DR. ÁNGEL GABRIEL ANDRADE REÁTIGA  
DR. MARCO ANTONIO PANDURO MENDOZA (UAT)**

MEXICALI BAJA CALIFORNIA

AGOSTO DEL 2007.

**RESUMEN** de la tesis de Juan Pablo García Vázquez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA. Mexicali Baja California, México. Agosto del 2007.

**“Determinación de la capacidad de rechazo de interferencia de arreglos de antenas en un sistema celular CDMA”**

Resumen aprobado por:

---

**Dr. Ángel Gabriel Andrade Reátiga**

Director de tesis

---

**Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza**

Co-Director de tesis

En la actualidad la tecnología CDMA (Acceso Múltiple por División de Código), ha sido adoptada como la técnica de acceso al medio de las nuevas generaciones de sistemas de comunicación móvil. Sin embargo, estos sistemas presentan como principal limitación la interferencia de Acceso Múltiple (MAI), debido a que ésta interferencia es todo factor que desfasa, modifica o elimina una señal.

Existen diversas metodologías que permiten incrementar la capacidad de los sistemas CDMA y que minimizar la interferencia, tales como: salto en frecuencia, control de potencia, uso de microceldas, implantación de codecs a medio régimen y antenas adaptivas en la estación base.

Existen diversas metodologías que permiten incrementar la capacidad de los sistemas CDMA y que minimizan la interferencia, tales como: control de potencia en la Estación base, uso de técnicas de división de celdas, implantación de codecs a medio régimen y antenas adaptivas en la estación base. En esta tesis se analiza la capacidad de rechazo de interferencia de los arreglos de antena con geometría lineal y circular. La finalidad de usar arreglos en la estación base del sistema celular es que desea contar con un control de potencia mediante conformación de haz (beamforming), que nos permita disminuir o eliminar interferencia y con ello lograr aumentar la capacidad del sistema. De los resultados encontrados se muestra que en ambos arreglos de antena la mayor reducción de interferencia se presenta, cuando el número de elementos de antena,  $N$ , se incrementa, de hecho para valores de  $N=12$ , se obtienen los mejores resultados. Pero si  $N$  es mayor a 12, la reducción de interferencia es mínima. Se determinó que el espaciamiento entre los elementos de antena,  $d$ , que integran el arreglo, permite mejorar el factor de Relación Señal a Ruido, SIR. En el caso del arreglo lineal uniforme se observa que el mejor rango de espaciamiento se da para  $0.4\lambda < d < \lambda 0.5$ . Y para el caso del arreglo circular el rango de espaciamiento se presenta en  $0.38\lambda < d < 0.49\lambda$ . Otro aspecto importante es que el arreglo circular permite tener una mayor cobertura que un arreglo lineal. Un arreglo lineal solo ofrece una cobertura de 120 grados, mientras que un arreglo circular permite ofrecer una cobertura de 360 grados.

**Palabras clave:** Arreglos de antena, Interferencia de Acceso Múltiple (MAI), CDMA

**ABSTRACT** of the thesis, presented by Juan Pablo García Vázquez, in order to obtain the MASTER DEGREE in ELECTRONIC ENGINEER. Mexicali, Baja California, Mexico, August 2007.

**“Capability rejection of the interference of the antenna array in a CDMA cellular System”**

At the present time the technology CDMA (Multiple Accesses by Division Code), has been adopted like a technology of the new generations of mobile communications systems. However, this system has as a principal issue the interference by multiple access (MAI), because the interference is a factor that out of phase, modify o destroy a signal.

Exist several technologies that let increased the capacity of the CDMA cellular systems and that minimize the interference, such as: jump in frequency, control of power, use of microcells, implantation of codecs to average regime and adaptive antennas in the station bases.

In this thesis one looks for to determine the capacity of the adjustments of linear and circular antenna to reject the interference, because this has still not been determined. The purpose of using adjustments in the station bases of the cellular system is that it wishes to count on a control of power by means of beam conformation (beamforming), that allows us to diminish or to eliminate interference and with it to manage to increase the capacity of the system. The results show us that in both array of antenna the mayor capacity of the arrays to reduce the interference with the number of elements of antenna,  $N$ , increased, but to values of  $N=12$  we have the best performance on the system. However if  $N$  is mayor 12, the performance is minimal. I determine that spacing between antenna elements,  $d$ , let the best performance of the factor signal to interference SIR. In the case of the uniform linear array, the best range of values of  $d$  is  $0.4\lambda < d < \lambda 0.5$  and on the uniform array the best range of spacing is  $0.38\lambda < d < 0.49\lambda$ . Other best important aspect is that the circular array has a more area cover, that the linear array. The lineal array only has a cover of 120 degrees, while a circular array let a cover of 360 degrees.

**Key words:** Antenna arrays, Multiple Access Interference, CDMA.

## DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi familia, amigos, familiares y a todos aquellos que siempre buscan día con día su superación, no importando el tamaño de los retos.

## AGRADECIMIENTOS

A mis asesores Ángel y Marco, por su gran paciencia y apoyo, pero sobre todo por compartir sus conocimientos y experiencia.

A la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT), por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis compañeros de maestría: Maria Luisa González, Irma Uriarte, Ángeles Solís, Daniel Murillo, Carlos Guardado y Armando Castañeda, por su compañía y apoyo.

A nuestro coordinador Guillermo Galaviz por compartir sus conocimientos y siempre brindarme su apoyo.

A nuestros maestros: Karina Raya, Daniel Hernández, Luis, Abad, Ángel Sucedá y José Antonio Cárdenas. Por su apoyo y motivación.

A mi compañeros de Masimo, pero en especial a Jefe Miguel Arturo Ángel.

A nuestra Universidad por siempre buscar la excelencia y calidad académica.

## INDICE

<b>Resumen.</b>	I
<b>Abstract.</b>	II
<b>Dedicatoria.</b>	III
<b>Agradecimientos.</b>	IV
<b>Índice de figuras.</b>	VIII
<b>Índice de tablas.</b>	IX
<b>Índice de Acrónimos.</b>	X
<b>Capítulo I Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes. “Introducción a los sistemas CDMA”.	1
1.1.1 Fundamentos de los sistemas DS.	3
1.2 Planteamiento del problema.	6
1.3 Justificación.	7
1.4 Trabajo Relacionado	7
1.5 Objetivo General.	13
1.5.1 Objetivos específicos.	14
1.5 Organización del trabajo.	15
<b>Capítulo II Antenas Inteligentes</b>	<b>16</b>
2.1 Antenas inteligentes	16
2.1.1 Tipos de antena inteligente.	18
2.2 Características de las antenas inteligentes.	20
2.3 Ventajas de las antenas inteligentes.	21
2.4 Implementación de una antena inteligente.	23
2.5 Conclusiones.	24
<b>Capítulo III Arreglos de Antenas.</b>	<b>25</b>
3.1 Introducción.	25
3.2 Modelado de arreglos de antenas.	25
3.2.1 Arreglo lineal uniforme (ULA).	27
3.2.2 Arreglo circular uniforme. (UCA).	28
3.3 Modelado de la señal.	29
3.3.1 Señal recibida.	29
3.4 Coeficiente de supresión de interferencia espacial.	31
3.4.1 Arreglo circular.	32
3.5 Conclusiones	32
<b>Capítulo IV Evaluación de la capacidad de rechazo de interferencia de agrupaciones lineales y circulares.</b>	<b>34</b>
4.1 Introducción	34
4.2 Análisis de resultados del arreglo lineal.	34
4.3 Análisis de resultados del arreglo circular.	38
4.4 Análisis comparativo entre la geometría lineal y	42

Circular.	
4.5 Conclusiones.	43
<b>Capítulo V Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>45</b>
5.1 Conclusiones del estudio realizado.	45
5.2 Publicaciones como resultado de este trabajo de Investigación.	46
5.3 Temas que pueden considerarse como futuros trabajos de Investigación.	46
<b>Bibliografía</b>	<b>47</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS.

1.1	Diagrama a bloques de un sistema de espectro ensanchado CDMA.	1
1.2	Transmisión DS.	3
1.3	Recepción DS.	4
1.4	Correlador utilizado en la recepción.	5
1.5	Limitaciones del canal de radio.	7
2.1	Diagrama a bloques de una antena inteligente.	17
2.2	Esquema de haz conmutado.	18
2.3	Esquema de haz de seguimiento.	19
2.4	Esquema de haz adaptivo.	20
3.1	Geometría general de un arreglo de antenas.	26
3.2	Notación y definiciones empleadas en una arreglo lineal uniforme.	28
3.3	Notación y definiciones empleadas en un arreglo circula uniforme.	29
4.1	Grafica de variación del coeficiente de supresión de interferencia espacial con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado $\theta_1$ para diferente numero de elementos de antena $N$ con espaciamiento $d=0.5\lambda$ .	34
4.2 a	Grafica de la variación del coeficiente de supresión de interferencia espacial $G_{\text{avg}}(\theta_1)$ con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado $\theta_1$ para espaciamiento $d: 0.1\lambda$ a $0.5\lambda$ .	35
4.2 b	Grafica de la variación del coeficiente de supresión de interferencia espacial $G_{\text{avg}}(\theta_1)$ con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado $\theta_1$ para espaciamiento $d: 0.5 \lambda$ a $1 \lambda$ .	37
4.2 c	Grafica de la variación del coeficiente de supresión de interferencia espacial $G_{\text{avg}}(\theta_1)$ con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado $\theta_1$ para espaciamiento $d: 0\lambda$ a $2\lambda$ .	37

**INDICE DE FIGURAS (CONTINUACION)**

4.3	Grafica de variación del coeficiente de supresión espacial con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado $\theta_1$ para diferente número de elementos de antena $N$ con espaciamiento $d= 0.5\lambda$ .	38
4.4 a	Grafica de variación del coeficiente de supresión espacial con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado $\theta_1$ para diferente número de elementos de antena $N=12$ con espaciamiento $d: 0.1\lambda$ a $0.5\lambda$ .	40
4.4 b	Grafica de variación del coeficiente de supresión espacial con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado $\theta_1$ para diferente número de elementos de antena $N=12$ con espaciamiento $d: 0.5\lambda$ a $1\lambda$ .	41
4.4 c	Grafica de variación del coeficiente de supresión espacial con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado $\theta_1$ para diferente número de elementos de antena $N=12$ con espaciamiento $d: 0\lambda$ a $2\lambda$ .	41
4.5	Comparación del promedio total del coeficiente de supresión de interferencia espacial sobre el DOA en función de su espaciamiento $d$ , entre el arreglo lineal (líneas punteadas rojas) y el arreglo circular (líneas continuas azul).	43

## ÍNDICE DE TABLAS.

4.1	Ganancias de salida en dB para diferentes valores de $N$ . (arreglo lineal)	35
4.2	Ganancias de salida del arreglo en dB para diferentes valores de $N$ . (arreglo circular)	39
4.3	Ganancias de salida del arreglo en dB para diferentes valores de $d$ .	40

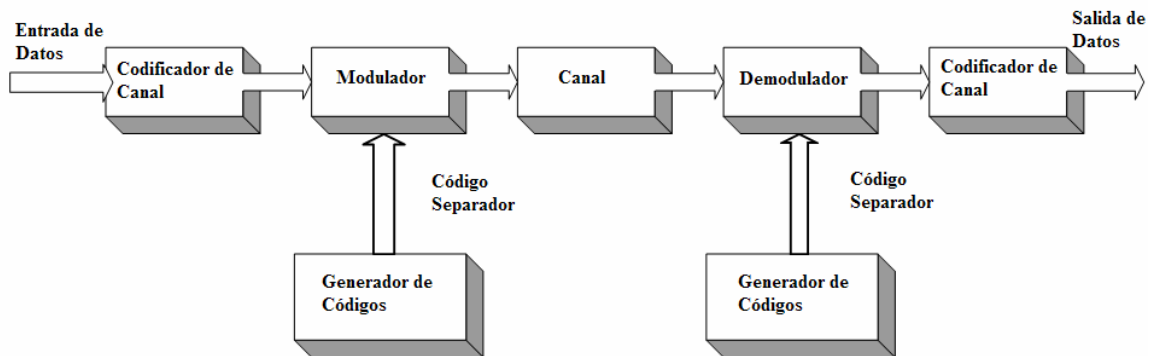
**LISTA DE ACRONIMOS**

CDMA	Acceso Múltiple por División de Código.
DS	Secuencia Directa.
ULA	Arreglo Lineal Uniforme.
UCA	Arreglo Circular Uniforme.
dB	Decibeles.
SS	Espectro Ensanchado.
FH	Frecuencia
TH	Tiempo
MC	Multi Portadora
GSM	Sistema Global de Comunicaciones
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo.
UTMS	Sistema
SF	Factor de Ensanchamiento.
PG	Ganancia de Procesado.
S/N	Relación Señal a Ruido.
S/I	Relación Señal a Interferencia.
MAI	Interferencia por Acceso Múltiple.
ISI	Interferencia Intersimbolica.
AMPS	Servicio Avanzados de Tecnología Móvil.
FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
3G	Tercera Generación.
QoS	Calidad de Servicio.
SIR	Relación Señal a Ruido.
DOA	Dirección del ángulo de Llegada.
VER	Tasa de error
HSR	Receptor de Alta sensibilidad.
SFIR	Rechazo de Filtrado por Interferencia.
SDMA	Acceso Múltiple por División Espacial.
AOA	Angulo de Llegada.
AWGN	Ruido Aditivo Gaussiano.
GAVG	Coficiente de Supresión de Interferencia Espacial.

## Capítulo I

### 1.1 Antecedentes “Introducción a los sistemas CDMA”

Los sistemas CDMA, son sistemas de comunicaciones con acceso múltiple (diversos usuarios acceden a un nodo central de la red), son aquellos en los que el acceso se estructura mediante la utilización de diversos códigos, que caracterizan a los usuarios individuales. Los sistemas CDMA entran dentro de la categoría de sistemas con espectro ensanchado o SS (Spread Spectrum), los cuales se caracterizan por la utilización de un ancho de banda muy superior al estrictamente necesario para transmitir la información [20]. En la siguiente figura 1.1, se muestra un diagrama general de este tipo de sistemas:



**Figura 1.1** Diagrama a bloques de un sistema de espectro ensanchado CDMA.

Los sistemas de espectro ensanchados presentan ventajas muy diversas, por lo que encuentran también utilidad en entornos donde no se aplica CDMA.

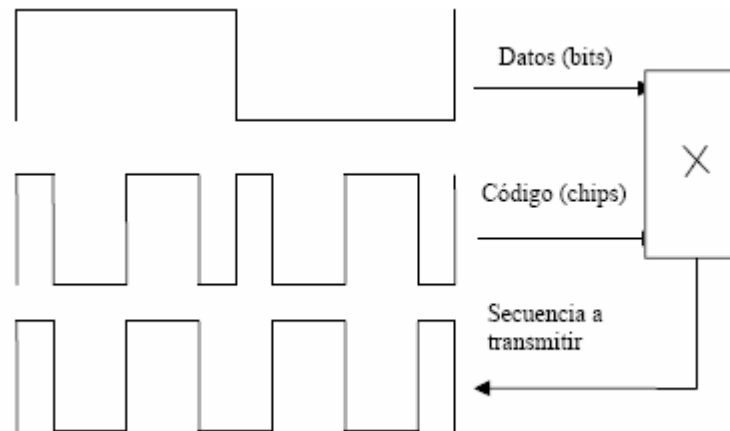
En general todos los sistemas de espectro ensanchado permiten la implementación de CDMA. Las técnicas más importantes son:

- ***FH (Frequency Hopping)***. La transmisión es en si de banda estrecha, con una modulación convencional, pero la frecuencia de la portadora va cambiando periódicamente, de acuerdo con una secuencia conocida por el transmisor y el receptor. Utilizando diferente secuencia (códigos) para cada usuario se puede implementar un sistema CDMA.
- ***TH (Time Hopping)***. La transmisión se realiza en intervalos de tiempo disjuntos, que se estructuran mediante códigos que indican en qué intervalos se transmite y en cuáles no. Diferentes códigos podrían servir para identificar a diferentes usuarios, si se eligen de forma adecuada para que sus transmisiones no se solapen.
- ***DS (Direct Sequence)***. La señal a transmitir se combina con una secuencia de velocidad mucho más alta, y se modula la portadora con el resultado de esta combinación, que tiene la velocidad de esta segunda secuencia. Por ello el ancho de banda utilizado es mucho mayor que si se modulara directamente con la señal original. Pueden diferenciarse usuarios utilizando secuencias diferentes para cada uno de ellos, si se cumplen unas determinadas condiciones de correlación cruzada entre ellas.
- ***MC (Multi Carrier)***. La señal a transmitir se combina con una secuencia de velocidad más alta. La transmisión se realiza en múltiples portadoras, moduladas por diferentes chips. En los sistemas de comunicaciones móviles, el acceso múltiple más característico es el que se realiza en el interfaz radio, mediante el cual los terminales móviles se comunican con estaciones base. El sistema GSM permite la implementación de la técnica FH, combinada con TDMA. Por su parte, la asignación de canales en GPRS guarda alguna relación con las técnicas

TH. El sistema UMTS, y otros sistemas de comunicaciones móviles CDMA, utilizan la técnica DS.

### 1.1.1 Fundamentos de los sistemas DS.

Aunque la implementación práctica es más compleja, los sistemas DS se fundamentan en la utilización de secuencias de ensanchamiento espectral, cuyas unidades elementales se denominan *chips*, y que se combinan con la secuencia de datos a transmitir (bits) para formar una secuencia de alta velocidad, que tiene integrada la información que se desea transmitir, pero que además tiene propiedades derivadas de las de la secuencia de chips utilizada. Un esquema simplificado se muestra en la figura 1.2, donde la secuencia resultante sería la que se llevaría al modulador.



**Figura 1.2** Transmisión DS.

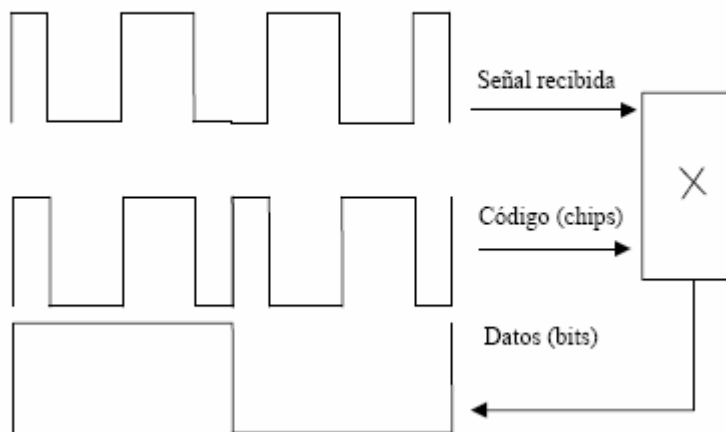
Se denomina *factor de ensanchamiento* (*SF Spreading Factor*) a la relación entre la velocidad chip y la velocidad binaria original:

$$SF = \frac{V_c}{V_b} \quad (1.1)$$

El factor de ensanchamiento también se denomina ganancia de proceso (*PG Processing Gain*) ya que es una medida de la mejora que se obtiene en recepción de las relaciones señal a ruido y (en ciertas condiciones) señal a interferencia. Es habitual que la ganancia de proceso se exprese en unidades logarítmicas (dB).

$$PG = 10 \log \frac{V_c}{V_b} \quad (1.2)$$

Un esquema muy simplificado del proceso de recepción se muestra en la figura 1.3. En el proceso de recepción se obtiene una señal con una velocidad más baja (la original) con lo que se reduce el ancho de banda de ruido, y la relación señal a ruido mejora en la misma proporción. Las características espectrales del ruido no se ven afectadas por su combinación con la secuencia de chips, por lo que la reducción del ancho de banda se traduce directamente en una reducción, en la misma proporción, de la potencia de ruido.



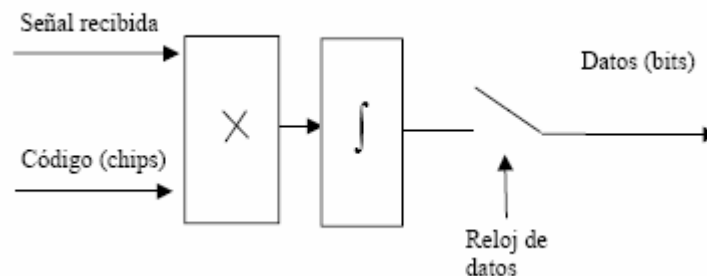
**Figura 1.3** Recepción DS.

De ahí la denominación del factor de ensanchamiento como ganancia de proceso, pues cuantifica la mejora en relación S/N que se produce en el proceso de recepción.

Un esquema tan simplificado como el de la figura 1.3 tan solo serviría en un entorno ideal, sin ruido ni interferencias. En la práctica la operación de “desensanchado” se realiza mediante un correlador, es decir, combinando la multiplicación por la secuencia de código con una integración y posterior muestreo a velocidad de bit. En este proceso se produce la reducción del ancho de banda y de la potencia de ruido. En este caso además es preciso sincronizar temporalmente las secuencias de código para que la correlación se realice con ambas perfectamente alineadas. Un esquema más realista se muestra en la figura 1.4. Puede comprobarse que, si se cumplen condiciones muy generales, la relación S/N se incrementa, en el proceso de correlación, en una cantidad igual a la ganancia de proceso.

Si además del ruido y de la señal deseada, existen señales interferentes en la misma banda de frecuencias, pueden darse diferentes situaciones:

- **Interferencia de banda estrecha:** Al multiplicarla por la secuencia de chips, de alta velocidad, esta interferencia sufre un proceso inverso al de la señal deseada. Su espectro se ensancha, con el consiguiente reparto de su potencia en un ancho de banda grande, y posterior pérdida de potencia por la integración (reducción de ancho de banda). En definitiva, en general la relación S/I, en este caso, mejora en la misma proporción que la relación S/N, es decir, en la ganancia de proceso.



**Figura 1.4** Correlador utilizado en la recepción

- ***Interferencia de banda ancha con baja correlación:*** Si la señal interferente es similar en su estructura a la deseada, pero utiliza un código diferente, la mejora en la relación S/I en el correlador dependerá de las propiedades de correlación entre ambos códigos. Si se trata de códigos de baja correlación la relación S/I mejora también en la proporción determinada por la ganancia de proceso.
- ***Interferencia de banda ancha con códigos ortogonales:*** Si se utilizan códigos ortogonales, la salida del correlador es estrictamente nula en cuanto a interferencia, por lo que la relación S/I se hace idealmente infinita. En este sentido los códigos ortogonales son perfectos para la diferenciación de canales en una transmisión CDMA.

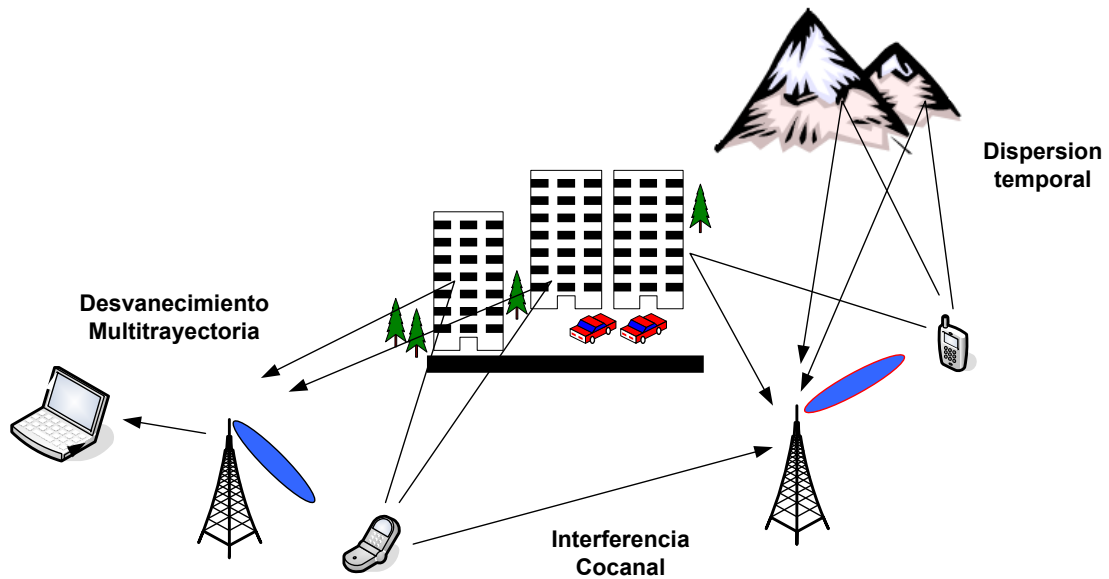
Por tanto, con la importante excepción de la utilización de códigos ortogonales, en general puede decirse que la relación señal a ruido y la relación señal a interferencia se incrementan, en el proceso de correlación, en una cantidad igual a la ganancia de proceso.

## 1.2 Planteamiento del problema

Durante los últimos años el crecimiento continuo del número de usuarios celulares y la implementación de los nuevos servicios de la tercera generación, que requieren de altas tasas binarias, ha provocado la necesidad de incrementar la capacidad del sistema. Donde la capacidad del sistema, se puede definir como la tasa binaria que puede ofrecerse y en un área geográfica determinada [1].

Para poder aumentar la capacidad de los sistemas CDMA, primero debemos de eliminar o reducir las limitaciones de CDMA [22], causadas por los incrementos de los usuarios y la demanda de altas tasas binarias tales como:

- Desvanecimiento rápido multirayecto.
- Interferencia por acceso múltiple (MAI).



**Figura 1.5** Principales limitaciones del canal de radio.

En la figura anterior se muestran las limitaciones que se presentan en los sistemas CDMA.

Donde la interferencia, es considerada como el factor principal limitante del desarrollo los sistemas de comunicación móvil. Debido a que la interferencia es todo factor que desfasa, modifica o elimina una señal. Por tal motivo es considerado un punto de importancia para el desarrollo de esta tesis.

### 1.3 Justificación

En la actualidad la tecnología CDMA, ha sido adoptada como la técnica de acceso al medio de las nuevas generaciones de sistemas de comunicación móvil [21]. Debido a que CDMA presenta ventajas muy importantes sobre otras tecnologías, razón por la cual se ha impuesto de forma clara en los sistemas de tercera generación.

Dentro principales ventajas que puede otorgar este tipo de tecnologías se pueden mencionar:

- Utilización de la misma frecuencia en todas las estaciones base, utilizando códigos diferentes para diferenciar sus transmisiones. No es necesario realizar planificación de frecuencias.
- Flexibilidad en el despliegue de la red y su posterior crecimiento, por la posibilidad de reutilizar la misma frecuencia indefinidamente.
- Flexibilidad para dar cabida a servicios con muy diferentes requisitos de velocidad de transmisión. Mediante el uso de factores de ensanchamiento diferentes, todas las transmisiones acaban teniendo la misma velocidad de chip partiendo de tasas binarias muy diferentes. El uso de factores de ensanchamiento más pequeños para las velocidades binarias más altas supone también una menor ganancia de proceso en recepción.
- La capacidad global de un sistema CDMA, expresada en número de comunicaciones que pueden cursarse por unidad de ancho de banda y de superficie, es también superior a la de otras tecnologías.

Esta serie de ventajas traen beneficios tanto para los usuarios y suscriptores de los cuales se pueden listar:

**Beneficios a los usuarios:**

- ***Calidad excepcional de la voz y la comunicación.*** CDMA provee calidad superior de voz, considerada virtualmente tan buena como la de la línea alámbrica. También filtra los ruidos de fondo, cruces de llamada e interferencia, mejorando grandemente la privacidad y calidad de la llamada.
- ***Menor consumo de energía.*** Los teléfonos de CDMA, típicamente transmiten con fuentes de energía substancialmente menores que los teléfonos que utilizan otras tecnologías, resultando en una vida más larga para las baterías, lo que redunda en una mayor disponibilidad para el tiempo de la llamadas y tiempo de espera. Porque se utilizan baterías de menor tamaño, los fabricantes pueden fabricar teléfonos móviles de menor tamaño y peso.
- ***Menos llamadas ininterrumpidas.*** CDMA aumenta la capacidad del sistema, eliminando virtualmente señales de ocupado, cruces de llamadas y llamadas interrumpidas que resultan de la congestión del sistema.
- ***Más extensa cobertura.*** La señal del espectro amplio de CDMA provee mayor cobertura que otras tecnologías inalámbricas, tanto dentro de locales como al aire libre. CDMA también interacciona con otras formas de sistemas de telecomunicación, permitiendo amplias y fluidas coberturas y conexiones.
- ***Seguridad y privacidad.*** Además de filtrar el cruce de llamadas y ruidos de fondo, las transmisiones de espectro amplio y codificado digitalmente de CDMA son intrínsecamente resistentes a la intrusión. La codificación de voz en CDMA también evita el “cloning” y otros tipos de fraude.

- **Mejoras en los servicios.** El canal de control digital de CDMA permite a los usuarios el acceso a la amplia gama de servicios que incluyen la identificación del que llama, mensajes cortos y transmisión de datos. CDMA también permite la transmisión simultánea de voz y datos.

### **Beneficios a los proveedores de servicios.**

- **Mayor capacidad.** CDMA provee 10 a 20 veces la capacidad de las tecnologías análogas inalámbricas y 3 tres veces mas las de otras tecnologías inalámbricas digitales, lo que permite a los proveedores de servicios apoyar más subscriptores y en mayores volúmenes tráfico inalámbrico en una porción limitada del espectro de frecuencias de radio. Debido al rápido crecimiento del número de subscriptores del servicio inalámbrico y los minutos de uso, la capacidad es un problema crítico.
- **Cobertura más amplia.** Con su alcance superior y las características de funcionamiento de su señal, CDMA mejora la cobertura al aire libre y bajo techo. Las redes CDMA requieren solamente una fracción de los asentamientos de celdas que necesitan otras tecnologías inalámbricas para cubrir un área dada, Con menos asentamientos de celdas, los proveedores de servicio pueden reducir su inversión inicial de capital así como también sus costos corrientes de operación y mantenimiento.
- **Flexibilidad.** CDMA es la única tecnología inalámbrica que apoya con efectividad tanto los servicios fijos como móviles desde la misma plataforma, dando apoyo a dos fuentes de ingreso y a la vez permite a los proveedores de servicio el ofrecer a sus clientes un servicio fluido de "un solo teléfono." Las redes de CDMA también cuestan menos en diseño e ingeniería que otros tipos de sistemas inalámbricos, haciéndolos más fáciles de reconfigurar y expandir.

- **Implementación rápida.** Los sistemas CDMA pueden ser implementados y expandidos más rápidamente y con mayor costo–efectividad que la mayoría de las redes de líneas alámbricas. Y porque requiere menos celdas y espacio de celdas, las redes CDMA pueden instalarse más rápidamente que cualquier otro tipo de red inalámbrica.
- **Interacción en las operaciones.** CDMA interacciona con AMPS (el Sistema Avanzado de Teléfono Móvil, la base de la mayoría de las redes de teléfonos celulares analógicos), con redes de teléfono IS–41 y pronto con redes GSM/MAP, que permiten amplia cobertura y conexión, además de permitir a los operadores apoyarse en su equipo.
- **Calidad de servicio.** La superior calidad de la voz en CDMA y mayores servicios que incluyen datos inalámbricos, dan a los proveedores de servicio una clara ventaja sobre la competencia para ganar y conservar clientes
- **Selección.** Con una amplia base de apoyo de fabricantes líderes en telecomunicaciones en el mundo entero y con un aumento de los ahorros de volumen, los proveedores de servicios pueden elegir entre una amplia gama de productos de CDMA avanzados y de costo competitivo.

Debido a la importancia que juega esta técnica de acceso en las nuevas generaciones, el encontrar nuevos métodos que nos permitan dar solución a sus problemas y limitantes traerá como resultados, crear un sistema que pueda poseer características ideales como: adaptabilidad, escalabilidad y robustez.

En esta tesis se propone la utilización de arreglos de antena en la estación base de un sistema celular CDMA, con el propósito de tener un control de potencia mediante conformación de haz (beamforming), para reducir la interferencia.

## 1.4 Trabajo Relacionado

Existen algunos trabajos de investigación previos a este, donde se proponen nuevos métodos para resolver las limitaciones de CDMA:

Por ejemplo, en [1] se proporciona una visión general acerca del estado del arte de la tecnología CDMA, así como los distintos tipos y formas de implementarlas. Se presentan también los resultados de pruebas de campo realizadas sobre prototipos reales y las conclusiones preliminares que se han extraído de ellas.

En [23], se muestra que el uso de antenas adaptivas en la estación base de un sistema celular es un buen método para incrementar su capacidad. En este trabajo deducen que el implementar antenas adaptivas en un macrocelda de un sistema celular proporciona, Incremento de la capacidad, Ahorro del espectro de frecuencias; Reducción de las interferencias, sin embargo no determinan cuantitativamente la cantidad de rechazo de interferencia que presentan estas antenas.

En [25], utilizan un arreglo de antena en la estación base de un sistema celular CDMA, y presentan un análisis para redes multicelda CDMA, con este arreglo en la estación base y considerando el enlace de subida y bajada, modelan los efectos de pérdidas por trayectoria, desvanecimiento Rayleigh, log normal, acceso múltiple por interferencia y ruido térmico. Los resultados presentados demuestran que utilizar arreglos de antena en la estación base de un sistema celular, no importando si es transmisión o recepción, nos ayudan a incrementar la capacidad del sistema. Sin embargo, en este trabajo solo hacen el análisis considerando arreglos lineales.

En [26] se estudia el incremento de capacidad a utilizando un sistema de prueba multi-celda para los sistemas CDMA y FDMA, utilizando antenas adaptivas en la estación base del sistema celular. Se encontró que el utilizar este tipo de antenas ayuda a aumentar la capacidad del sistema y además a mejorar el problema de las

interrupciones en CDMA y en FDMA permiten estudiar el efecto de los errores de control de potencia.

En [24], se investiga el efecto de desarrollar arreglos de antena en una red CDMA2000-1X. Dentro de las aportaciones de este trabajo se tienen:

- 1) El incremento de la capacidad de la red es proporcional a la capacidad del arreglo de antenas utilizado en la estación base.
- 2) Cuando una estación base es equipada con un arreglo de antenas, la capacidad del arreglo se incrementa de manera notable a comparación de una estación base sin arreglo de antenas.

Se concluye que las posibles futuras líneas de investigación propone el desarrollo de arreglos de antena para sistemas de comunicación móvil CDMA, donde se considere cobertura, tráfico y calidad de servicio (QoS).

En [18], se presenta un estudio utilizando únicamente arreglos lineales uniformes en la estación base de un sistema celular CDMA. Consideran parámetros de diseño del arreglo tales como; número de elementos que integran el arreglo y el espaciamiento entre elementos. Dentro las aportaciones logradas con este trabajo de investigación se encuentran que al incrementar el número de antenas del arreglo lineal uniforme, existe un aumento en la potencia de salida en arreglo lineal, logrando con esto una reducción de la interferencia y una mejora en el SIR. Además de encontrar que un arreglo lineal uniforme con 12 elementos, presenta una mayor reducción de interferencia. Otra de sus observaciones es que el caracterizar el espaciamiento entre elementos también contribuye a la reducción de interferencia y nos muestran que el rango de espaciamiento en el cual el arreglo muestra su mejor desempeño es el que se encuentra en los valores de espaciamiento de  $0.4\lambda > d < 0.5\lambda$ .

## 1.5 Objetivo General.

El objetivo de esta tesis es determinar la capacidad de los arreglos de antena, tanto lineal como circular, para rechazar la interferencia una estación base de un sistema celular CDMA. La finalidad es contar con un control de potencia mediante conformación de haz (beamforming), que permita disminuir o eliminar interferencia y con ello lograr aumentar la capacidad del sistema.

### 1.5.1 *Objetivos Específicos:*

- Analizar la capacidad de control de potencia mediante conformación del haz, utilizando un arreglo de antenas lineal en la estación base de un sistema celular CDMA.
- Analizar la capacidad de control de potencia mediante conformación del haz, utilizando un arreglo de antenas circular en la estación base de un sistema celular CDMA. Tomando en cuenta los parámetros de diseño tales como; número de elementos y espaciamiento entre elementos de antena.
- Realizar un análisis comparativo entre arreglos de antena Lineal y Circular, para determinar cual de los arreglos tiene un mejor control de potencia mediante conformación de haz, para reducir la interferencia. Para llevar a cabo el análisis y evaluación se considera el parámetro coeficiente de supresión de interferencia espacial.

## 1.6 Organización del trabajo.

En este capítulo se menciona el objetivo de estudio y la metodología empleada para resolver la problemática de interferencia de un sistema celular CDMA.

Esta tesis se encuentra organizada de la siguiente manera:

En el capítulo II, se describe a una antena inteligente mediante un concepto y un diagrama a bloques, además se consideran aspectos como características, ventajas y la forma de implementación.

En el capítulo III, se estudian los arreglos de antenas en base a sus características y geometrías. En este caso nos enfocaremos se da principal énfasis a los arreglos uniformes lineal y circular.

En el capítulo IV, se muestran los resultados de evaluación de la capacidad de rechazo de interferencia de los arreglos de antenas en una estación base de un sistema celular CDMA, considerando las geometrías lineal y circular estudiadas en el capítulo III.

En el capítulo V, encontrara las conclusiones finales de este trabajo de investigación, así como también la referencias de las publicaciones hechas sobre este temas y las posibles futuras líneas de investigación en este campo.

Donde las fuentes interferentes pueden ser otros móviles dentro de la misma célula, o cualquier sistema no celular que de forma inadvertida introduce energía dentro de la banda de frecuencia del sistema celular.

## Capítulo II Antenas Inteligentes

### 2.1 Antenas Inteligentes.

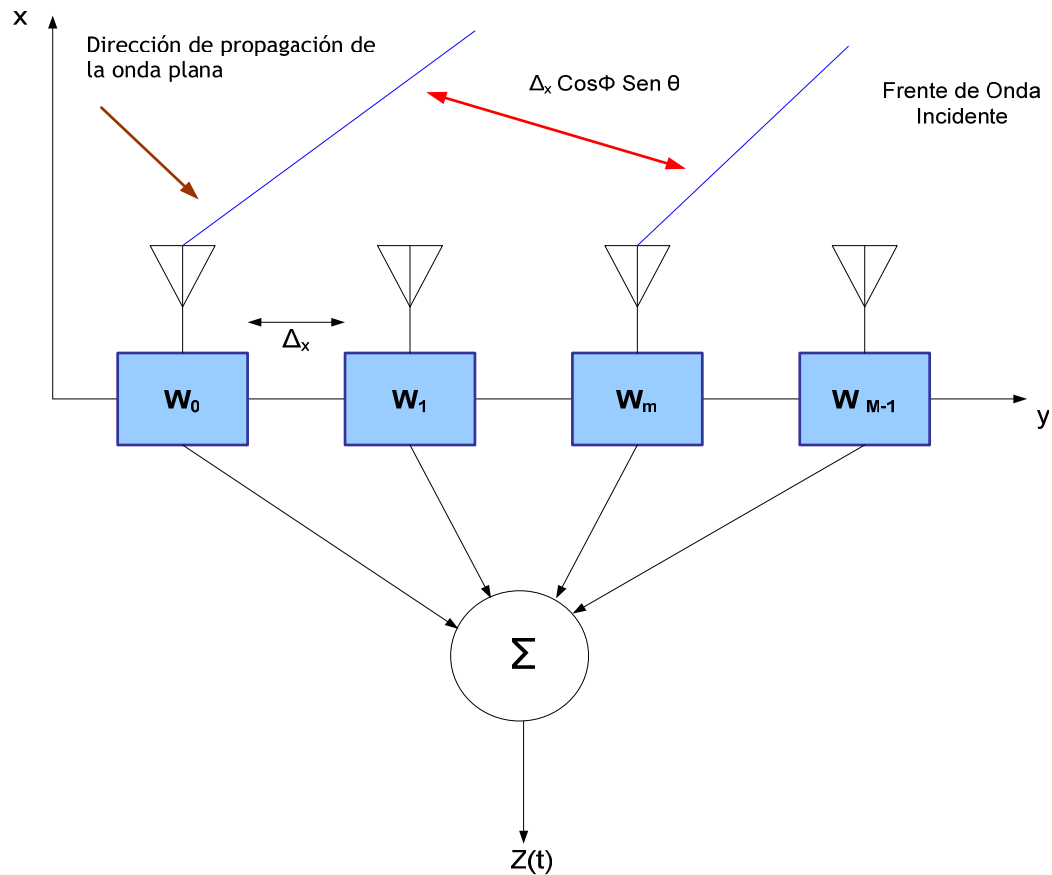
La teoría sobre las antenas inteligentes no es algo nuevo, son técnicas que datan desde la segunda guerra mundial (1939-1945) [6]. En la actualidad podemos encontrar diferentes definiciones para una antena inteligente, la mayoría de los autores la definen en base a sus características, aunque otros buscan diferenciarla de otros tipos de antenas. Esto se puede apreciar en las siguientes definiciones:

Una *antena inteligente* se define como un arreglo de antenas, con unidad de procesamiento de señal digital que puede cambiar dinámicamente su patrón de radiación para ajustarse al ruido, interferencia y al efecto multitrayectoria [4] [5].

Una *antena inteligente* es aquella que en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado. Además permite adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento [1].

Una *antena inteligente*, se considera como un sistema que combina múltiples elementos de antena con capacidad de procesamiento de la señal, para optimizar su patrón de radiación automáticamente en respuesta de una señal de su ambiente [2].

De acuerdo con las definiciones anteriores se puede determinar que una *antena inteligente*, es un conjunto de elementos de antenas del mismo tipo, denominado *arreglo*, donde cada elemento del arreglo de antena tiene un procesamiento de señal y patrón de radiación propio. Los cuales se unen para formar un solo diagrama de radiación que será el de la antena inteligente. Véase la Figura 2.1.



**Figura 2.1** Diagrama a bloques de una antena inteligente.

**Donde:**

$W_0..W_m, W_{M-1}$  : Unidades de procesamiento.

$\Delta_x$ .- Espaciamiento entre elementos.

$\Sigma$ .- Representa la sumatoria de todos los patrones de radiación.

$Z(t)$ .- Es la función del patrón de radiación resultante.

En la figura anterior se muestra que una antena inteligente que esta formada por un arreglo de antenas en forma lineal.

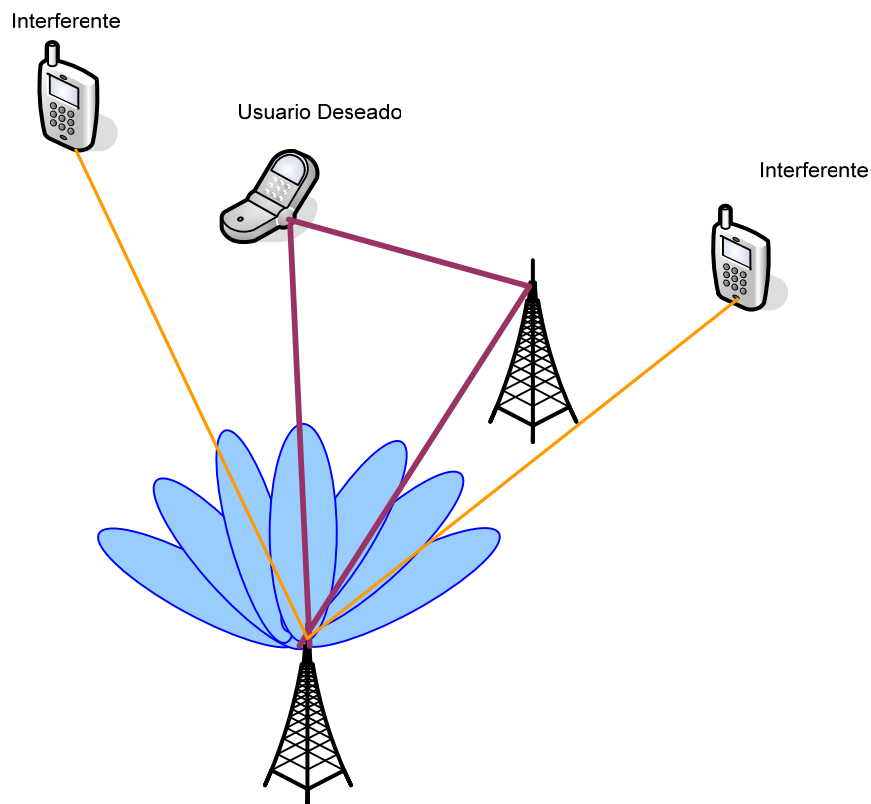
Hasta el momento no se ha establecido el porque se le llama inteligente, algunos autores comentan que una antena no es inteligente, pero un arreglo de antenas

si lo es [2]. En realidad la inteligencia de las antenas radica en su facilidad de procesar señales digitales [2].

### ***2.1.1 Tipos de Antena Inteligente***

#### **Haz conmutado:**

Esta técnica es la mas simple, aquí el sistema genera varios haces fijos, cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos se cubre todo una zona deseada. La inteligencia del sistema se encarga de seleccionar el haz que mejor servicio proporcione a cada usuario en particular, en función de algún parámetro de control. Véase Figura 2.2.



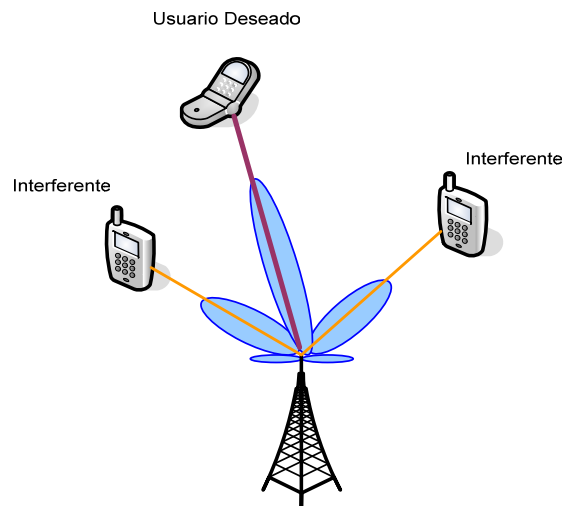
**Figura 2.2** Esquema de haz conmutado

Una observación de esta técnica es que no garantiza que el móvil se encuentra en la dirección de máxima radiación, es decir del haz que le da el servicio, ni que las señales interferentes se vean notablemente reducidas.

### **Haz de seguimiento:**

Es una técnica compleja, debido a que requiere del uso de un *arreglo progresivo*; es decir, un arreglo en el que se pueden controlar electrónicamente las fases con las que se alimentan los distintos elementos, de modo que puedan modificarse a voluntad la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antenna. A su vez es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la dirección de llegada (DoA), de modo que pueda reorientarse dinámicamente el haz para apuntar al usuario deseado.

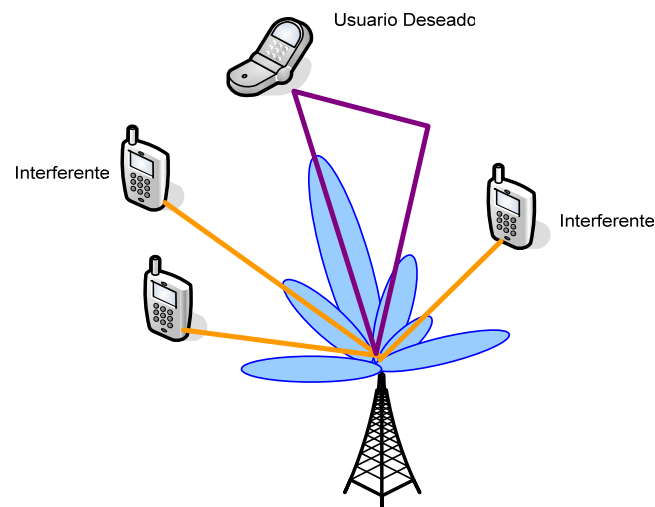
Con esta técnica se puede garantizar que el usuario se encuentra iluminado en todo momento por el lóbulo principal y con máxima ganancia. Sin embargo tampoco puede evitarse que las interferencias entren por algún lóbulo secundario del diagrama de radiación. Véase Fig. 2.3.



**Figura 2.3** Esquema de haz de seguimiento

## Haz Adaptivo

Este sería el máximo nivel de inteligencia con que se podría dotar al sistema. En este caso, la salida de cada elemento del arreglo se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo que se conforma el diagrama de radiación para minimizar algún parámetro de la señal. De este modo, el diagrama sintetizado presentaría un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado, los lóbulos secundarios en las direcciones de los componentes multirrayecto y mínimos de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia. Véase Fig. 2.4.



**Figura. 2.4** Esquema de Haz Adaptivo

## 2.2 Características de las antenas inteligentes.

A continuación se presentan las características más importantes que describen a una antena inteligente:

- **Ganancia de la señal.** Las entradas de los múltiples elementos de antenas son combinados para optimizar la potencia requerida para establecer un nivel de cobertura dado. Esta característica de las antenas permite mejorar el área y rango de cobertura.

- ***Rechazo de Interferencia.*** El patrón de la antena se puede generar hacia fuentes de interferencia co-canal, mejorando la razón de rechazo de interferencia de las señales recibidas. Esta característica permite incrementar la capacidad del sistema de comunicación móvil.
- ***Diversidad espacial.*** La información proporcionada del arreglo es usada para minimizar el desvanecimiento y otros efectos indeseables como la propagación multitrayectoria. Esta característica permite reducir la propagación multitrayecto.
- ***Ahorro de energía.*** La combinación de las múltiples entradas de los elementos permite optimizar la ganancia de procesamiento disponible en el enlace descendente. (Hacia el usuario). Esta característica permite reducir costos.

### 2.3 Ventajas de las antenas inteligentes

La característica de las antenas inteligentes de tener unos haces de radiación con mayor directividad, hace pensar en las siguientes ventajas potenciales:

- ***Incremento de la zona de cobertura.*** Dado que la ganancia es mayor que el caso de las antenas omnidireccionales o sectorizadas, para igual potencia transmitida, la señal se podría recibir a una mayor distancia. Este hecho podría permitir reducir el número de estaciones base necesaria para cubrir una zona, siempre y cuando no sea el tráfico el factor limitante.
- ***Reducción de la potencia transmitida.*** La mayor ganancia de la antena permitirá incrementar la sensibilidad de la estación base, por lo que los móviles podrán transmitir con menor potencia, ahorrando batería. De igual modo, gracias a la ganancia del arreglo, es posible que la estación base transmita igual potencia, pese a que cada elemento del arreglo esté radiando una potencia muy inferior.

Así, se relajarían las especificaciones sobre los amplificadores de potencia utilizados, que podrían resultar más baratos.

- ***Reducción de la propagación multitrayecto.*** Debido a la menor dispersión angular de la potencia radiada por la estación base, se reducirá el número de trayectos múltiples que alcanzarán al móvil (mejorando así las características de dispersión de retardo del canal). Esto permitirá relajar los requisitos exigidos al ecualizador de terminal móvil.
  
- ***Reducción del nivel de interferencia.*** La mejor selectividad espacial de la antena permitirá a la estación base discriminar las señales de los usuarios interferentes a favor de la señal del móvil deseado (en el caso de enlace ascendente) y también reducir el nivel de potencia transmitida en las direcciones de esos otros usuarios (en el caso del enlace descendente). De cualquier modo, se conseguiría aumentar la relación C/I (Portadora Interferencia), lo cual tiene dos consecuencias fundamentales:
  - Una mejora en la C/I implica directamente una mejora en la tasa de error (BER, Bit Error Rate), lo que hace que la calidad de servicio aumente.
  
  - La reducción de la C/I puede explotarse directamente (mediante técnicas de multiplexación espacial) o indirectamente (realizando un plan de frecuencias más ajustado).
  
- ***Mejora de la seguridad.*** Gracias a que la transmisión entre la estación base y el terminal móvil es direccional, no será posible que un equipo ajeno intercepte la comunicación, a menos que se sitúe en la misma dirección en la que apunta la antena.

- Además, sería posible una localización precisa de usuarios que estuvieran realizando un uso fraudulento de los servicios ofertados por la red.
- **Introducción a nuevos servicios.** Puesto que la red podría tener acceso a información acerca de la posición de los móviles, es posible pensar en servicios tales como radiolocalización en llamadas de emergencia, publicidad de servicios cercanos, información en lugares turísticos, gestión avanzada de flotas, etc.

## 2.4 Implementación de una antena inteligente.

Existen tres formas de implementar una antena inteligente, en función del grado de aprovechamiento de la selectividad espacial que ofrece:

**Receptor de alta sensibilidad (HSR):** Esta configuración consiste en utilizar antenas inteligentes solo en el enlace ascendente. De este modo, gracias a la mayor directividad de la antena, se consigue mejorar la sensibilidad global de la cadena de recepción de la estación base. Esto supone varias ventajas:

- En primer lugar, al mejorar la sensibilidad en el enlace ascendente, aumentara la extensión de la zona de cobertura. Esta mejora podría llegar a ser tan grande como para que fuera el enlace descendente, el más restrictivo a la hora de calcular la cobertura de la estación base.
- En segundo lugar, la mayor ganancia de la antena significa también que los móviles mas cercanos podían emitir con menor potencia manteniendo la calidad del enlace, con el consiguiente ahorro de baterías.
- Por ultimo, se lograría una mejora de la relación C/I, lo que implicaría menores tasas de error y una mejor calidad. No podría emplearse la mejora en la C/I para

incrementar la capacidad de un sistema CDMA, ya que dicha mejora esta presente en el enlace de subida y no en el enlace de bajada.

**Rechazo de Interferencia por filtrado espacial (SFIR):** En esta configuración se emplean antenas inteligentes tanto en el enlace ascendente como en el descendente, con el cual se consigue aprovechar la mejora por selectividad espacial en ambas direcciones.

**Acceso múltiple por división espacial (SDMA):** Esta seria la configuración más compleja, pues consiste en aprovechar al máximo las propiedades de selectividad espacial de las antenas de ambos enlaces para ubicar simultáneamente a varios usuarios en el mismo canal.

## 2.5 Conclusiones

En este capítulo se estudio a las antenas inteligentes, se trataron puntos como su definición (sección 2.1), donde una antena inteligente es definida como un conjunto de antenas al cual se le denomina arreglo, sus características (sección 2.2) donde se pueden mencionar como principales el ahorro de energía y rechazo de interferencia, y por ultimo ventajas e implementación (sección 2.2.1 y 2.3), donde las ventajas del uso de antenas en los sistemas celulares son el incremento del rango de cobertura, reducción de interferencia y ampliación de los servicios ofrecidos. Beneficios que son de gran interés para el desarrollo de este trabajo de investigación.

## Capítulo III Arreglos de Antenas.

### 3.1 Introducción

El concepto de agrupación o arreglo de antenas fue introducido por Sydney George Brown y James Erskinemurray en el año de 1889 [10].

La aplicación de los arreglos de antena en los sistemas de comunicaciones móviles es hoy en día, una de las herramientas de gran utilidad para resolver problemas de la interferencia y limitación en el ancho de banda del canal. Logrando con ello mejorar el funcionamiento y ampliar la gama de servicios de los sistemas de comunicación móvil.

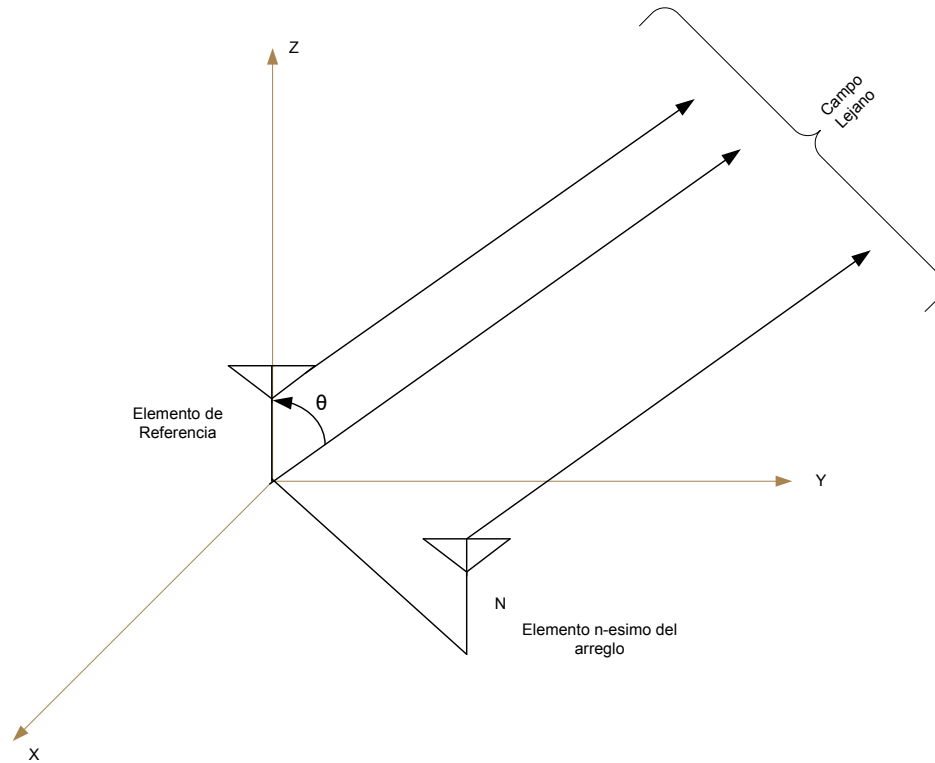
Actualmente, los arreglos de antenas se encuentran también en otras aplicaciones como radares, sistemas de guía para la navegación, radioastronomía y redes.

El principal atractivo de utilizar los arreglos de antena es debido a que estos proporcionan una alternativa para generar un patrón de radiación con las características deseadas, tales como la dirección del lóbulo principal, ancho de haz y ubicaciones de los nódulos [11].

### 3.2 Modelado de arreglos de Antenas.

Un arreglo de antenas se define como un conjunto de antenas simples, generalmente iguales, acomodadas en posiciones físicas determinadas y excitadas adecuadamente [11] [12] [13].

Los arreglos de antenas se clasifican en función de la ubicación de sus elementos y de las características de las señales de excitación [11]. En la figura 3.1 se muestra la geometría general de un arreglo de antenas.



**Figura 3.1** Geometría general de un arreglo de antenas

Donde:

$N$ : Es el elemento  $N$ -esimo del arreglo de antenas.

$X, Y, Z$ : Es el plano de referencia.

$\theta$ .-Es el ángulo de llegada.

El esquema anterior muestra la geometría general de un arreglo de antenas, donde se muestran los elementos principales:

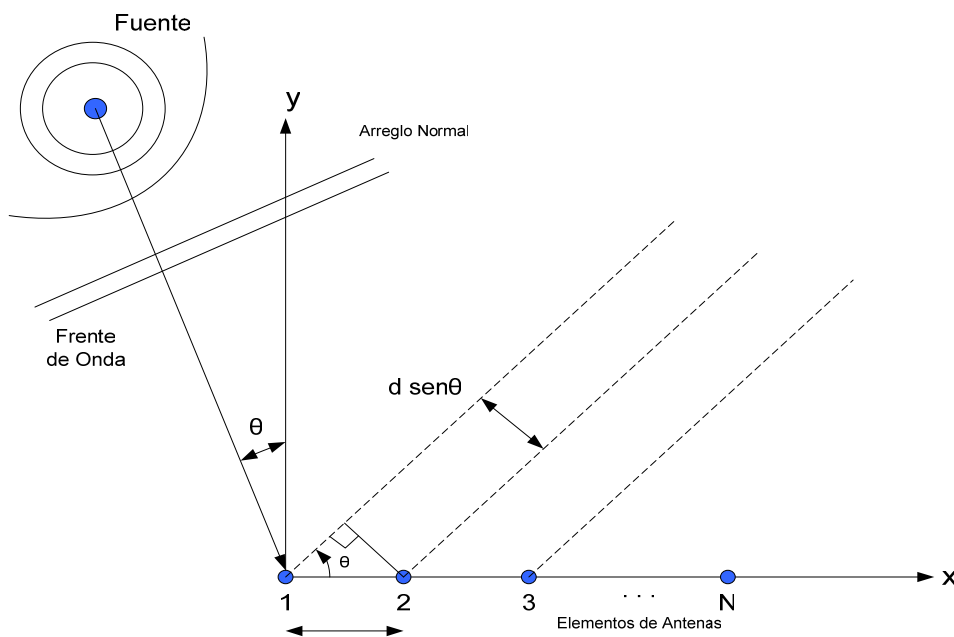
- 1) Observación desde un punto lejano.
- 2) Elemento de referencia localizado en el centro del sistema de coordenadas global.
- 3) Y la localización del elemento  $n$ -esimo.

### 3.2.1 Arreglo Lineal Uniforme, (ULA).

Un arreglo es Lineal, si esta constituido por un conjunto de antenas del mismo tipo, acomodadas en línea recta y donde cada uno de sus elementos es excitado adecuadamente a partir de una fuente [15]. Donde la separación entre sus elementos puede ser del tipo uniforme y no uniforme [11].

De acuerdo con las definiciones anteriores se puede definir al ULA, como un conjunto de antenas de mismo tipo uniformemente distribuidas a lo largo de una línea recta.

El arreglo lineal, es uno de los más utilizados en los sistemas de comunicaciones móviles debido a su simplicidad con respecto a otras geometrías [18]. Además de que este ofrece mayores ventajas que una antena común, debido a que el arreglo permite generar un patrón de radiación con características deseables y manipulables. En la figura 3.2 se muestra un arreglo lineal de antenas.



**Figura 3.2** Notación y definiciones empleadas en el arreglo lineal uniforme.

**donde:**

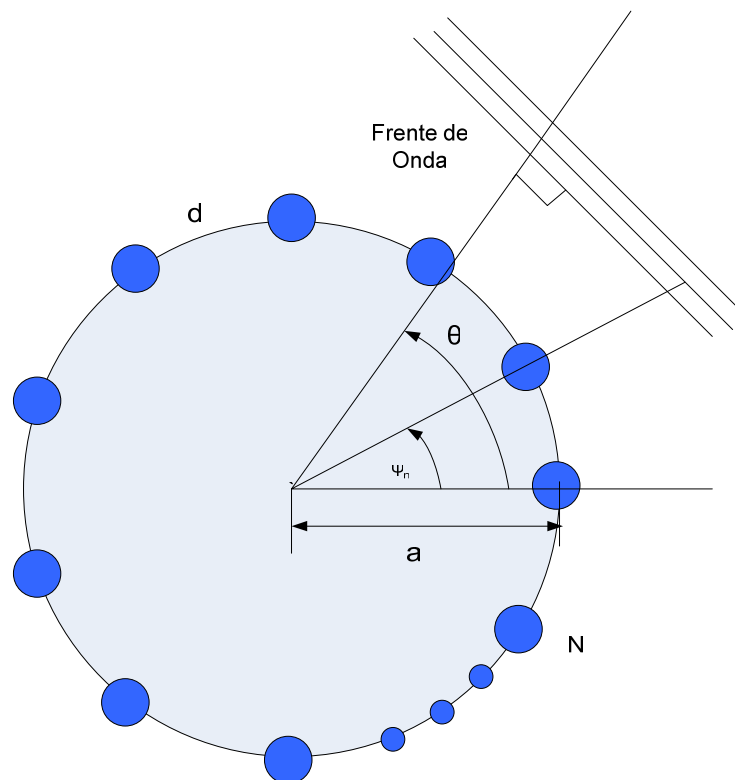
$d$ .- Espaciamiento entre elementos.

$N$ .- Elementos de antenas.

$\theta$ .- Angulo de incidencia del frente de onda plano.

### 3.2.2 Arreglo Circular Uniforme, (ULA).

Un arreglo circular uniforme es aquel que consiste de  $N$  elementos de antena espaciados en un círculo de radio  $a$  [18].



**Figura 3.3** Notación y definiciones empleadas para el arreglo circular uniforme.

Donde:

$d$ .- espaciamiento entre elementos.

$a$ .- radio del círculo en el plano  $xy$ .

$\theta$ .- ángulo de incidencia del frente de onda.

$N$ .- elementos de antena.

$\Psi_n$ .- posición angular de los elementos de antena.

### 3.3 Modelo de la señal

El modelo de la señal para investigar el desempeño de la capacidad de rechazo de interferencia de los arreglos de antenas se desarrolla considerando primero el caso del arreglo lineal uniforme ULA. Este modelo se extenderá posteriormente al caso del arreglo circular uniforme UCA.

#### 3.3.1 Señal recibida

Considerando un arreglo lineal de  $N$  elementos de antena localizado en el origen de un sistema de plano cartesiano y un espaciamiento  $d = \lambda/2$  a lo largo del eje  $x$ . El arreglo recibe  $K$  señales de banda estrecha de usuarios móviles, los cuales están aleatoriamente distribuidos en un plano  $xy$  (con dirección azimutal) en un campo lejano. En este caso el parámetro que caracteriza la localización de cada usuario es la dirección del ángulo de llegada (AOA)  $\theta$ , el cual se mide convencionalmente desde un lado del arreglo ( $\theta=0^\circ$  se refiere a un arreglo Broadside y  $\theta=90^\circ$  se refiere a un arreglo end-fire). Por simplicidad, el acoplamiento mutuo entre elementos se omite, por lo que los elementos que forman el arreglo son de tipo omnidireccional. Seleccionando el primer elemento como la fase de referencia, la señal recibida de la  $n$ -ésima antena puede ser expresada como:

$$x_n(t) = \sum_{k=1}^K S_k(t) e^{-jKd(n-1)\text{Sen}\theta_k} + \eta_n(t) \quad (3.1)$$

Donde  $K$  es el numero de onda  $= 2\pi/\lambda$ , y  $\lambda$  es la longitud de onda,  $d$  es el espaciamiento uniforme entre elementos,  $S_k(t)$  es igual a la señal transmitida de la  $k$ -ésima fuente medida desde el broadside del arreglo y  $\eta_n(t)$  es el ruido aditivo gaussiano (AWGN) de los elementos de antena con media  $\mu=0$  y varianza  $\sigma^2$ . Utilizando notación vectorial, la señal recibida puede ser expresada como:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K a(\theta_k) s_k(t) + \eta(t) = A(\theta) s(t) + \eta(t) \quad (3.2)$$

Donde  $x(t)$  es un vector de  $N \times 1$  de señales recibidas,  $s(t)$  es un vector de  $K \times 1$  de señales transmitidas,  $\eta(t)$  es un vector de  $N \times 1$  de ruido,  $a(\theta_k)$  es el vector de alineación de  $N \times 1$ , el cual modela la respuesta espacial del arreglo debido a un frente de onda plano que incide en la dirección  $\theta_k$ .

La matriz de correlación del arreglo asociada con el vector  $x(t)$  contiene información acerca de como las señales de cada uno de los elementos están correlacionadas con cada uno de ellos y se da como:

$$R_{xx} = E[x(t)x^H(t)] \quad (3.3)$$

donde  $E[.]$  denota esperanza o promedio estadístico y  $(.)^H$  denota transpuesta hermitiana.

Ahora bien, considerando a  $S_1(t)$  la señal del usuario deseado que llega de la dirección  $\theta_1$  y considerando el resto de las señales  $S_k(t)$ ,  $K=2,3,\dots,K$ , como interferencias que llegan de sus direcciones respectivas, se puede demostrar en base a los siguientes documentos que la potencia media de la salida del procesador

$$P(t) = E[|S_1(t)|^2] + \sum_{k=2}^K g_k(\theta_1, \theta_k) E[|S_k(t)|^2] + \frac{x^2}{N} \quad (3.4)$$

donde el promedio se toma sobre el tiempo y el ruido y las señales se asumen no correlacionadas. El primer término (del lado derecho de la ecuación anterior) es la potencia de la señal deseada, el segundo y tercer término representan la potencia del ruido e interferencia respectivamente.

### 3.4 Coeficiente de supresión de interferencia espacial

El coeficiente  $g_k(\theta_1, \theta_k) = \frac{1}{N^2} |a^H(\theta_1)a(\theta_k)|^2$  en la ecuación anterior es una medida de cuanta potencia no deseada se experimenta como interferencia en el sistema.

La cantidad de potencia de interferencia vista desde un interferente K en el ángulo de llegada  $\theta_k$  se puede expresar en forma mas general como un producto escalar del vector de pesos del conformador de haz y el vector de dirección del arreglo expresando una onda plana como:

$$g_k(\theta_1, \theta_k) = \left| \frac{W^H a(\theta_k)}{\|W^H\| \|a(\theta_k)\|} \right|^2 \quad (3.5)$$

Simplificando [ 3.5] se obtiene:

$$g_k(\theta_1, \theta_k) = \frac{1}{N^2} |a^H(\theta_1)a(\theta_k)|^2 \quad (3.6)$$

$$= \frac{1}{N^2} \frac{\left| \text{sen}\left(\frac{\pi N}{2} (\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta_k)\right) \right|^2}{\left| \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} (\text{sen}\theta_1 - \text{sen}\theta_k)\right) \right|^2} \quad (3.7)$$

Asumiendo que los interferentes se encuentran distribuidos uniformemente en el rango  $[-\pi/2, \pi/2]$ , el valor medio de  $g_k(\theta_1, \theta_k)$  se da como:

$$G_{avg}(\theta_1) = E[g_k(\theta_1, \theta_k)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} g_k(\theta_1, \theta_k) d\theta_k \quad (3.8)$$

Donde  $G_{avg}(\theta_1)$  es el coeficiente de supresión de interferencia espacial [1].

### 3.4.1 Arreglo circular

Para un arreglo circular, se asumen interferentes distribuidos uniformemente en el rango de  $[-\pi/2, \pi/2]$ ,  $G_{avg}(\theta_1)$  se da como:

$$G_{avg}(\theta_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g_k(\theta_1, \theta_k) d\theta_k \quad (3.9)$$

donde  $g_k(\theta_1, \theta_k)$  se da como [3.9]

$$g_k(\theta_1, \theta_k) = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N \exp\{jNd[\cos(\theta_k, \psi_n) - \cos(\theta_1 - \psi_n)]\} \right|^2 \quad (3.10)$$

Donde  $\psi_n$  se definió en la sección 3.2.2

La capacidad de reducción de interferencia del arreglo lineal y circular se puede determinar evaluando las ecuaciones 3.9 y 3.10 respectivamente.

## 3.5 Conclusiones

Los arreglos de antena se caracterizan por ser un conjunto de antenas, del mismo tipo, agrupados de manera geométrica. Que ofrecen gran cantidad de ventajas sobre las antenas omnidireccionales.

Uno de los atractivos principales es que permiten generar haz de radiación deseado, por eso son ideales para lograr la reducción de interferencia y ayudar con las limitaciones de ancho de banda del canal.

En la actualidad uno de los arreglos más utilizados en las comunicaciones móviles es el arreglo lineal, debido a su fácil implementación.

## Capítulo IV Evaluación de la capacidad de rechazo de interferencia de agrupaciones lineales y circulares.

### 4.1 Introducción

Para evaluar la capacidad de los arreglos de antena en la estación base de un sistema celular CDMA, y determinar cual de los arreglos analizados en esta tesis, es el que presenta una mayor capacidad para la reducción de interferencia. En este caso los parámetros de diseño se refieren al número de elementos (parámetro  $N$ ) y espaciamiento entre antenas (parámetro  $d$ ).

Es importante mencionar que durante la evaluación de los arreglos, se realizaron las siguientes consideraciones:

- Las antenas que integran el arreglo son del tipo omnidireccional, o elementos isotropicos.
- No se considera el acoplamiento mutuo entre elementos de antenas.
- Las expresiones para obtener el coeficiente de supresión de interferencia espacial de los arreglos lineales y circulares se definen en el capítulo anterior. Estas expresiones se emplearan para generar el comportamiento de la capacidad de reducción de interferencia de los arreglos lineales y circulares con separación uniforme.
- Para determinar el promedio del mejoramiento del SIR ( $\Delta$ ) del arreglo de salida se podría utilizar la siguiente ecuación:

$$\Delta = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{G_{avg}(\Psi_1)} \right) = -10 \log_{10}(G_{avg}(\Psi_1)) \quad (4.1)$$

Las unidades resultantes serian en dB, donde el  $G_{av}$  es el coeficiente de supresión de interferencia espacial definido en el capitulo anterior.

## 4.2 Analisis de resultados del arreglo lineal.

La evaluación del arreglo lineal se llevo acabo en 2 etapas. La primera de ellas consistió en la variación del parámetro  $N$ . Donde se considero como valor mínimo de  $N$ , 2 elementos y un valor máximo de  $N$ , 24 elementos.

Es importante mencionar que el espaciamiento entre las antenas del arreglo fue constante con un valor de  $d=0.5\lambda$  y la dirección de llegada entre  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

En la figura 4.1, se puede observar el comportamiento del coeficiente de supresión de interferencia espacial para diferentes valores del parámetro  $N$ .

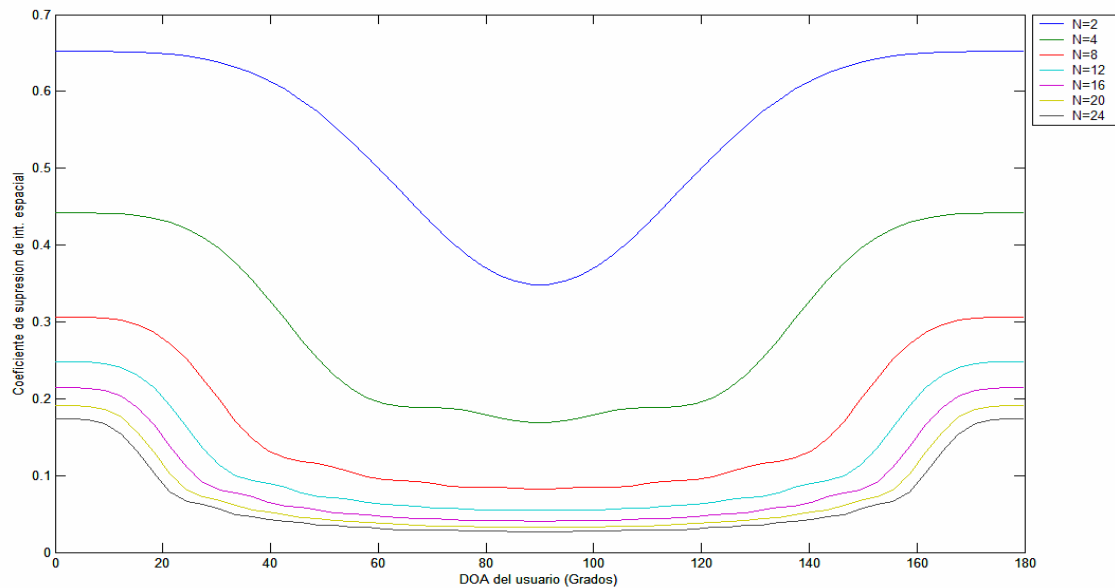


Fig. 4.1 Gráfica de variación del coeficiente de supresión de interferencia espacial con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado  $\theta_1$  para diferente numero de elementos de antena  $N$  con espaciamiento  $d=0.5\lambda$ .

En la figura anterior se puede observar la respuesta del coeficiente al utilizar un arreglo lineal. Al incrementar el número de elementos de antena que integran el arreglo el coeficiente tiende a mejorar, es decir, se tiene una mayor reducción de interferencia en el sistema. Sin embargo, cuando el número de elementos es mayor a 12, el mejoramiento del coeficiente no es tan significativo como en valores menores.

En la siguiente tabla se puede observar el comportamiento del coeficiente de reducción de interferencia considerando las ganancias del arreglo de salida para diferentes valores de  $N$ :

**Tabla 4.1** Ganancias de salida en dB para diferentes valores de  $N$ .

Número de Elementos	$\Delta$ (dB)	$\Psi_1$
2	4.5791	90°
4	7.7296	90°
8	10.7174	90°
12	12.5948	90°
16	13.9066	90°
20	14.1587	90°
24	15.7106	90°

En la tabla anterior se puede observar el comportamiento del arreglo en base a sus ganancias, si el número de antenas es mayor, entonces se tiene mayor ganancia. Es importante mencionar que se considera solo valores de la DOA cercanos o iguales a 90°, para valores menores y mayores de 90°, este valor decrece.

La siguiente etapa de la evaluación consistió en caracterizar el parámetro del espaciamiento “ $d$ ” entre elementos del arreglo.

Es importante mencionar que se utilizó un arreglo de 12 elementos de antenas y una DOA de 0° a 180°.

Los rangos en los cuales se evaluó el parámetro  $d$  fueron:

$d= 0.1\lambda$  a  $0.5\lambda$ ,  $d=0.5\lambda$  a  $1\lambda$  y  $d= 0\lambda$  a  $2\lambda$ .

En las siguientes graficas se pueden observar los resultados obtenidos al caracterizar el espaciamiento entre los elementos del arreglo lineal.

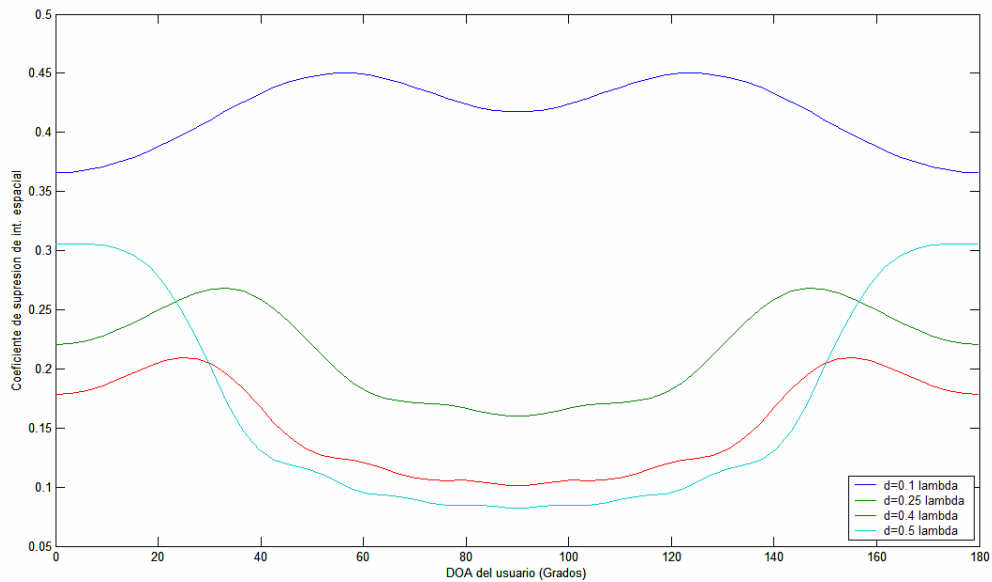
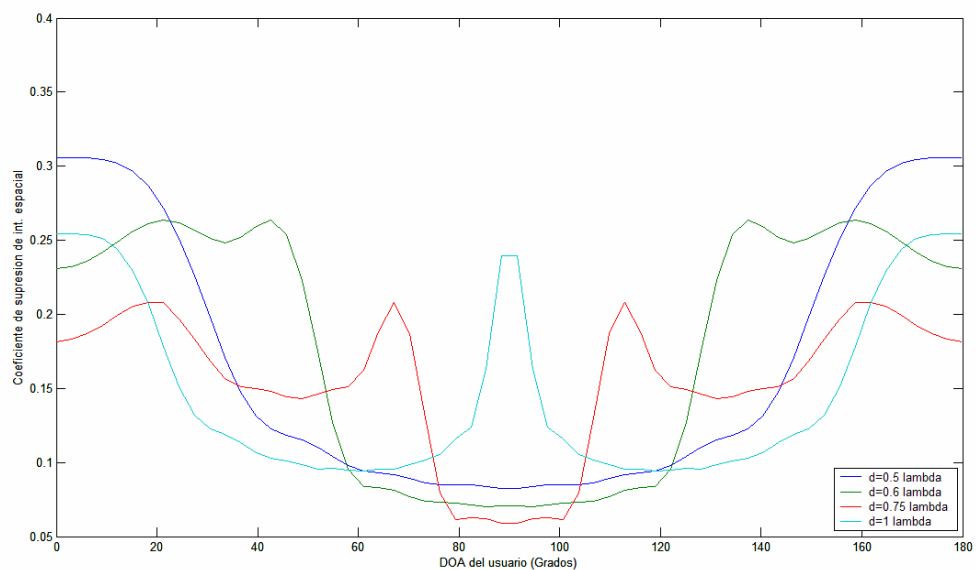
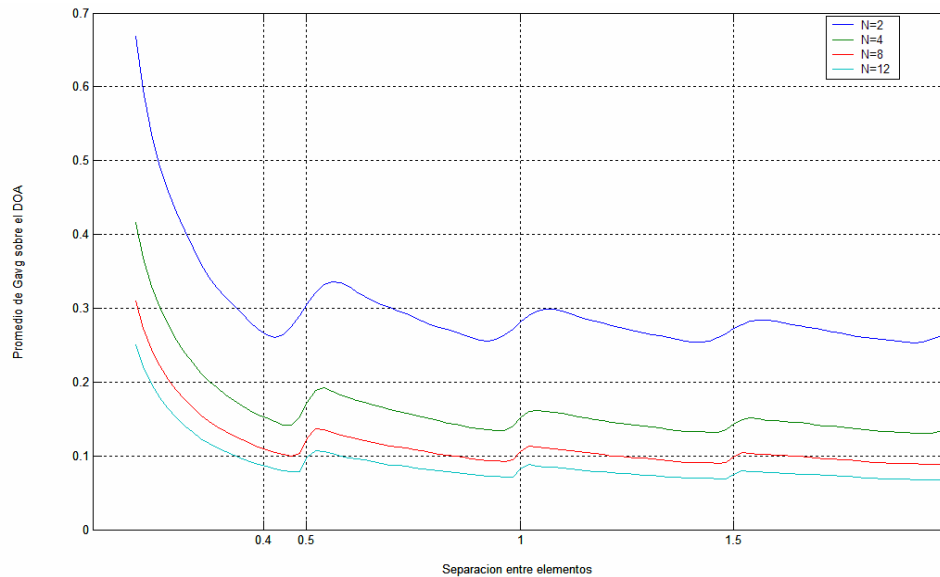


Figura 4.2 inciso a) se puede observar que para espaciamientos menores de  $0.4\lambda$  la variación del coeficiente no es significativa, pero para valores mayores de  $0.4\lambda$ , el comportamiento del coeficiente muestra valores pequeños.



En la figura 4.2 inciso b) se puede observar que para  $d=0.5\lambda$ , el coeficiente presenta un buen comportamiento, pero mientras  $d$  es cercano o mayor a  $0.6\lambda$  el valor del coeficiente es muy variable.



En la figura 4.2 inciso c) se muestra la grafica del promedio total del coeficiente de supresión de interferencia espacial  $G_{avg}(\theta_1)$  sobre  $\theta_1$  versus el espaciamiento entre elementos y diferente numero de elementos de antena. En esta figura se puede apreciar que el valor óptimo para  $d$  es entre  $0.4\lambda$  y  $0.5\lambda$  y este valor depende del número de elementos de antena.

Fig. 4.2 Graficas de la variación del coeficiente de supresión de interferencia espacial  $G_{avg}(\theta_1)$  con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado  $\theta_1$  para diferentes valores de espaciamiento  $d$ : a)  $0.1\lambda$  a  $0.5\lambda$ , b)  $0.5\lambda$  a  $1\lambda$ , y c)  $0\lambda$  a  $2\lambda$ .

En la siguiente sección se presenta el analisis de los resultados para el arreglo circular.

### 4.3 Analisis de resultados del arreglo circular

El analisis del arreglo circular se llevo acabo en 2 etapas. La primera consistió en la variación del parámetro  $N$  del arreglo. Donde los valores asignados a  $N$  fueron un valor mínimo de 2 elementos y un valor máximo de 24.

Es importante mencionar que se considero un espaciamiento fijo entre antenas de  $0.5\lambda$ . La dirección de llegada de las señales se estableció de  $0$  a  $2\pi$ .

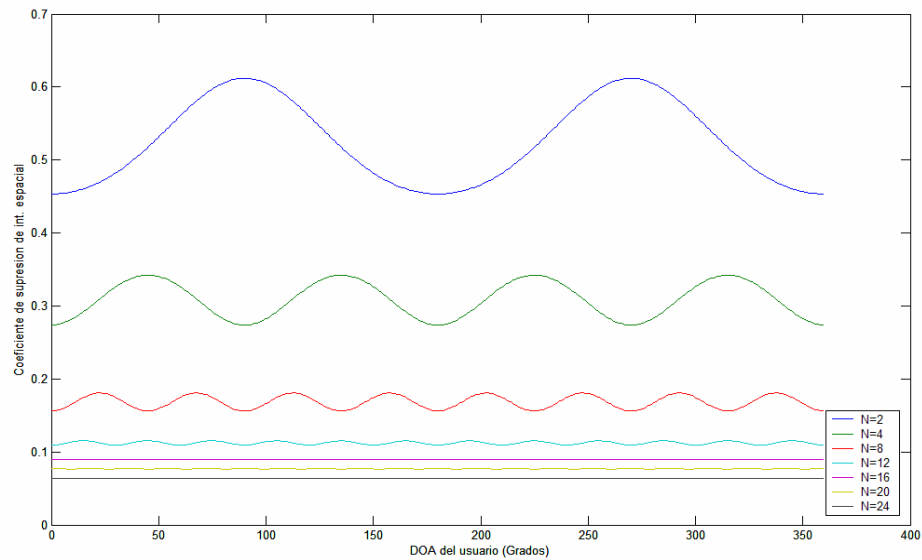


Figura 4.3 Grafica de variación del coeficiente de supresión espacial con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado  $\theta_1$  para diferente número de elementos de antena  $N$  con espaciamiento  $d=0.5\lambda$ .

En la figura 4.3, se puede apreciar que si el número de elementos que integran el arreglo circular aumenta tenemos una mejora en el coeficiente, es decir una mayor capacidad de reducción de interferencia. Se puede observar que el comportamiento del coeficiente es oscilatorio, pero si el número de elementos que integra el arreglo es mayor a 12, el valor del coeficiente es uniforme para todos los ángulos.

En la siguiente tabla se muestra el comportamiento de las ganancias del arreglo de salida para diferentes valores de  $N$ .

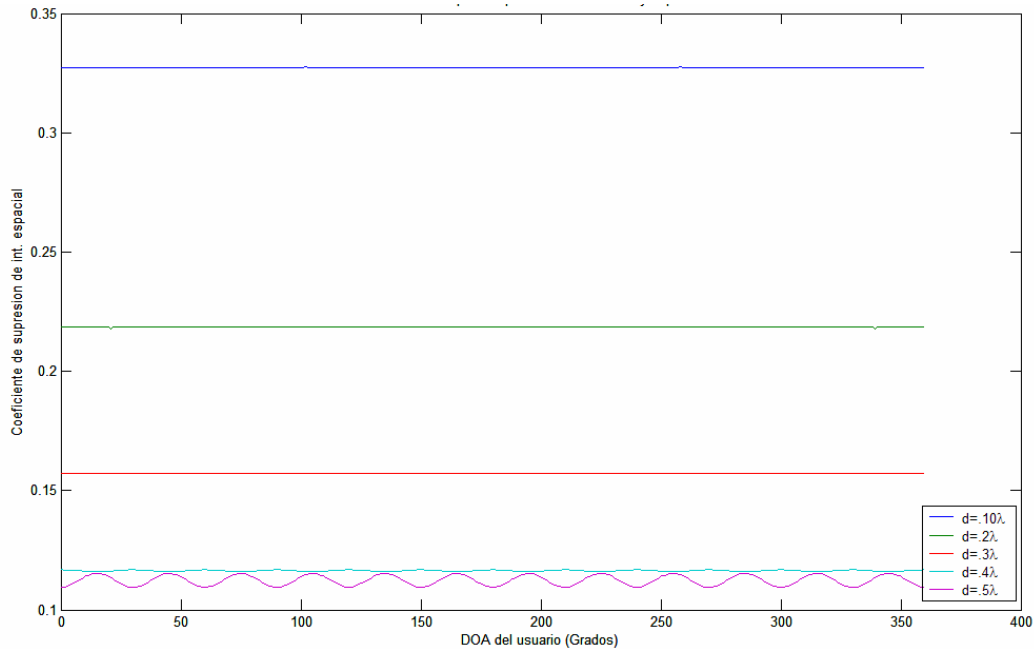
**Tabla 4.2** Ganancias de salida del arreglo en  $dB$  para diferentes valores de  $N$ .

Numero de Elementos	$\Delta$ (dB)	$\Psi_1$
2	3.4183	$0^\circ - 360^\circ$
4	5.6268	$0^\circ - 360^\circ$
8	8.0665	$0^\circ - 360^\circ$
12	9.6090	$0^\circ - 360^\circ$
16	10.4486	$0^\circ - 360^\circ$
20	11.1145	$0^\circ - 360^\circ$
24	11.9292	$0^\circ - 360^\circ$

La segunda etapa de la evaluación consistió en caracterizar el parámetro  $d$ , considerando los siguientes valores:

$$d = 0.1 \lambda \text{ a } 0.5 \lambda, \quad d = 0.5 \lambda \text{ a } 1 \lambda \text{ y } d = 0 \lambda \text{ a } 2 \lambda$$

Se considero un valor constante para  $N=12$  y una DOA de  $0$  a  $2\pi$ .



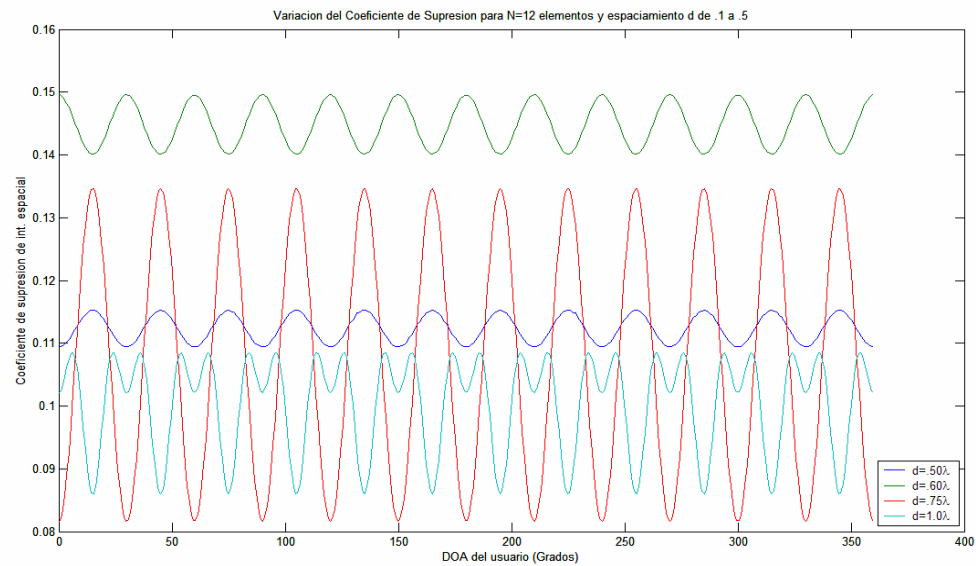
En el inciso a) de la figura 4.4 se muestra que incrementar el espaciamiento entre elementos se logra mejorar el coeficiente de supresión de interferencia. De acuerdo a los parámetros de  $d$ , los mejores resultados se encuentran para  $d = 0.4 \lambda$  y  $0.5 \lambda$ .

Esto también se puede apreciar si se consideran las ganancias de salida del arreglo, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

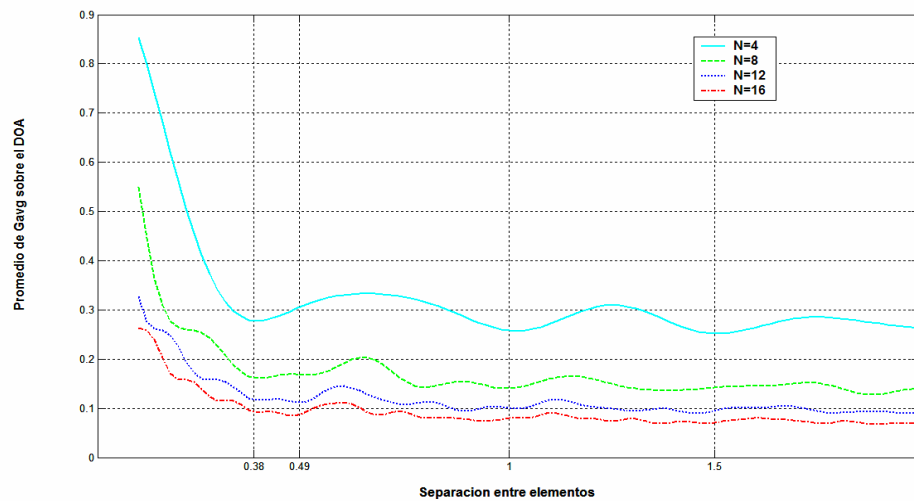
**Tabla 4.3.-** Ganancia de salida del arreglo en dB para diferentes valores de  $d$ .

Espaciamiento $d$	Ganancia en dB $\Delta$	$\theta$ (DOA)
$0.1 \lambda$	4.8 dB	$90^\circ$
$0.25 \lambda$	7.9 dB	$90^\circ$
$0.4 \lambda$	9.3 dB	$90^\circ$
$0.5 \lambda$	9.6 db	$90^\circ$

En la tabla anterior se puede observar como al incrementar el espaciamiento mejora la ganancia.



En el inciso b) de la figura 4.4 se muestra que, al incrementar el espaciamiento se pueden obtener mejores valores para el coeficiente pero no para todos los ángulos, se puede observar que el comportamiento del coeficiente es oscilatorio para cualquier valor superior a  $d=0.5 \lambda$



En el inciso c) de la figura 4.4, se muestra la grafica del promedio total del coeficiente de supresión de interferencia espacial  $G_{avg}(\theta_1)$  sobre  $\theta_1$  versus el espaciamiento entre elementos y diferente numero de elementos. En esta figura se puede apreciar que el valor óptimo para d es entre  $0.38\lambda$  y  $0.49\lambda$  y este valor depende del número de elementos de antena.

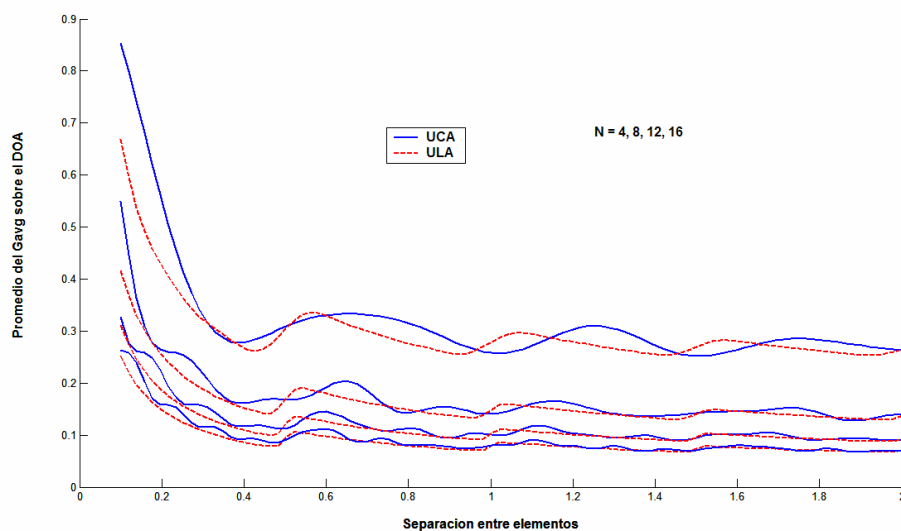
Figura 4.4 Grafica de variación del coeficiente de supresión espacial con dirección de arribo (DOA) del usuario deseado  $\theta_1$  para diferente numero de elementos de antena  $N=12$  con espaciamiento d, a)  $0.1\lambda$  a  $0.5\lambda$ ., b)  $0.5\lambda$  a  $1\lambda$  y c)  $0\lambda$  a  $2\lambda$ .

#### 4.4 Analisis comparativo entre la geometría lineal y circular

En las secciones 4.2 y 4.3 de este capítulo se ha realizado el análisis de las geometrías lineales y circulares, y se obtuvieron los siguientes resultados.

Si el número de elementos que integran el arreglo, no importando su geometría, se incrementa se obtiene como resultado una reducción de interferencia en el sistema. En los resultados en base a las ganancias de salida, se puede observar que para un valor de  $N=12$ , el arreglo lineal tiene una mejor respuesta, pero es solo para  $\theta_1$ . Sin embargo, es un poco menor la ganancia en el arreglo circular para todos los ángulos.

Si se varía el espaciamiento entre los elementos del arreglo, de igual forma se obtiene una reducción de interferencia, y el rango de espaciamiento donde presenta esta mejora es muy similar, es decir, en el caso del arreglo lineal sería en el rango de  $0.4\lambda$  a  $0.5\lambda$  y en el caso del arreglo circular de  $0.38\lambda$  a  $0.49\lambda$ . Esto se puede apreciar en la siguiente figura.



**Figura 4.5.-** Comparación del promedio total del coeficiente de supresión de interferencia espacial sobre el DOA en función de su espaciamiento  $d$ , entre el arreglo lineal (líneas punteadas rojas) y el arreglo circular (líneas continuas azul).

A partir de la figura anterior se puede concluir que una de las diferencias entre el arreglo lineal y el arreglo circular, es que el arreglo circular ofrece una mayor ventaja en el área de cobertura ya que este proporciona una área de cobertura de  $360^\circ$ , mientras que un arreglo lineal solo de  $120^\circ$ , por lo que en términos prácticos para obtener esta área de cobertura, en el caso del arreglo lineal, se necesitarían 3 o mas arreglos lineales. Lo que sería algo costoso en la implementación del sistema.

#### 4.5 Conclusiones

En algunas de las secciones de este capítulo se ha podido demostrar que el uso de arreglos de antena en una estación base de un sistema celular CDMA, es una buena opción para reducir la interferencia y mejorar el desempeño del sistema y aumentar su capacidad.

Además, se ha podido concluir que la capacidad de un arreglo para reducir la interferencia, depende directamente del número de elementos que integran el arreglo, el espaciamiento entre sus elementos y sobre todo, de la geometría que se utilice. Como se trató en la sección 4.4 de este capítulo se puede concluir que una geometría del tipo circular presenta una mayor capacidad para reducir interferencia, que una del tipo lineal.

## Capítulo V Conclusiones y Trabajo Futuro

### 5.1 Conclusiones

Al terminar esta tesis se puede concluir que el utilizar arreglos de antena en la estación base de un sistema celular CDMA, nos permite reducir la interferencia y aumentar la capacidad.

Es importante mencionar que la capacidad de reducción de interferencia a través de arreglos de antena, depende de varios factores:

- 1) En ambos arreglos de antena se puede apreciar que la mayor reducción de interferencia se presenta, cuando  $N$  (número de elementos de antena) se incrementa. Se observa que cuando  $N$  es igual a 12, se obtienen los mejores resultados. Pero si  $N$  es mayor a 12, la reducción de interferencia es mínima.
- 2) El espaciamiento entre los elementos de antena que integran el arreglo, determinan la mejora del factor SIR.

En el caso del arreglo lineal uniforme se observa que el rango de espaciamiento dado por  $0.4\lambda < d < \lambda 0.5$ . Y para el caso del arreglo circular el rango de espaciamiento esta dado por  $0.38\lambda < d < 0.49\lambda$ .

- 3) La reducción de interferencia se encuentra íntimamente relacionada con la geometría del arreglos utilizado en la estación base del sistema celular.

Esto lo podemos apreciar debido a que el arreglo circular permite tener una mayor cobertura que un arreglo lineal. Un arreglo lineal solo ofrece una cobertura de 120 grados, mientras que un arreglo circular nos permite una cobertura de 360 grados. Lo que trae como consecuencia una reducción de costos.

## 5.2 Publicaciones como resultado de este trabajo de investigación.

Algunos resultados de este trabajo de tesis fueron publicados en el siguiente artículo:

- Marco A. Panduro, Angel G. Andrade and Juan P. Garcia, **“Evaluation of the Interference Rejection Capability of a Uniform Circular Array in CDMA Systems”**, Congreso de la IEEE Pomona, CA, 6, April, 28 a 30, 2005.

## 5.3 Trabajo futuro.

Existen diferentes temas que podrían ser considerados como futuras líneas de investigación dentro del área de arreglos de antenas como:

- Analizar y evaluar la capacidad de rechazo de interferencia utilizando una geometría circular uniforme, considerando el acoplamiento mutuo entre los elementos del arreglo y las pérdidas multitrayectoria.
- Analizar y evaluar la capacidad de rechazo de interferencia mediante el uso de arreglos híbridos.
- Analizar y evaluar la capacidad de rechazo de interferencia, mediante la simulación de algoritmos de conformación de haz en entornos UTMS simulados. Una vertiente interesante podría ser el método de algoritmos genéticos.
- Analizar la capacidad de rechazo de interferencia considerando que el arreglo de antenas se encuentre en el móvil y en la estación base lo que implica tomar en cuenta parámetros tales como la velocidad del móvil, efecto doppler y desvanecimientos por múltiples trayectorias y sombreado.

## Bibliografía

- [1]. Óscar Moreno Jiménez, Ignacio Javier Franco Martín, “*Introducción a la Tecnología de antenas inteligentes. Aplicación a UTMS.*”, Comunicaciones de Telefónica I+D, Número 21, Junio del 2001, Pág. (44,45).
- [2]. “*Smart Antenna Systems*”, Web ProForum Tutorials, International Engineering Consortium, pagina 1.
- [3]. Steve Ellingson, “*Smart Antenna Technologies*”, IEEE Workshop on New & Emerging Technologies, Rutgers University, January 18 2001, pag.
- [4]. Dr. Sergey Loyka , “*Smart Antennas*”, September 7 2004.
- [5]. Salman Durrani, “*Investigations into smart antenna for CDMA Wireless Systems*”(Thesis), University of Queensland, Brisbane Australia, August 2004.
- [6]. Per H. Lehne and Magne Pettersen, Telenor Research and development, “*An overview of Smart Antenna Tecnology for Mobile Communications Systems*”
- [7]. Ivica Stevanovic, Anja Skrivervik and Juan R. Mosig, “*Smart Antenna Systems for Mobile Communications*”, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne Suisse, January 2003.
- [8]. Arild Jacobsen, “*Smart Antennas for Dummies*”, ISBN 82-423-0388-6, October 10 2001, 27 Pags, Telenor.
- [9]. “*Agrupaciones de Antenas*”, Capitulo 5, UPC, 2002.
- [10]. “*Sistemas de telecomunicación*”, Tema 1 historia de las telecomunicaciones.
- [11]. J.L. Ramos, M.J. Martínez, Ma. Susana Ruiz, G. A. Vega, “*Software para el calculo de patrones de radiación de arreglos lineales de antenas*”, Universidad de Guadalajara, C.U.C.E.I Posgrado del Departamento de Electrónica.
- [12]. Profesor David Jenn, “*Arrays, Antennas in Systems and Active Antennas*”, Lecture Notes Volumen III, Naval Postgraduate School, Distance Learning.
- [13]. Profesor Manuel Sierra Pérez, “*Agrupaciones de Antenas*”, Tema I, Universidad de Valencia España.

- [14]. LAL C. GODARA, “*Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and Systems considerations*”, University of New South Wales, Australian Defense Force Academy, Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 7, July 1997.
- [15]. J.L. Ramos, M.J. Martínez, Ma. Susana Ruiz, G. A. Vega, “*Análisis de arreglos lineales de antenas apoyados por computadora y cálculo numérico de la impedancia propia y mutua entre dipolos basada en el método de momentos*”, Universidad de Guadalajara, C.U.C.E.I Posgrado del Departamento de Electrónica.
- [16]. H. Campanella, A. Comas, Y. Alba, “*Antenas Inteligentes con Aplicaciones en SDMA*”, Grupo de Telecomunicaciones y Señales, Universidad del Norte Barranquilla, Colombia.
- [17]. Marco A. Panduro, Angel G. Andrade y Juan P. Garcia, “*Evaluation of the Interference Rejection Capability of a Uniform Circular Array in CDMA Systems*”, Universidad Autónoma de Baja California y Universidad Autónoma de Tamaulipas, 2005.
- [18]. Salman Durrani and Marek E. Bialkowski, “*An investigation into the interference rejection capability of a linear array in a wireless communications system*”, school of information Technology and Electrical Engineering, University of Queensland, Brisbane, QLD, 4072, Australia, December 20 2002.
- [19]. Rafael Casanas Avila, “*Estudio y Simulación con MatLab de la Interfaz de radio GSM*”, Universidad de Granada.
- [20]. Ivan Bernal Ph. D, “*Comunicaciones inalámbricas CDMA (IS-95)*”, Escuela politécnica Nacional, Quito Ecuador, 2006.
- [21]. Ram Sing , “*CDMA: The Spread Spectrum Technology*”, EEDparment, II Bombay.
- [22]. Salman Durrani and Marek E. Bialkowski, School of info., The University of Queensland , Brisbane, Australia, Proceedings of ISAP’04, Sendai, JAPAN.
- [23]. Soren Anderson, Bengt Carlqvist, Bo Hagerman y Robert Lagerholm, “*Más capacidad con antenas adaptivas en las redes celulares*”,
- [24]. Dr. D. J. Shyy, “*Performance evaluation of 3G CDMA Networks with antenna arrays*”

- [25]. Ayman F. Naguib, student member, IEEE, Arogyaswami Paulraj, Fellow, IEEE and Thomas Kailath, "Capacity Improvement with Base Station Antenna Arrays in Cellular CDMA",