

TESIS DEFENDIDA POR

**Juan Pedro Valenzuela Godoy**

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

*Director del Comité*

---

Dr. Salvador Villarreal Reyes

*Miembro del Comité*

---

M.C. Enrique Pacheco Cabrera

*Miembro del Comité*

---

Dr. Hugo Homero Hidalgo Silva

*Miembro del Comité*

---

Dr. Roberto Conte Galván

*Coordinador del programa de  
posgrado en Electrónica y telecomunicaciones*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

*Director de Estudios de Posgrado*

17 de Septiembre de 2010

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE  
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

---

**COMPROMISO ENTRE PROFUNDIDAD DE NULOS Y REDUCCIÓN  
DE POTENCIA EN EL ENLACE DESCENDENTE EN UNA  
AGRUPACIÓN ADAPTATIVA DE ANTENAS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

**JUAN PEDRO VALENZUELA GODOY**

Ensenada, Baja California, México, Septiembre 2010.

**RESUMEN** de la tesis de **JUAN PEDRO VALENZUELA GODOY**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES con orientación en TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California, Septiembre 2010.

**COMPROMISO ENTRE PROFUNDIDAD DE NULOS Y REDUCCIÓN DE POTENCIA EN EL ENLACE DESCENDENTE EN UNA AGRUPACIÓN ADAPTATIVA DE ANTENAS**

Resumen aprobado por:

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Tesis

La creciente demanda de servicios en las comunicaciones móviles celulares, y los problemas ligados a ella han llevado a la utilización de las antenas inteligentes o agrupaciones de antena, pues la reducción en el área en que se transmiten las señales ayuda para reducir el ruido, la interferencia y las pérdidas por multitrayectorias. Aún con estos beneficios, se hace necesario el uso de algoritmos de conformación digital de haz con el objetivo de tener dirigibilidad, tanto del haz principal como de los nulos del diagrama de radiación.

Dentro de los conformadores digitales de haz adaptativos se seleccionó el algoritmo Zero-Forcing, ya que es un algoritmo de baja carga computacional, el cual plantea una minimización de potencia de salida, brindando la capacidad de apuntar el haz principal hacia la posición espacial del usuario de interés y de ubicar los nulos hacia donde se encuentren los usuarios interferentes. Sin embargo, la cercanía entre usuarios provoca que la potencia de salida de la agrupación de antenas aumente.

Para dar solución al problema de potencia, se utiliza un novedoso método con el cual se puede reducir el incremento de potencia que existe dada la cercanía de los usuarios interferentes con el usuario de interés, generando un compromiso entre la profundidad de nulos con la potencia de salida de la agrupación de antenas.

El incremento de usuarios en las celdas de los sistemas de comunicaciones móviles celulares, lleva a la necesidad de atender a diferentes usuarios a la vez. Por lo tanto, con el fin de prestar el servicio a distintos usuarios, se trabaja con una red de conformación digital de haz. Utilizando el algoritmo Zero-Forcing, dicha red de conformación digital de haz puede generar múltiples diagramas de radiación simultáneamente, obteniendo así la capacidad de dar atención a más de un usuario de interés al mismo tiempo.

**Palabras Clave:** Conformador digital de haz Zero-Forcing, modificación de profundidad de nulos, red de conformación digital de haz Zero-Forcing

**ABSTRACT** of the thesis presented by **JUAN PEDRO VALENZUELA GODOY**, in partial fulfillment of the requirements of the degree of **MASTER OF SCIENCES** in **ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS** with orientation in **TELECOMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California, September 2010.

## **NULL DEPTH TRADE OFF FOR OUTPUT POWER REDUCTION FOR DOWNLINK IN AN ADAPTIVE ANTENNA ARRAY**

The growing demand of services in cellular mobile communications, and the problems made about them have took the technology to use adaptive antenna arrays, because the reduction of the signals transmit area helps to reduce noise, interference and multi-path fading. Even so, the use of digital beamforming algorithms is needed to have the capability to steer the main beam and steer nulls of the radiation pattern.

Among the digital beamformers Zero-Forcing algorithm was chose, because it is a low computational load algorithm, that find a transmit power minimization, giving the capability to point the main beam to the desired user and steer nulls to interferers. However, the small separation between users makes the output power of the antenna array increase.

To solve the power issue, a novel method is used, which can reduce the power excess made by small separation between interferers and desired user; it makes a null depth trade off with output power on antenna array.

The user increase in the cell of cellular mobile communications, have the need to give services to different users at time. Therefore, to give those services it works with a digital beamforming network. Using Zero-Forcing algorithm, this digital beamforming network can generate multiple beams simultaneously, getting this way the capability to give services to more than one user at the same time.

**Keywords:** Zero-Forcing digital beamformer, null depth changing, Zero-Forcing digital beamforming network

*A mis padres,  
Bony y Chato*

# Agradecimientos

A mi familia por haber confiado en mí y haberme brindado el apoyo para salir adelante, para culminar esta etapa.

A todos los compañeros de electrónica: Karen, Perla, Rigo, Mijitus, Rodrigo, Irak, Ese, Edwin, Alex, Chiri, Cheche, Chino, Cesar, Brenda, Eli, Rebeca, Paul, Anita, Ara, Lupe, Raul, Tampico, Lili y los que se me pasan. Gracias por todo Tulicanos.

En especial al chino, al ese y a Brenda por soportarme y compartir tanto conmigo.

A los Biólogos por dejarme formar parte de ese gran grupo de amigos.

A mis tíos, Rufina y Cesar, que me han apoyado desde que decidí venir a Ensenada.

A mi director de tesis Dr. David Covarrubias, por todos sus consejos y su apoyo. Por su confianza, su preocupación y su paciencia, pero sobre todo su amistad.

A todos los integrantes del GCI, Memo, Armando, Edwin y Christian ya que con la ayuda de sus críticas y comentarios ayudaron a llevar este trabajo por buen camino. Sin dejar de lado el buen ambiente y la amistad que existe.

A los miembros del comité, M.C. Enrique Pacheco, Dr. Salvador Villarreal y Dr. Hugo Hidalgo; quienes, además de las correcciones, aportaron ideas sobre la marcha que ayudaron a expandir la investigación realizada.

A todos los maestros que impartieron clases, por sus enseñanzas y su tiempo.

Al CICESE por haberme dado la oportunidad de poder ingresar al posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo económico.

En fin, a todo aquel que puso su granito de arena para que esto se hiciera realidad.

# Contenido

	Página
Resumen en Español	i
Resumen en Inglés	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	ix
Lista de Acrónimos	x
<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
I.1 Situación actual de las comunicaciones móviles celulares . . . . .	1
I.1.1 Problemas en los sistemas de comunicaciones móviles . . . . .	1
I.2 Planteamiento del problema . . . . .	3
I.3 Objetivo General de la tesis . . . . .	4
I.4 Metodología de la investigación . . . . .	5
I.5 Organización de la tesis . . . . .	6
I.6 Tascendencia y originalidad . . . . .	7
<b>II. Antenas Inteligentes y Conformación Digital de Haz</b>	<b>8</b>
II.1 Introducción . . . . .	8
II.2 Antenas inteligentes . . . . .	9
II.3 Modelo de señal . . . . .	15
II.3.1 Enlace ascendente . . . . .	15
II.3.2 Enlace descendente . . . . .	19
II.4 Conformación digital de haz . . . . .	21
II.4.1 Conformadores independientes de datos . . . . .	22
II.4.2 Conformadores estadísticamente óptimos . . . . .	23
II.4.3 Conformadores adaptativos . . . . .	24
II.5 Trabajos realizados en el GCI en el área de conformación digital de haz	25
II.6 Conclusiones . . . . .	26
<b>III. Conformador digital de haz Zero-Forcing</b>	<b>27</b>

## Contenido (continuación)

	Página	
III.1	Introducción . . . . .	27
III.2	Parámetros utilizados por el algoritmo Zero-Forcing . . . . .	29
III.3	Modelo matemático de Zero-Forcing . . . . .	30
III.4	Diagrama de radiación Zero-Forcing . . . . .	34
III.5	Direccionamiento de haz principal . . . . .	39
III.6	Direccionamiento de nulos . . . . .	42
III.7	Potencia en exceso . . . . .	48
III.8	Conclusiones . . . . .	49
<b>IV.</b>	<b>Algoritmo para la modificación de profundidad de nulos en la conformación digital de haz Zero-Forcing</b>	<b>51</b>
IV.1	Introducción . . . . .	51
IV.2	Modelo matemático del algoritmo de modificación de profundidad de nulos . . . . .	52
IV.3	Diagrama de radiación con modificación de profundidad de nulos . . . . .	54
IV.4	Potencia de Salida del algoritmo de modificación de nulos . . . . .	58
IV.5	Compromiso entre profundidad de nulos y potencia de salida . . . . .	60
IV.6	Conclusiones . . . . .	66
<b>V.</b>	<b>Red de conformación digital de haz</b>	<b>68</b>
V.1	Introducción . . . . .	68
V.2	Red de conformación digital de haz . . . . .	69
V.2.1	Red de conformación elemento-espacio . . . . .	70
V.3	Red de conformación digital de haz basada en el algoritmo Zero-Forcing	72
V.3.1	Modelo matemático de una red de conformación digital de haz con el algoritmo Zero-Forcing . . . . .	73
V.3.2	Simulaciones sobre la red de conformación digital basada en el algoritmo Zero-Forcing . . . . .	75
V.4	Conclusiones . . . . .	84
<b>VI.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>86</b>
VI.1	De la conformación digital de haz (CDH) . . . . .	86
VI.2	Sobre el algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing . . . . .	87
VI.3	En cuanto al algoritmo de modificación de profundidad de nulos . . . . .	89
VI.4	Con respecto al objetivo de la tesis . . . . .	90
VI.5	Acerca de las redes de conformación digital de haz . . . . .	91
VI.6	Trabajo Futuro . . . . .	92
<b>Referencias</b>		<b>93</b>

# Lista de Figuras

Figura		Página
1	Metodología de la investigación realizada en el presente trabajo . . . . .	5
2	Diagrama de radiación en respuesta natural para una agrupación de 8 elementos de antena . . . . .	12
3	Áreas de investigación involucradas en el concepto de antenas inteligentes	14
4	Enlace ascendente de un sistema de comunicaciones inalámbricas . . . . .	15
5	Enlace descendente de un sistema de comunicaciones inalámbricas . . . . .	19
6	Clasificación de la conformación digital de haz aplicada a comunicaciones móviles inalámbricas . . . . .	22
7	Diagrama de radiación Zero-Forcing para una agrupación de 8 elementos de antena . . . . .	35
8	Comparación del diagrama de radiación Zero-Forcing con el diagrama de radiación de respuesta natural de una agrupación de 16 elementos de antena. . . . .	36
9	Relación entre número de elementos de antena y potencia del haz principal; tanto en la respuesta natural de una agrupación de antenas como en Zero-Forcing. . . . .	37
10	Potencia de salida total de la agrupación de antenas respecto al número de elementos de antena, para la respuesta natural y para Zero-Forcing.	38
11	Diagrama de radiación Zero-Forcing para una agrupación de 3 elementos de antena y sin direccionamiento de nulos. . . . .	39
12	Diagrama de radiación Zero-Forcing para una agrupación de 3 elementos de antena, direccionando el haz principal a $15^\circ$ . . . . .	40
13	Profundidad de nulos para una agrupación de 3 elementos de antena, utilizando el algoritmo Zero-Forcing . . . . .	43
14	Diagrama de Radiación Zero-Forcing para una agrupación de 3 elementos de antena, dirigiendo nulos a $-45^\circ$ y a $15^\circ$ . . . . .	44
15	Ancho de haz principal con respecto al número de elementos de antena.	45

## Lista de Figuras (continuación)

Figura		Página
16	Umbral de separación entre usuario de interés e interferente donde empieza a existir incremento en la potencia. . . . .	46
17	Potencia de salida respecto al numero de elementos de la agrupación y la ubicación de un nulo. . . . .	48
18	Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a $10^\circ$ , y profundidad de nulos de $-40\text{dB}$ . . . . .	55
19	Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a $10^\circ$ , y profundidad de nulos de $-10\text{dB}$ . . . . .	56
20	Potencia de salida $P_{ND}$ de la agrupación de antenas debida a los pesos complejos $w_{ND}$ obtenidos en función de la profundidad de nulos, que depende de amplitud y fase. Agrupación con 3 elementos de antena, interferente a $10^\circ$ . . . . .	58
21	Potencia de salida total normalizada $P_{ND-norm}$ con respecto a la profundidad de nulos, en una agrupación con 3 elementos de antena . . . . .	60
22	Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a $15^\circ$ , y profundidad de nulos de $-35\text{dB}$ . . . . .	62
23	Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a $15^\circ$ , y profundidad de nulos de $-10\text{dB}$ . . . . .	63
24	Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a $15^\circ$ , y profundidad de nulos de $-3\text{dB}$ . . . . .	64
25	Potencia del haz principal respectoa la profundidad de nulos, para una agrupación con 3 elementos de antena . . . . .	65
26	Esquema de una red de conformación digital de haz utilizada para la transmisión. . . . .	70
27	Diagramas de radiación para una RCDH-ZF con 2 usuarios de interés sin interferentes . . . . .	78
28	Diagramas de radiación para una RCDH-ZF con 4 usuarios, 2 de interés y 2 interferentes . . . . .	80
29	Diagramas de radiación para una RCDH-ZF con 2 usuarios de interés y 3 interferentes . . . . .	82

# Lista de Tablas

Tabla		Página
I	Trabajos sobre conformación digital de haz dentro del GCI . . . . .	25
II	Umbral cercanía entre usuarios donde se provoca un incremento de potencia de salida de la agrupación de antenas . . . . .	47
III	Parámetros para la comparación del diagrama de radiación Zero-Forcing con el de modificación de profundidad de nulos. . . . .	54
IV	Parámetros para la red de conformación digital de haz basada en el algoritmo Zero-Forcing . . . . .	76
V	Casos de simulación sobre la red de conformación digital de haz Zero-Forcing . . . . .	77
VI	Potencias de salida para el caso 1 . . . . .	79
VII	Potencias de salida para el caso 2 . . . . .	81
VIII	Potencias de salida para el caso 3 . . . . .	83

## Lista de Acrónimos

<b>CCI:</b>	del inglés <i>Co-Channel Interference</i> , Interferencia Cocanal.
<b>CDH:</b>	Conformación Digital de Haz.
<b>CDMA:</b>	del inglés <i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
<b>DoA:</b>	del inglés <i>Direction of Arrival</i> , Dirección de arribo.
<b>FDMA:</b>	del inglés <i>Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
<b>GCI:</b>	Grupo de Comunicaciones Inalámbricas.
<b>LCMV:</b>	del inglés, <i>Linear Constrained Minimum Variance</i> , Mínima Varianza con Restricciones Lineales.
<b>LMS:</b>	del inglés <i>Least Mean Square</i> , Mínimas Medias Cuadradas.
<b>MAI:</b>	del inglés <i>Multiple Acces Interference</i> , Interferencia por Acceso Múltiple.
<b>MSC:</b>	del inglés <i>Multiple Sidelobe Canceler</i> , Cancelador Múltiple de Lóbulos Laterales.
<b>RCDH:</b>	Red de Conformación Digital de Haz.
<b>RCDH-ZF:</b>	Red de Conformación Digital de Haz, basada en el algoritmo Zero-Forcing.
<b>RLS:</b>	del inglés <i>Recursive Least Squares</i> , Mínimos Cuadrados Recursivo.
<b>SDMA:</b>	del inglés <i>Spatial Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División Espacial.
<b>SLL:</b>	del inglés <i>Side Lobe Level</i> , Nivel de Lóbulos Laterales.
<b>TDMA:</b>	del inglés <i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.

# Capítulo I

## Introducción

### I.1 Situación actual de las comunicaciones móviles celulares

En la actualidad los sistemas de comunicaciones móviles son muy utilizados, pues brindan la posibilidad al usuario móvil de mantenerse comunicado en cualquier lugar. Por comunicación no solo se habla de comunicación por voz, sino también la capacidad de los mensajes de texto, correos electrónicos, navegación por internet, contenido multimedia y más. El reto es optimizar la capacidad que se tiene en la celda del sistema celular para poder brindar estos servicios, ya que el alto número de usuarios que utilizan el sistema, además de todos los servicios que requieren, demandan un ancho de banda cada día mayor.

#### I.1.1 Problemas en los sistemas de comunicaciones móviles

Para solucionar los problemas de ancho de banda se han desarrollado diferentes esquemas de modulación y de acceso al medio, que en conjunto ayudan a optimizar dicho ancho de banda. Sin embargo, el creciente aumento de usuarios provoca aún más problemas debido a la cantidad tan alta de señales en el medio, esto además de los problemas que se encuentran presentes en el medio de propagación de canal radio, en el cual se propagan las señales.

Los problemas en los sistemas de comunicaciones móviles pueden ser separados en dos categorías, por una parte los que son problemas dependientes del medio de propagación de las señales, y por otro lado, los que son causados por los propios usuarios del sistema, tales problemas son analizados en Balanis [1997], Rappaport [1996], Liberti Jr. y Rappaport [1999] y Sklar [2001].

- Problemas inherentes al medio de propagación:

- Ruido

El ruido es un parámetro que siempre estará presente en los sistemas de comunicaciones, y más aún en los sistemas inalámbricos, debido a la gran cantidad de señales que existen en ambiente. Ésto provoca la degradación de la relación señal a ruido del sistema.

- Desvanecimientos por multitrayectorias

Son provocados por todos los posibles obstáculos que puedan existir entre la estación base y el dispositivo móvil, tales como edificios, árboles, montañas, automóviles, etc. Dichos obstáculos provocan caídas en la potencia de la señal, las cuales son llamados desvanecimientos.

- Problemas dependientes de la cantidad de usuarios:

- Cobertura

La cobertura es la distancia hasta la cual la estación base es capaz de transmitir la señal satisfaciendo calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés). Ésta se ve afectada cuando están presentes tanto ruido como multitrayectorias. También la cobertura es reducida cuando aumenta el número de usuarios dentro de la celda, debido al incremento de interferentes.

– Interferencias

Las interferencias son causadas por señales que existen en el mismo tiempo y en la misma frecuencia y en un mismo espacio. Éstas pueden ser:

\* MAI(Multiple Acces Interference)/CCI(Co-Channel Interference):

Son las interferencias que son causadas por usuarios en la misma celda, y que transmiten en la misma frecuencia al mismo tiempo (CDMA<sup>1</sup>).

\* Canal adyacente:

Estas interferencias son causadas por las estaciones base, de otras celdas que transmiten a una potencia que llega a la celda que se está estudiando.

– Capacidad

La capacidad, se puede medir como la cantidad de usuarios que pueden ser atendidos simultáneamente por la estación base, se ve comprometida por los problemas ya mencionados, y al igual que la cobertura, y se reduce cuando aumenta el número de usuarios dentro de la celda.

## I.2 Planteamiento del problema

Se tiene un número elevado de usuarios dentro de una celda, transmitiendo al mismo tiempo y en la misma frecuencia (CDMA, acceso al medio por división de código); por lo que se presentan interferencias entre los usuarios de la misma celda, interferencia co-canal (CCI). Además de los problemas de desvanecimientos por multitrayectorias debido al ambiente de dispersión en que esté ubicada la celda dentro del sistema celular.

---

<sup>1</sup>Del inglés Code Division Multiple Acces, es un método de acceso al medio en el cual los usuarios transmiten al mismo tiempo y en la misma frecuencia, diferenciándose entre sí por un código asignado temporalmente por la estación base.

Una posible solución sería aumentar el nivel de la relación señal a ruido (SNR, por las siglas del inglés relación señal a ruido) para así poder brindar el servicio. Sin embargo, la estación base está limitada en la transmisión de potencia, esto con el fin de prevenir la interferencia con otras celdas (interferencia de canal adyacente).

Las antenas inteligentes son una de las mejores soluciones para el problema de multitraectorias. Pero para el problema de la interferencia co-canal, se requiere además de un filtrado de las señales de los usuarios.

Es importante para la estación base conocer la ubicación de los usuarios para así poder filtrar las señales a los que se les estarán prestando los servicios. La estimación de la posición de los usuarios interferentes se realiza con algoritmos de detección de llegada de las señales (DoA, siglas del inglés Direction of Arrival).

Para el enlace descendente, estación base - terminal móvil, se debe de evitar que la señal para el usuario de interés llegue a otros usuarios; para ello, las antenas inteligentes pueden ser habilitadas con algoritmos adaptativos de conformación digital de haz con lo cual es posible optimizar el diagrama de radiación en términos de alta directividad al usuario de interés, y de mínima potencia a posibles interferentes.

### **I.3 Objetivo General de la tesis**

El objetivo de esta tesis es generar diagramas de radiación en una agrupación de antenas, mediante el algoritmo de conformación digital de haz adaptativo Zero-Forcing, tales que cumplan con las características especificadas, tratando a su vez de reducir las posibles interferencias. Se analiza y evalúa el comportamiento del compromiso entre la potencia de salida de la agrupación de antenas y la profundidad de los nulos<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>Por nulos se entiende que son lugares en el espacio que tienen una potencia muy pequeña o nula.

## I.4 Metodología de la investigación

La metodología que se utilizó en el proceso de investigación de esta tesis es la mostrada por la figura 1:

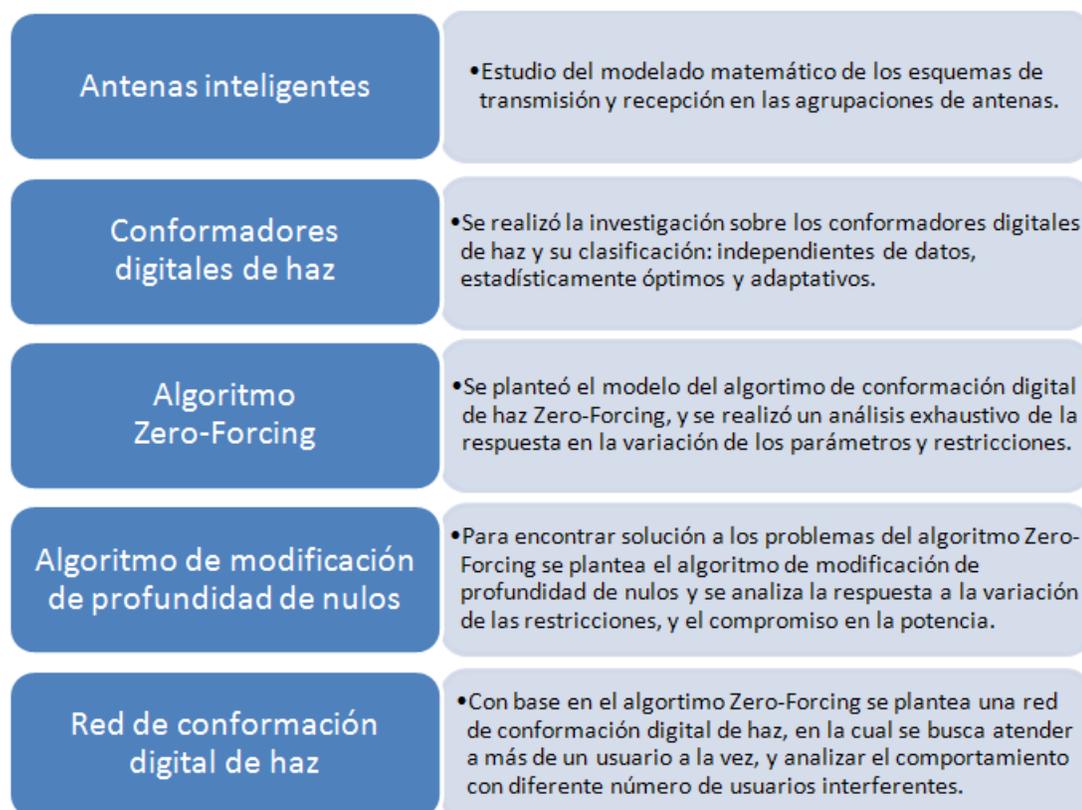


Figura 1. Metodología de la investigación realizada en el presente trabajo

Como características importantes en esta investigación se realizó la simulación del modelo de cada uno de los algoritmos de conformación digital de haz encontrando la necesidad de la utilización del algoritmo de modificación de profundidad de nulos. Las prestaciones de este algoritmo se analizan en detalle y representan una aportación importante de la tesis.

## I.5 Organización de la tesis

La escritura de los capítulos se basó en siguiente estructura.

El capítulo II trata acerca de las antenas inteligentes, aborda el modelo de los vectores implicados en la geometría de la agrupación y el modelo de señal, tanto en el enlace ascendente como en el descendente.

En el capítulo III se desarrolla el modelado del algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing, y se analiza la respuesta de la agrupación cuando un usuario interferente está ubicado espacialmente muy cerca del usuario de interés. También se hace un análisis de la potencia de salida con respecto al número de elementos de antena de la agrupación.

Se propone un nuevo algoritmo de conformación digital de haz basado en la hipótesis de modificación de profundidad de nulos. Dicho algoritmo se analiza en el capítulo IV. Una vez encontrados los principales problemas del algoritmo Zero-Forcing, se realiza una modificación en el valor de las restricciones planteadas por dicho algoritmo. Al modelo resultante de esas variaciones es al que se denomina algoritmo de modificación de profundidad de nulos. Es aquí donde se hace el análisis del compromiso de la potencia de salida de la agrupación con respecto a la profundidad de los nulos.

El capítulo V plantea el uso de una red de conformación digital de haz basada en el algoritmo de Zero-Forcing. Sin embargo, es posible utilizar el algoritmo de modificación de profundidad de nulos para ayudar a solucionar algunos problemas que se presentan.

El capítulo VI muestra las conclusiones del trabajo así como el trabajo futuro.

## I.6 Tascendencia y originalidad

Por último vale la pena mencionar que se aborda por primera vez dentro del Grupo de Comunicaciones Inalámbricas (GCI) del CICESE, una técnica de conformación digital de haz enfocada al rechazo de interferentes, lo cual esta alineado con estado del arte en la conformación digital de haz. Anteriormente otro tipo de algoritmos de conformación se enfocaron al objetivo de la maximización del SNR.

Además se genera un novedoso método para reducción de la potencia de salida, generando un compromiso entre la potencia de los nulos y la potencia de salida de la agrupación de antenas, método aplicado a la conformación digital de haz con características no reportadas hasta ahora en la literatura especializada.

Otra contribución importante de este trabajo es la conformación digital de haz enfocada a la generación simultánea de múltiples haces. Aspecto no tratado hasta ahora dentro del grupo de investigación donde se realizó esta tesis.

## Capítulo II

# Antenas Inteligentes y Conformación Digital de Haz

### II.1 Introducción

Existe la necesidad de dirigir al usuario de interés la señal sin que ésta llegue a otros usuarios (usuarios interferentes<sup>3</sup>), de esta manera se obtiene más seguridad debido a que los otros usuarios no tendrían acceso a la información del usuario de interés.

Para evitar que la señal llegue a los interferentes se debe de realizar un filtrado; es decir, se selecciona a quién se le dirigirá la información. A este fenómeno se le conoce como filtrado espacial.

La utilización de antenas inteligentes es de vital importancia, ya que esta tecnología lleva implícito el filtrado espacial por la forma que tiene el diagrama de radiación que genera, más adelante en este capítulo se analizará este aspecto.

Para que el filtrado espacial se lleve a cabo, la mayoría de las ocasiones es necesario cambiar la respuesta natural de la agrupación de antenas, por medio de la modificación de los pesos complejos de los elementos de antena, generando así un diagrama de radiación que cumpla con características deseadas en cuanto a apuntamiento del haz principal al usuario de interés, y de mínima potencia a posibles interferentes.

A la técnica utilizada para realizar dichas modificaciones se le conoce como conformación digital de haz <sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup>En ocasiones se mencionará como interferentes simplemente.

<sup>4</sup>En inglés se conoce como Digital Beamforming. En el este trabajo se puede encontrar como tal.

Para comprender mejor, tanto las características, como las expresiones que se presentarán posteriormente en el trabajo, es importante plantear el modelo de señal del sistema. Es importante también tener claro que se trabajará solamente en el enlace descendente, lo cual quiere decir que es la estación base la que estará transmitiendo. El enlace ascendente se utiliza para conocer las posiciones de los usuarios pero se asume que es un problema resuelto.

## II.2 Antenas inteligentes

Las antenas inteligentes<sup>5</sup> se han convertido en una tecnología muy utilizada para las comunicaciones inalámbricas debido a las prestaciones que ofrecen, estando entre ellas la capacidad de reducir el ruido y la interferencia tanto en la celda en que se está trabajando como en las celdas adyacentes.

- Definición

Las antenas inteligentes, también conocidas como agrupación (array) de antenas, son un conjunto de antenas omnirradiantes; es decir, que radían en todas direcciones. Cada una de estas antenas se nombrará elemento de antena, ya que en conjunto forman el agrupamiento de antenas. Para facilitar su análisis dichas agrupaciones se ubican en configuraciones geométricas específicas. Estas configuraciones pueden ser lineales, planares y espaciales. En este trabajo se utilizarán agrupaciones lineales.

Las agrupaciones de antenas pueden ser de 2 tipos: agrupaciones de haz conmutado y las de haz adaptativo.

---

<sup>5</sup>Se puede encontrar más información en los libros de Balanis [1997], Blaunstein y Christodoulou [2007] y Gross [2005]

– Haz conmutado

Este tipo de agrupaciones de antena se caracteriza por tener un número específico de diagramas de radiación predefinidos, y dependiendo de la ubicación del usuario que se trata de atender se selecciona uno de los diagramas de radiación, el que apunte en esa dirección. El número de diagramas depende de la geometría de la agrupación.

– Haz adaptativo

Las agrupaciones de antena con haz adaptativo o agrupaciones adaptativas tienen la característica de apuntar el haz principal hacia donde se encuentra el usuario en todo momento, solo tienen un diagrama de radiación pero tiene la capacidad de poder apuntarse hacia cualquier ubicación espacial del usuario de interés.

En las agrupaciones adaptativas, cada elemento de antena tiene un controlador que modifica la amplitud y la fase de la corriente de excitación que llega a ese elemento, y se nombra como “peso complejo” ya que es de la forma  $ae^{-jb}$ . El conjunto de los pesos se designa vector de pesos complejos  $w$  expresado en la forma mostrada en la ecuación 1, donde  $w_i$  es el peso correspondiente al  $i$ -ésimo elemento.

$$w = [ w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_N ]^T \quad (1)$$

$N$  es el número de elementos de antena.

- Diagrama de Radiación

El diagrama de radiación es el producto de la superposición de la radiación de cada uno de los elementos de antena, y éste puede ser manipulado variando la magnitud y/o la fase de la corriente de excitación que llega a cada uno de los elementos de la antena, es decir modificando los pesos complejos. Esta variación cambia la potencia que emana de los elementos de antena modificando así la respuesta que da la superposición de las señales.

En el diagrama de radiación se pueden tener segmentos donde existe una cantidad de potencia mayor que en otros, éstos son llamados lóbulos, el lóbulo de mayor amplitud es llamado lóbulo principal (o haz principal) y a los demás se les conoce como lóbulos laterales. Los lugares donde no existe potencia o hay una potencia muy baja con respecto a los demás lóbulos son llamados nulos.

Otro parámetro cuantificable del diagrama de radiación es el ancho de haz principal, éste puede ser medido de un nulo a otro a los lados del lóbulo principal, o a la mitad de la potencia de éste.

Cuando no existe control sobre las corrientes, es decir no hay pesos complejos, se tiene amplitud 1 y fase 0, obteniendo así la respuesta natural de la agrupación de antenas. La Figura 2 muestra la respuesta natural de una agrupación de 8 elementos de antena. Se señalan en dicha figura los lóbulos, tanto el haz principal como los lóbulos laterales, y los nulos.

La potencia de haz principal de la Figura 2 es aproximadamente 18 dB. Potencias muy grandes de haz principal ayudan a incrementar la SNR (relación señal a ruido, del inglés Signal to Noise Ratio), que es un parámetro de calidad de señal, pero pueden causar interferencias en las celdas adyacentes, por lo tanto se deben evitar.

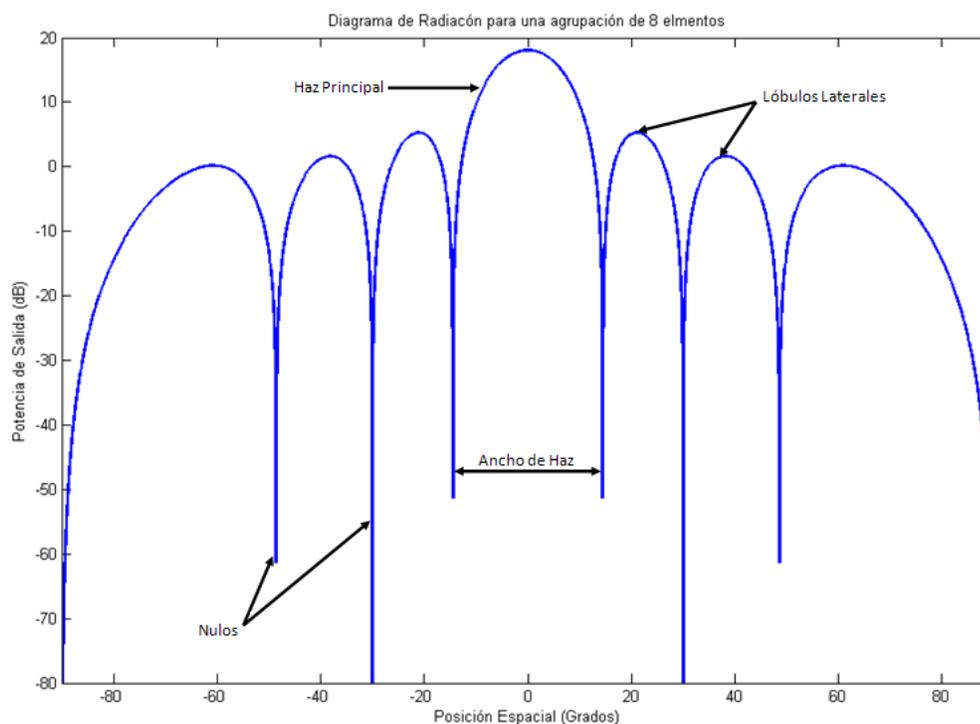


Figura 2. Diagrama de radiación en respuesta natural para una agrupación de 8 elementos de antena

El nivel de lóbulos laterales (SLL, por las siglas en inglés de Side Lobe Level), refiere a la potencia que tiene el mayor de los lóbulos laterales y que comúnmente es el primer lóbulo al lado de haz principal. En el caso particular de la Figura 2 este nivel es de alrededor de 5.3 dB con respecto al punto de 0dB. Cuando un lóbulo lateral se encuentra dirigido hacia un usuario causa interferencia por lo cual es conveniente que no apunten hacia los usuarios.

El ancho de haz del principal medido con respecto a los dos primeros nulos es de  $29^\circ$ . El ancho de haz es un parámetro muy importante ya que es una medida de la cercanía que puede haber entre usuarios sin llegar a causar interferencia. Cuanto menor es el ancho de haz más cercanos pueden estar los usuarios entre sí.

- Filtrado espacial y acceso al medio por división espacial (SDMA)

Como ya se ha mencionado, existe la posibilidad de manipular el diagrama de radiación. Esto proporciona grandes beneficios, pues teniendo esta capacidad, se puede decidir en cual dirección se desea dirigir el haz principal del diagrama de radiación, además de ubicar los nulos hacia donde sea más conveniente. Con ésto surge un método de filtrado, el filtrado espacial, ya que se puede decidir a que usuario se desea atender en un momento específico, dirigiendo hacia dicho usuario la mayor cantidad de potencia posible y nulos hacia los demás usuarios. Con esta técnica de filtrado, se reducen tanto el ruido como la interferencia que recibe el usuario al que se está atendiendo, pues el área donde existe la señal es más reducida.

La capacidad de atender espacialmente a un usuario a la vez, da origen a una técnica de acceso al medio conocida como acceso al medio por división espacial (SDMA, por sus siglas en ingles), pues la estación base decide a que usuario ubicado espacialmente atender.

El área de estudio de las antenas inteligentes es muy amplio, por lo cual se ha dividido en cuatro grandes grupos: Canal Radio, Modelos Espaciales de Canal, Agrupación de Antenas y Conformación de Haz, tal como se muestra en la Figura 3.

- Canal Radio: Es el medio de transmisión en todas las comunicaciones inalámbricas. Aquí se caracterizan las pérdidas por propagación, el retardo, y todo lo que al medio de transmisión se refiera.
- Modelos Espaciales de Canal: Los interferentes y las multitraectorias son caracterizados, así como el ambiente de dispersión.

- Agrupación de Antenas: Se estudian los parámetros de la antena, como la geometría de la agrupación, la separación entre elementos y el diagrama de radiación.
- Conformación de Haz: Es en esta división donde se estudia propiamente la inteligencia de la antena, pues mediante algoritmos de detección de arriba en el enlace ascendente, se conoce la ubicación espacial de los usuarios, y a partir de esta información se crean diagramas de radiación optimizados para cada situación.

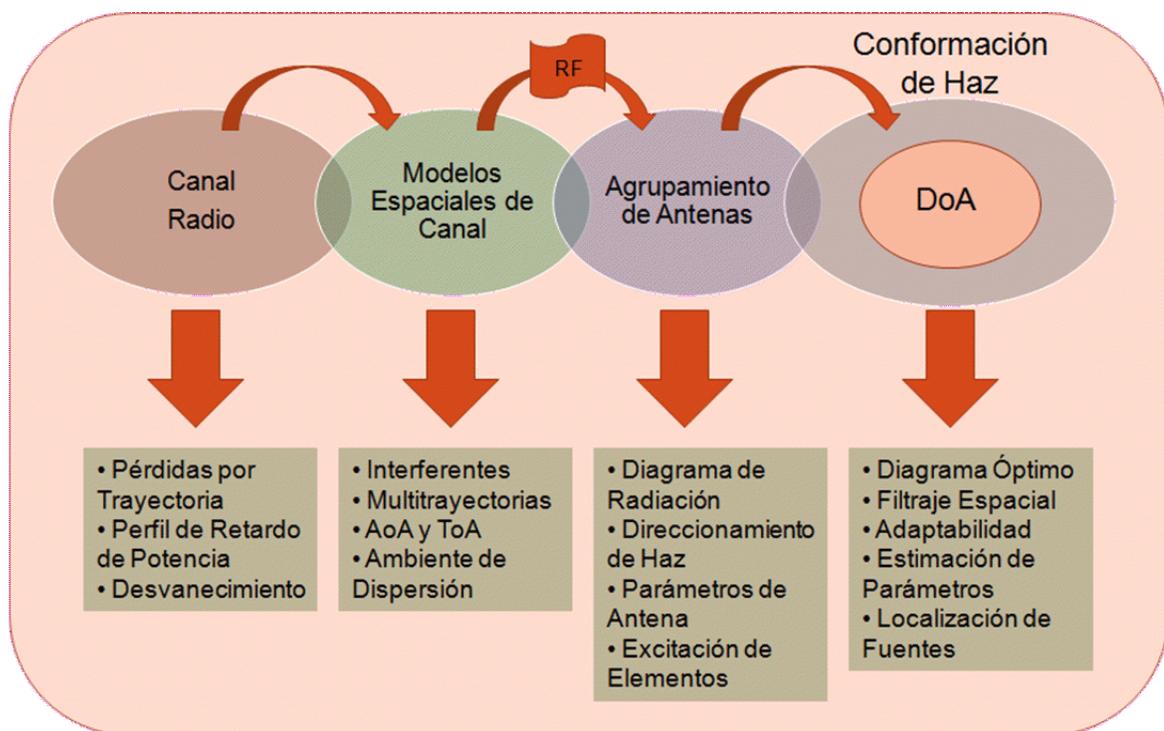


Figura 3. Áreas de investigación involucradas en el concepto de antenas inteligentes

En la Figura 3 se muestran las cuatro divisiones de investigación que se encuentran en el ámbito de las antenas inteligentes.

## II.3 Modelo de señal

El modelo de señal se divide en dos partes, el enlace ascendente que es donde se obtiene la ubicación de los usuarios y el enlace descendente en donde se genera el diagrama de radiación.

### II.3.1 Enlace ascendente

El enlace ascendente es muy importante para la conformación digital de haz, basada ésta en algoritmos de detección de dirección de arribo que permiten estimar la ubicación de los usuarios móviles.

A continuación se describe, mediante modelado, cómo se obtiene la ubicación de los usuarios en la agrupación de antenas. En la Figura 4 se muestra gráficamente este proceso.

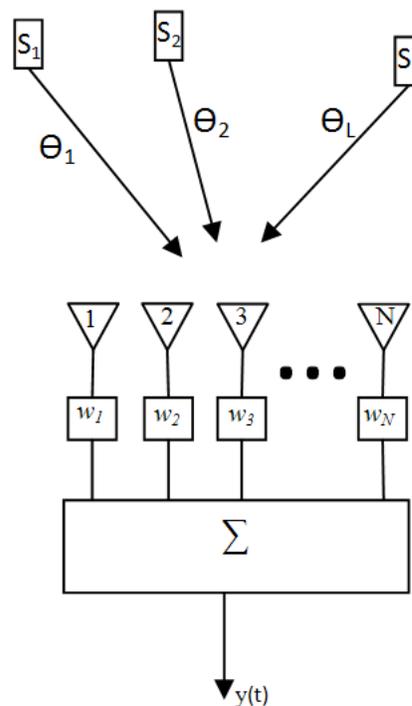


Figura 4. Enlace ascendente de un sistema de comunicaciones inalámbricas

La estación base, mediante la agrupación de antenas, recibe las señales de todos los usuarios, así como las multitrayectorias de cada uno de ellos, y con esta información puede calcular la ubicación espacial de cada usuario. Como se puede observar en la figura anterior, en el enlace ascendente la agrupación de antenas recibe las señales de todos los móviles, incluyendo las multitrayectorias, y aplica algoritmos de estimación de la dirección de llegada (DoA) para conocer la ubicación de cada uno de ellos, y poder crear los diagramas de radiación correspondientes. Debido a que en el GCI se ha estudiado ampliamente el tema de DoA, se da como un problema resuelto.

Las señales de las fuentes o usuarios que están dentro del área de cobertura se agrupan en un vector, llamado *vector de fuentes* o *vector de señales*  $S(t)$  definido como:

$$S(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) & s_2(t) & \cdots & s_L(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_L(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde  $L$  es el número de fuentes, es decir, de usuarios en la celda.

El vector de direccionamiento del  $i$ -ésimo usuario se muestra en la ecuación 3. Existirán tantos vectores de direccionamiento como el número de usuarios  $L$ .  $N$  representa el número de elementos de antena. Es importante resaltar que el número de nulos que tendrá el diagrama de radiación, y por lo tanto el número de usuarios a los que se podrá cancelar, depende del número  $N$  de elementos de antena. También de  $N$  depende el ancho del haz principal, y por lo tanto, la resolución angular. Además recordar que no se pueden rechazar interferentes que están muy cerca del usuario de interés.

Otro parámetro importante del modelo de señal es el *vector de direccionamiento* del  $i$ -ésimo usuario, definido matemáticamente por:

$$a(\theta_i) = \left[ 1 \quad e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta_i} \quad \dots \quad e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} (N-1) \text{sen}\theta_i} \right]^T \quad (3)$$

Los vectores de direccionamiento son agrupados en una matriz llamada *matriz de direccionamiento*<sup>6</sup>. La ecuación 4 muestra como son organizados los vectores dentro de la matriz de direccionamiento y en la ecuación 5 se muestran los vectores desarrollados.

$$A(\theta) = \left[ a(\theta_1) \quad a(\theta_2) \quad \dots \quad a(\theta_L) \right] \quad (4)$$

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta_1} & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta_2} & \dots & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} (N-1) \text{sen}\theta_1} & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} (N-1) \text{sen}\theta_2} & \dots & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} (N-1) \text{sen}\theta_L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Las señales que llegan a la agrupación de antenas se representan por el vector  $X(t)$ :

$$X(t) = \left[ x_1(t) \quad x_2(t) \quad \dots \quad x_N(t) \right]^T \quad (6)$$

donde el subíndice  $N$  es el número de elementos de antena.

$$X(t) = A(\Theta) S(t) + N(t) \quad (7)$$

$N(t)$  es el vector de ruido, diferente del número de elementos de antena  $N$ .

---

<sup>6</sup>En la literatura es llamada Manifold Matrix pero aquí se tomó la libertad de referirse a ella como matriz de direccionamiento, debido a que contiene los vectores de direccionamiento.

$$N(t) = \begin{bmatrix} n_1(t) & n_2(t) & \cdots & n_N(t) \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

Sustituyendo 5, 2 y 8 en 13 se tiene lo siguiente:

$$X(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta_1} & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta_2} & \cdots & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \text{sen}\theta_L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} (N-1) \text{sen}\theta_1} & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} (N-1) \text{sen}\theta_2} & \cdots & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} (N-1) \text{sen}\theta_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_L(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Realizando el análisis dimensional a las expresiones anteriores:

$A(\theta)$  es de  $N \times L$ ,  $S(t)$  de  $L \times 1$  por lo tanto su producto es de  $N \times 1$  al igual que  $N(t)$ , por lo tanto  $X(t)$  es de  $N \times 1$ .

Por su parte la salida  $Y(t)$  está en función de las señales de entrada y el vector de pesos complejos  $W$  representado como:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_N \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$Y(t) = W^H X(t) = \begin{bmatrix} w_1^* & w_2^* & \cdots & w_N^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

El análisis dimensional en este caso será:

$W^H$  es de  $1 \times N$  y  $X(t)$  de  $N \times 1$ , por lo tanto  $Y(t)$  es de  $1 \times 1$ .

### II.3.2 Enlace descendente

El enlace descendente es de mayor importancia en el enfoque de este trabajo, es en éste en donde se genera el diagrama de radiación con las características deseadas. En este apartado se mencionará el modelo general del enlace y posteriormente los conformadores que se utilizan en éste.

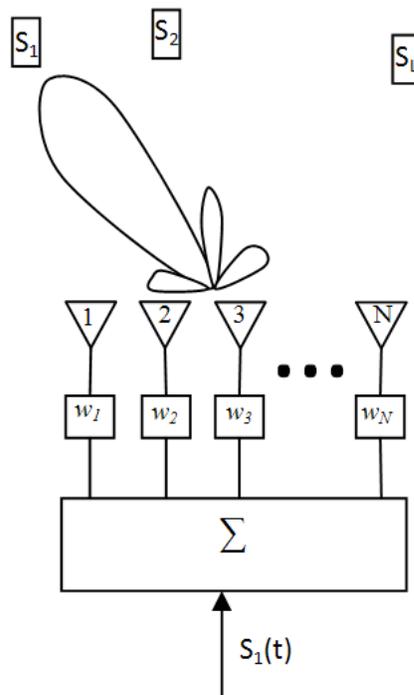


Figura 5. Enlace descendente de un sistema de comunicaciones inalámbricas

En la Figura 5 se puede observar  $s_1(t)$  que será enviada al usuario  $s_1$ , a través del conformador creado por el vector de pesos complejos  $w_1$ .

En el enlace descendente es donde la estación base transmite, y donde se modifica el diagrama de radiación de la respuesta natural de la agrupación de antenas. Dicha modificación se realiza utilizando algoritmos adaptativos, generando así diagramas de radiación para cada uno de los usuarios que serán atendidos.

Existe un vector de pesos ,  $W_i$ , para cada diagrama de radiación dado por:

$$W_i = \left[ w_i^1 \quad w_i^2 \quad \dots \quad w_i^N \right]^T \quad (12)$$

$W_i$  es el vector de pesos complejos para el  $i$ -ésimo usuario. Existen tantos vectores de pesos como usuarios se desean atender. Si se desea atender a todos, existen  $L$  vectores de pesos complejos, llamados en su conjunto *red de conformadores*.

La señal compuesta a la salida de la agrupación de antenas viene dada por:

$$X(t) = W^H S(t) \quad (13)$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} W_1 & W_2 & \dots & W_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \dots \\ s_L(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} w_1^1 & w_2^1 & \dots & w_L^1 \\ w_1^2 & w_2^2 & \dots & w_L^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_1^N & w_2^N & \dots & w_L^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \dots \\ s_L(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

En la ecuación 13,  $S(t)$  es la señal que se desea transmitir a los usuarios, a diferencia del enlace ascendente (ecuación 7), que es la señal que proviene de los usuarios.

## II.4 Conformación digital de haz

La conformación digital de haz se refiere a la generación de un diagrama de radiación con características específicas, estas características surgen a partir de la información que se tiene de la ubicación espacial de los usuarios. Se desea enviar al usuario de interés la mayor cantidad de potencia posible para así poder dar la atención requerida, y evitar dirigir potencia a los usuarios interferentes. Para conocer la ubicación de tales usuarios es necesario contar con una herramienta capaz de realizar una estimación de las posiciones, es por eso que la conformación digital de haz, esta dividida en dos partes:

1. Algoritmos de detección de Dirección de Llegada (DoA<sup>7</sup>).

Con estos algoritmos se conoce la posición espacial de cada uno de los usuarios, tanto el de interés como los interferentes, haciendo un procesado de todas las señales que llegan a la agrupación de antenas.

2. Algoritmos adaptativos para la creación del diagrama de radiación, es decir, algoritmos de conformación<sup>8</sup>.

Ésto es lo que se conoce propiamente como la inteligencia de la antena, debido a que a partir de la información obtenida por los algoritmos del DoA, se genera un diagrama de radiación con las características específicas del algoritmo seleccionado.

En el presente trabajo se aborda solamente la conformación de haz, la parte de la detección de arriba se considera un problema resuelto; es decir, se dará por conocida la posición espacial de l usuario de interés.

---

<sup>7</sup>En el Grupo de Comunicaciones Inalámbricas de CICESE se ha estudiado ampliamente el tema por Bonilla Hernández [2005], Mendoza Montoya [2006], Arceo Olague [2008] y recientemente, en el 2009, se propuso un método factible para movilidad con alta velocidad por Vázquez Olgúin [2009].

<sup>8</sup>El el GCI han sido profundamente analizados estos algoritmos: Velázquez Jasso [2002], Zamora Rodríguez [2002], García López [2005], Yepes Arbeláez [2006] y Monjardín Gonzáles [2008].

La conformación digital de haz comprende tres diferentes tipos de conformadores, como se muestra en Van Veen y Buckley [1988] y Zooghy [2005]. La Figura 6 ilustra esta clasificación.

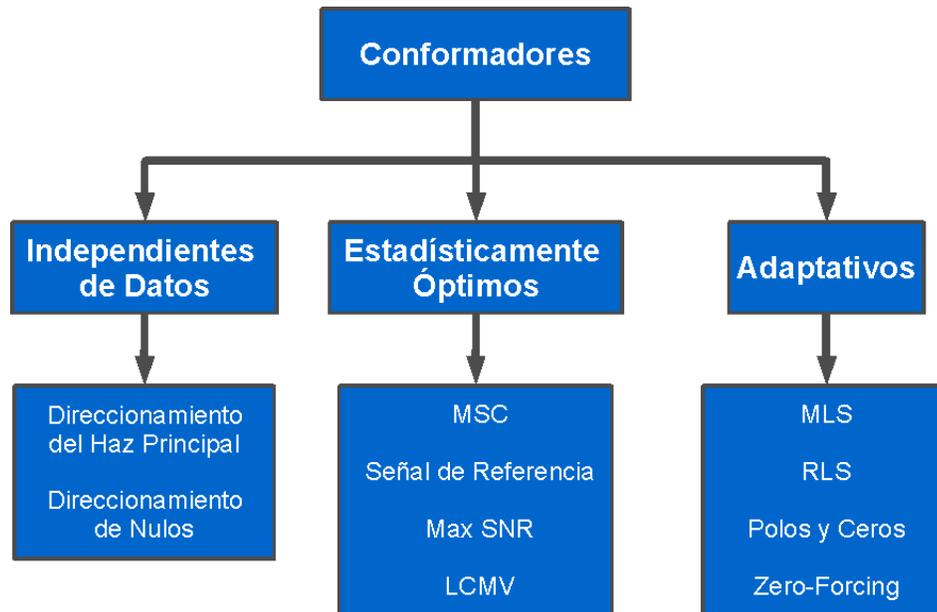


Figura 6. Clasificación de la conformación digital de haz aplicada a comunicaciones móviles inalámbricas

### II.4.1 Conformadores independientes de datos

Estos métodos utilizan señales de referencia para generar el diagrama de radiación, con dos enfoques:

- Conformador con direccionamiento de haz principal.

Dirige el haz principal del diagrama de radiación hacia el usuario de interés.

- Conformador con direccionamiento de nulos.

Al igual que el conformador anterior tiene la capacidad de dirigir el haz principal hacia el usuario de interés, y además puede dirigir los nulos del diagrama de radiación hacia los usuarios interferentes.

## II.4.2 Conformadores estadísticamente óptimos

Los conformadores estadísticamente óptimos se basan en la información obtenida en el enlace ascendente; es decir, en las estadísticas del canal estimadas a partir de los algoritmos de detección de arribo. Los principales conformadores de este tipo son:

- Cancelador múltiple de lóbulos laterales, MSC

El conformador con múltiples cancelaciones de lóbulos laterales fue el primero de los conformadores estadísticamente óptimos en aparecer. Utiliza un canal principal para dirigir el haz principal al usuario de interés, y canales auxiliares para ubicar los nulos. Tiene la desventaja de cancelar la señal de interés cuando ésta es muy fuerte.

- Señal de referencia.

Como el nombre lo indica, se requiere de una referencia para generar el diagrama de radiación. Se calculan los pesos complejos con el objetivo de reproducir la señal de referencia.

- Maximización de la relación señal a ruido (SNR).

En este tipo de conformación se calculan los pesos complejos con el objetivo de maximizar directamente el nivel de la relación señal a ruido. Requiere del conocimiento de las matrices de covarianza de señal y de ruido.

- Mínima varianza con restricciones lineales(LCMV, por sus siglas en inglés)

El conformador de mínima varianza con restricciones lineales, utiliza las restricciones con el fin de darle una ganancia a las señales deseadas. Los pesos se eligen con el fin de reducir la varianza de la potencia de salida y cumplir con las restricciones.

### II.4.3 Conformadores adaptativos

Los conformadores estadísticamente óptimos crean diagramas de radiación óptimos para un tiempo específico, sin embargo no tienen la capacidad de rastreo. Esto significa que si se tiene un usuario en movimiento la estación base no tiene la capacidad de seguirlo.

Los conformadores adaptativos convierten a los conformadores estadísticamente óptimos en algoritmos iterativos, esto es, para cada tiempo se calcula la dirección de arriba, y se crea un diagrama de radiación óptimo. Los principales conformadores adaptativos son:

- Mínimas Medias Cuadradas, LMS

Este conformador se basa en el algoritmo LMS (del inglés Least Mean Square). Es un algoritmo simple, pero su convergencia depende de una matriz de eigenvalores y de la forma de la superficie de error.

- Mínimos cuadrados recursivo, RLS

El algoritmo RLS (del inglés Recursive Least Squares), encuentra el valor óptimo de los pesos para cada iteración. Los pesos complejos son elegidos para minimizar la suma de los errores cuadrados pasados.

- Zero - Forcing.

Es un algoritmo con la capacidad de direccionar el haz principal y nulos, utiliza restricciones flexibles y tiene una baja carga computacional.

Dadas sus principales y atractivas características se seleccionó el algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing como base de la investigación para esta tesis.

## II.5 Trabajos realizados en el GCI en el área de conformación digital de haz

En el Grupo de Comunicaciones Inalámbricas de CICESE (GCI) se ha estudiado el tema de conformación ampliamente, desde los conformadores independientes de datos hasta los conformadores adaptativos. En tabla I se muestra un resumen de los los trabajos realizados en este campo y sus respectivos distintivos.

Tabla I. Trabajos sobre conformación digital de haz dentro del GCI

	Zamora 2002	Velázquez 2002	García 2005	Yepes 2006	Monjardín 2008
<b>Conformadores</b>	<b>No Óptimos</b>		<b>Complejo Conjugado</b>	<b>Óptimos</b>	
	<b>Sin Dirección de Nulos</b>		<b>Haz Único</b>	<b>MMSE</b>	<b>MMSE</b>
	<b>Con Dirección de Nulos</b>		<b>Multihaz</b>	<b>CMV</b>	<b>Max SIR</b>
					<b>CMV</b>
	<b>Óptimos</b>		<b>DoA</b>	<b>Adaptativos</b>	
	<b>Matriz de Correlación</b>	<b>MMSE</b>	<b>Haz Único</b>	<b>CMV</b>	<b>LMS</b>
	<b>LCMV</b>	<b>LCMV</b>	<b>Multihaz</b>		<b>IDMC</b>
		<b>Ganancia Igual</b>	<b>Relación Máxima</b>		<b>RLS</b>
<b>Distintivo</b>	<b>LCMV</b>	<b>MMSE</b>	<b>SNIR</b>	<b>PPM</b>	<b>Capón DLA</b>

Hasta el 2008, todos los trabajos que se realizaron en dicho grupo en el campo de la conformación digital de haz, estuvieron enfocados en maximizar la relación señal a ruido (SRN).

El presente trabajo está enfocado en la conformación digital de haz para el rechazo de interferentes y en la minimización de la potencia de salida; con lo cual se abordará por primera vez dentro del GCI la conformación de haz enfocada a la cancelación de interferentes.

## II.6 Conclusiones

Se analizaron los conformadores digitales de haz desde los conformadores independientes de datos hasta los conformadores adaptativos, se encontró que los conformadores estadísticamente óptimos tienen muy buenas prestaciones pero tienen la desventaja de no poder seguir al usuario de interés, es por esto que los algoritmos adaptativos resultan ser más adecuados para ser utilizados en un escenario real.

Una vez analizados los conformadores digitales de haz y debido a que cumplen con las necesidades que tenemos en el sistema y que tiene una baja carga computacional se ha seleccionado el conformador digital de haz *Zero-Forcing* el cual será modelado en el capítulo siguiente.

## Capítulo III

# Conformador digital de haz Zero-Forcing

### III.1 Introducción

La conformación digital de haz, como se ha mencionado, es un filtrado espacial de usuarios. Por esta razón no es raro ver que los algoritmos adaptativos de conformación de haz, estén basados en algoritmos que son también utilizados en filtros y ecualizadores.

Zero-Forcing<sup>9</sup> es un algoritmo desarrollado por Robert Lucky inicialmente para ecualización, con el objetivo de seleccionar ciertas frecuencias para procesarlas, mientras se deja las demás frecuencias de lado.

Como ecualizador o filtro este algoritmo es poco aplicado, por lo menos como tal, pues asume que las frecuencias deben ser infinitas para que tenga un funcionamiento correcto.

Para el caso de la conformación digital de haz, se encontró que es posible plantear restricciones basadas en la idea que lleva implícita el algoritmo Zero-Forcing, y así poder crear diagramas de radiación que se adapten a las características que se buscan, con el fin de tener mejores prestaciones en un sistema de comunicaciones móviles.

El algoritmo Zero-Forcing es de baja carga computacional por ser un algoritmo analítico. Dicho algoritmo se basa en operaciones matriciales utilizando los parámetros del modelo de señal abordado en el Capítulo II.

Zero-Forcing plantea restricciones que definen la potencia que tendrá el diagrama

---

<sup>9</sup>En los libros de Haykin [2002], Proakis [1995] y Rappaport [1996] es tratado el tema respecto a filtros y ecualizadores

de radiación en la posición indicada por el vector de posiciones, obtenido mediante algoritmos de detección de arribo en el enlace ascendente.

Con dicha información se calculan los pesos complejos  $w$  para así dirigir al usuario de interés la mayor cantidad de potencia; es decir, el haz principal, y con el fin de reducir la interferencia se dirigen los nulos hacia los usuarios interferentes.

La forma de trabajar del algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing es encontrar los pesos complejos que satisfagan las restricciones planteadas para cumplir la minimización de potencia.

Una vez obtenidos los pesos complejos, se hace el procesado necesario considerando la geometría de la agrupación de antenas para posteriormente radiar la señal al usuario móvil de interés.

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar las características y modelado del algoritmo Zero-Forcing, y las ventajas que tiene sobre la respuesta natural de una agrupación de antenas.

Pero sobre todo evidenciar los casos en los que se presenta un incremento de potencia a la salida de la agrupación de antenas, situación ante la cual se podrá plantear un método para solucionar la interferencia con las celdas adyacentes.

Dicho método genera un compromiso en la potencia de salida de la agrupación de antenas.

## III.2 Parámetros utilizados por el algoritmo Zero-Forcing

Para poder generar los diagramas de radiación requeridos es necesario conocer los principales parámetros que están ligados al escenario en que se estará trabajando. Dichos parámetros son:

- Número de elementos de antena.

Es un parámetro propio de la agrupación, para efectos de simulación y análisis de las prestaciones del algoritmo de conformación se puede variar el número de elementos de antena para analizar el comportamiento de los diagramas de radiación. Define el número de nulos con el que contará el diagrama de radiación y por tanto, la cantidad de usuarios interferentes que podrán ser rechazados.

- Número de usuarios

Se asume un usuario de interés y los demás usuarios como interferentes. El número de usuarios que se tienen en la celda, dentro de la estructura celular, es muy importante para el algoritmo, ya que con esta información se conoce la cantidad de nulos que serán direccionados.

- Posición de los usuarios.

La posición de los usuarios es de gran importancia ya que a partir de esta información se generan los vectores de direccionamiento, que a su vez sirven para obtener el vector de pesos complejos. Recordar que la posición de los usuarios es obtenida en el enlace ascendente, y para el presente trabajo se considera un problema resuelto.

### III.3 Modelo matemático de Zero-Forcing

El modelo de algoritmo Zero-Forcing plantea una minimización de potencia a la salida de la agrupación de antenas, basada en las restricciones que se tienen para la potencia que tendrá el diagrama de radiación, en las ubicaciones en que estén posicionados los usuarios. El objetivo es apuntar el haz principal al usuario de interés y direccionar los nulos a los usuarios interferentes, cuyas potencias se encuentran contempladas en el vector  $f$ , llamado vector de restricciones, que aplicado al algoritmo Zero-Forcing quedará como:

$$\min_{w_{zf}} P(w_{zf}) \text{ sujeto a } \begin{cases} w_{zf}^H a(\theta_1) = 1 \\ w_{zf}^H a(\theta_2) = 0 \\ \dots \\ w_{zf}^H a(\theta_L) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

donde  $w_{zf}$  es el vector de pesos complejos, del cual cada valor corresponde a un elemento de la agrupación de antenas.

$$w_{zf} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \dots & w_L \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

$L$  es el número de usuarios,  $a(\theta_i)$  es el vector de direccionamiento al  $i$ -ésimo usuario que a su vez depende el número de elementos de antena  $N$ . Lo anterior se traduce en que el tamaño del vector de direccionamiento es de  $N$  elementos, como se muestra en la ecuación 18.

$$a(\theta_i) = \begin{bmatrix} 1 & e^{\frac{j2\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_i)} & e^{\frac{j4\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_i)} & \dots & e^{\frac{j2(N-1)\pi d}{\lambda} \text{sen}(\theta_i)} \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

Se utiliza un valor de separación entre elementos de antena  $d = \lambda/2$ , ya que en estudios sobre geometría de agrupaciones de antena se ha encontrado que es el valor que evita el fenómeno de acoplamiento mutuo entre elementos en una agrupación lineal con separación uniforme, como se muestra en Balanis [1997]. Sustituyendo  $d = \lambda/2$  en la ecuación 18, ésta se puede reescribir de la siguiente manera:

$$a(\theta_i) = \left[ 1 \quad e^{j\pi \text{sen}(\theta_i)} \quad e^{j2\pi \text{sen}(\theta_i)} \quad \dots \quad e^{j(N-1)\pi \text{sen}(\theta_i)} \right]^T \quad (19)$$

Las restricciones<sup>10</sup> mostradas en la ecuación 16 se agrupan en un vector, dicho vector es llamado vector de restricciones y se representa como  $f$ .

$$f = \left[ 1 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \right]^T \quad (20)$$

Los valores del vector de restricciones  $f$  se refieren a la potencia que se tendrá en la ubicación indicada por  $\theta_i$ , donde  $i$  es tanto el número de usuario, como la posición en dicho vector. El valor de 1 indica que se enviará la mayor cantidad de potencia en esa dirección y el 0 que se ubicará un nulo en la posición espacial correspondiente.

Los valores que se asignan al vector de restricciones son en escala lineal, es decir, para conocer la potencia en decibels que tendrá el diagrama de radiación es necesario convertirlos a dB. Importante es resaltar que el valor de 0 en la escala lineal no está definido para la escala logarítmica, así que por la modelación se asigna un valor muy bajo, alrededor de  $-300\text{dB}$ , que en escala lineal es lineal es  $1 \times 10^{-15}$ , un valor muy cercano a 0.

---

<sup>10</sup>Restricciones se refieren a los valores asignados a los elementos que conforman el vector de restricciones

Definiendo una matriz de direccionamiento  $A(\theta)$  en función de los vectores de direccionamiento  $a(\theta_i)$  se tiene la siguiente expresión:

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} a(\theta_1) & a(\theta_2) & \cdots & a(\theta_L) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde las dimensiones de la matriz de direccionamiento son  $N \times L$ , ya que los vectores de direccionamiento  $a(\theta_i)$  son de  $N \times 1$  y hay  $L$  vectores, tantos como el número de usuarios.

Las restricciones de la ecuación 16 se pueden escribir de forma vectorial como sigue:

$$w_{zf}^H A = f \quad (22)$$

Se utiliza  $A$  en lugar de  $A(\theta)$  para facilitar la escritura de las ecuaciones.

Para poder generar los diagramas de radiación solo se necesita obtener los valores del vector de pesos complejos  $w_{zf}$ , ya que la matriz de direccionamiento está dada directamente por la geometría de la agrupación de antenas, y  $f$  contiene las restricciones que se generan a partir de conocer la información obtenida en el enlace ascendente.

Los pesos complejos se obtienen despejando  $w_{zf}$  en la ecuación 22; utilizando pseudo-inversas para los vectores resultando la siguiente expresión:

$$w_{zf} = A (A^H A)^{-1} f \quad (23)$$

La respuesta de la agrupación; es decir, el modelo del diagrama de radiación se obtiene mediante la ecuación 24:

$$DR_z f = w_{zf}^H a(\theta) = \sum_{i=1}^N w_{zf_i} e^{j(i-1)\pi \text{sen}(\theta)} \quad (24)$$

En Nguyen y Faulkner [2000] se muestra que la densidad de potencia de salida de la agrupación de antenas se puede expresar como:

$$P_{zf}(\theta) = |DR_{zf}|^2 = (DR_{zf})(DR_{zf})^H = w_{zf}^H a(\theta) a^H(\theta) w_{zf} \quad (25)$$

La potencia total de la agrupación es el área bajo la curva, es decir la integral de la Ecuación 25, la cual tiene como solución:

$$P_{zf} = C \sum_{i=1}^N |w_{zf_i}|^2 \quad (26)$$

Donde  $C$  es una constante que depende de la geometría de la agrupación de antenas, pero que se puede prescindir de ella sin perder generalidad, obteniendo así la siguiente expresión para la potencia de salida total:

$$P_{zf} = |w_{zf}|^2 = w_{zf}^H \cdot w_{zf} \quad (27)$$

sustituyendo 23 en 27 y simplificando, resulta la siguiente expresión:

$$P_{zf} = f^H (A^H A)^{-1} f \quad (28)$$

en la cual la potencia de salida queda solamente en función del vector de restricciones  $f$  y de la matriz de direccionamiento  $A$ . Una vez conocido el vector de pesos se puede usar simplemente la ecuación 27 para calcular la potencia de salida total.

### III.4 Diagrama de radiación Zero-Forcing

Como ya se ha mencionado, para generar el diagrama de radiación Zero-Forcing solo es necesario obtener los pesos complejos mediante el modelo mostrado anteriormente. Es de gran importancia conocer los vectores de direccionamiento y el vector de restricciones, para poder generar dicho diagrama de radiación.

Recordar que los vectores de direccionamiento tienen implícita la posición espacial que tienen los usuarios, y con esta información se genera el vector de restricciones, para el direccionamiento tanto del haz principal como de los nulos.

El diagrama de radiación que se obtiene del algoritmo Zero-Forcing tiene como máximo 0dB de potencia, potencia que se encuentra en dirección al usuario de interés, mientras que los nulos tienen potencias por debajo de los  $-300$ dB. Los nulos serán direccionados a las ubicaciones espaciales donde se encuentren posicionados los usuarios interferentes, de esta manera se evita la interferencia en la celda en la que está ubicado el usuario de interés.

En la Figura 7 se muestra el diagrama de radiación Zero-Forcing para una agrupación de antenas de 8 elementos, el usuario de interés (mostrado como triángulo en dicha figura) está ubicado a  $0^\circ$  y no se direccionan los nulos. Se puede observar que la potencia del haz principal está en 0dB, mientras que los lóbulos laterales mayores tienen alrededor de 12dB de potencia (que son los lóbulos ubicados inmediatamente al lado del haz principal) y los nulos tienen una profundidad de  $-300$ dB aproximadamente.

En la Figura 7 no se muestra la profundidad de los nulos en la imagen pero posteriormente se mostrará el comportamiento de la profundidad de un nulo, cuando se haga un barrido en la posición espacial ubicando dicho nulo.

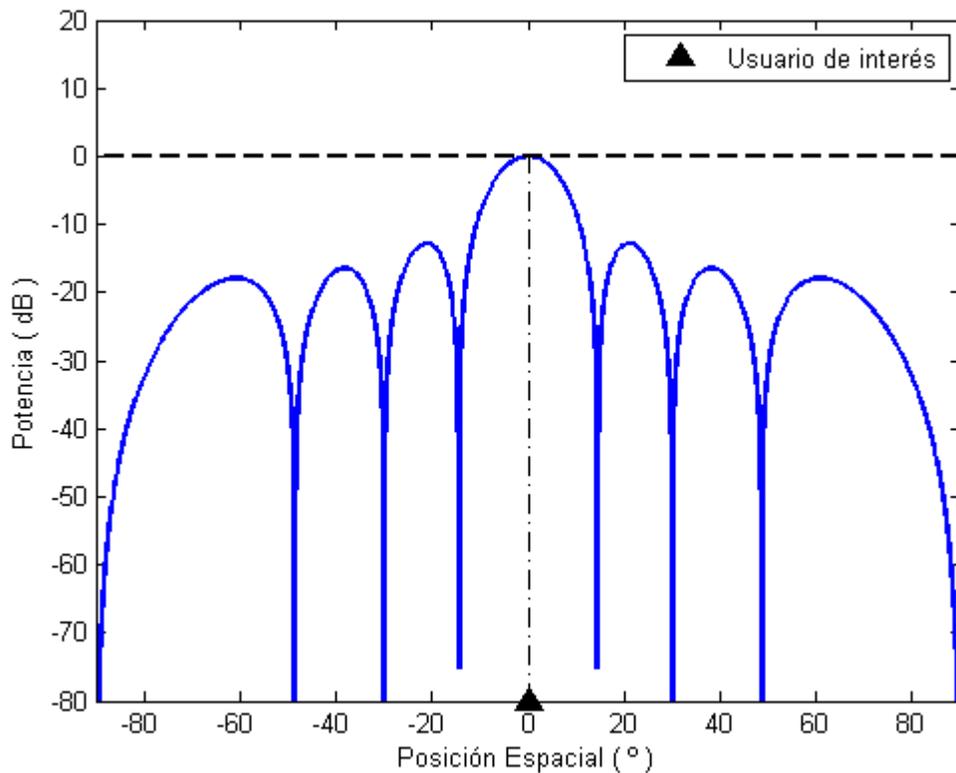


Figura 7. Diagrama de radiación Zero-Forcing para una agrupación de 8 elementos de antena

El ancho de haz del diagrama de radiación de la figura anterior es de aproximadamente  $30^\circ$ . El ancho de haz varía conforme cambia el número de elementos de antena.

El diagrama de radiación Zero-Forcing tiene una mejor prestación, con respecto al diagrama de radiación de respuesta natural, en lo que a la reducción de potencia se refiere, se puede hacer la comparación entre ambos cuando con el algoritmo Zero-Forcing se dirige el haz principal a  $0^\circ$  y sin direccionar nulos.

En la Figura 8 se observa que para una agrupación de 16 elementos de antena se tiene una reducción de aproximadamente 24dB en el haz principal.

Con esta comparación podemos aseverar que Zero-Forcing ayuda a reducir la interferencia intercelda, dada la reducción de potencia que presenta con respecto a la respuesta natural de la agrupación de antenas.

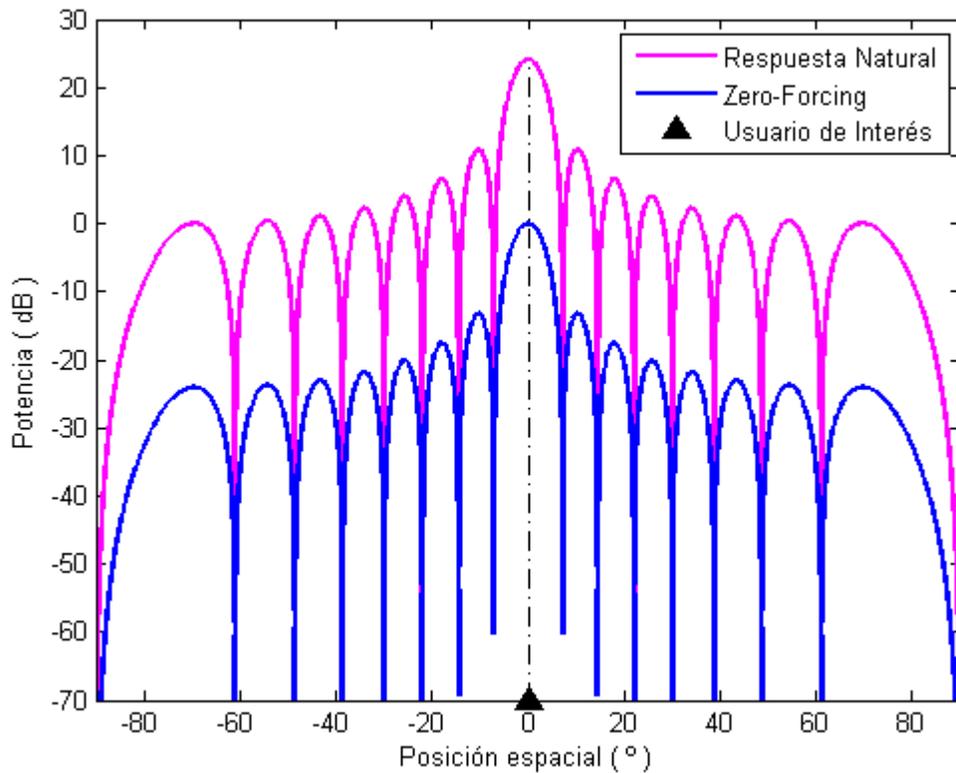


Figura 8. Comparación del diagrama de radiación Zero-Forcing con el diagrama de radiación de respuesta natural de una agrupación de 16 elementos de antena.

La potencia del haz principal en la respuesta natural de una agrupación de antenas depende del número de elementos de antena; dicha potencia aumenta conforme aumenta el número de elementos, situación completamente esperada, ya que se superponen más diagramas de radiación por existir más elementos de antena (un diagrama omnidireccional por cada elemento).

En la Figura 9 se puede observar que el comportamiento de la potencia del haz principal de la respuesta natural de la agrupación aumenta conforme aumenta el número de elementos de antena. Para Zero-Forcing la potencia del haz principal se mantiene constante en 0dB.

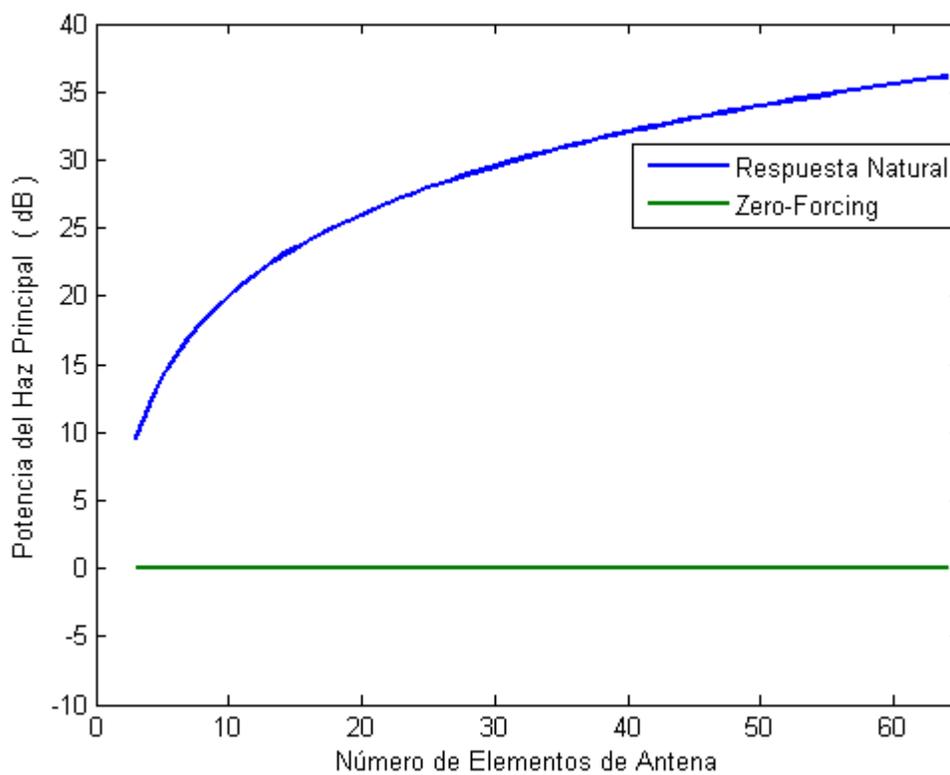


Figura 9. Relación entre número de elementos de antena y potencia del haz principal; tanto en la respuesta natural de una agrupación de antenas como en Zero-Forcing.

La potencia total irradiada por la agrupación de antenas aumenta con el número de elementos de antena, al igual que el haz principal, debido a que en la respuesta natural todos los elementos de antena radían la misma potencia. En el caso de la conformación Zero-Forcing, por tener un modelado de minimización de potencia, y por tener restricciones de mantener la potencia de haz principal a 0dB, la potencia decrece al aumentar el número de elementos de antena.

La Figura 10 compara la potencia de salida total de una agrupación de antenas en respuesta natural con la salida de la misma antena utilizando el algoritmo Zero-Forcing.

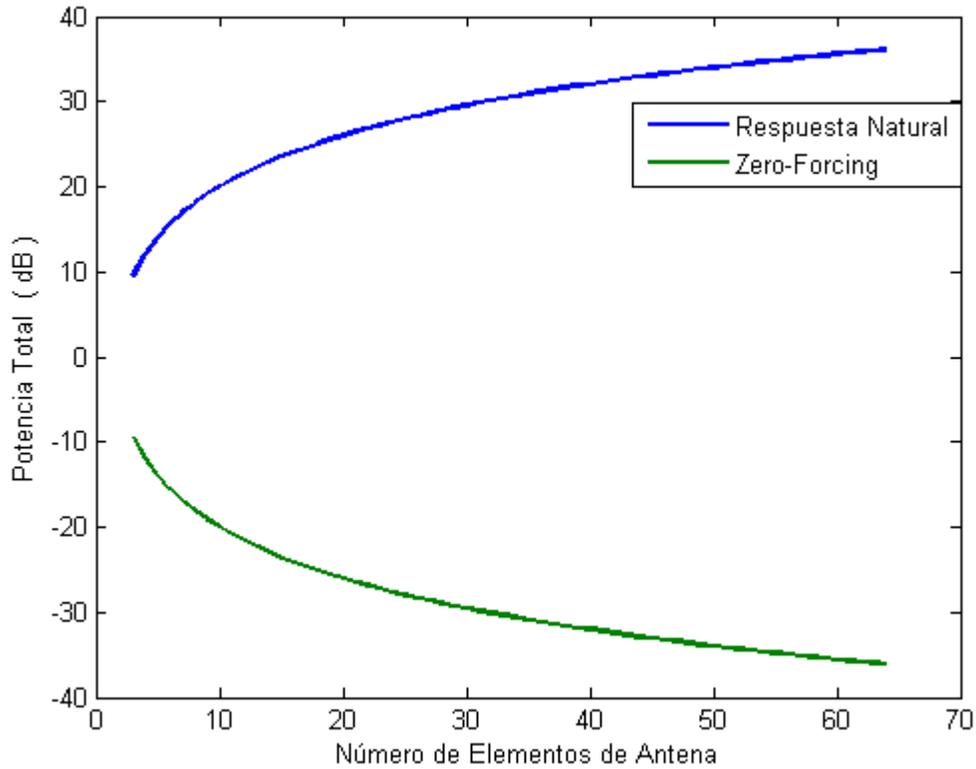


Figura 10. Potencia de salida total de la agrupación de antenas respecto al número de elementos de antena, para la respuesta natural y para Zero-Forcing.

En la Figura anterior se puede observar, que al contrario, en la respuesta natural de una agrupación de antenas, que incrementa la potencia cuando se incrementa el número de elementos de antena, la respuesta de la agrupación de antenas con el algoritmo Zero-Forcing la potencia de salida total se decrementa. Sin embargo en la escala lineal el incremento que se presenta en la respuesta natural de la agrupación de antenas correspondiente a 40 elementos, es de 100; y el decremento para el algoritmo Zero-Forcing en la escala lineal, con una agrupación de 40 elementos es de 0.01.

### III.5 Direccionamiento de haz principal

En el vector de restricciones  $f$  se ubica el valor de 1 para el usuario de interés quedando su representación matemática de la siguiente forma:

$$w_z^H a(\theta_1) = 1 \quad (29)$$

en donde  $\theta_i$  es la ubicación espacial del usuario de interés (a lo largo de este trabajo la ubicación del usuario de interés será  $0^\circ$ , a menos que se indique lo contrario), en este caso  $A(\theta) = a(\theta_1)$  y  $f = 1$ , ya que solo se tiene una restricción. El diagrama de radiación para dicha restricción, con una agrupación con 3 elementos de antena es el siguiente:

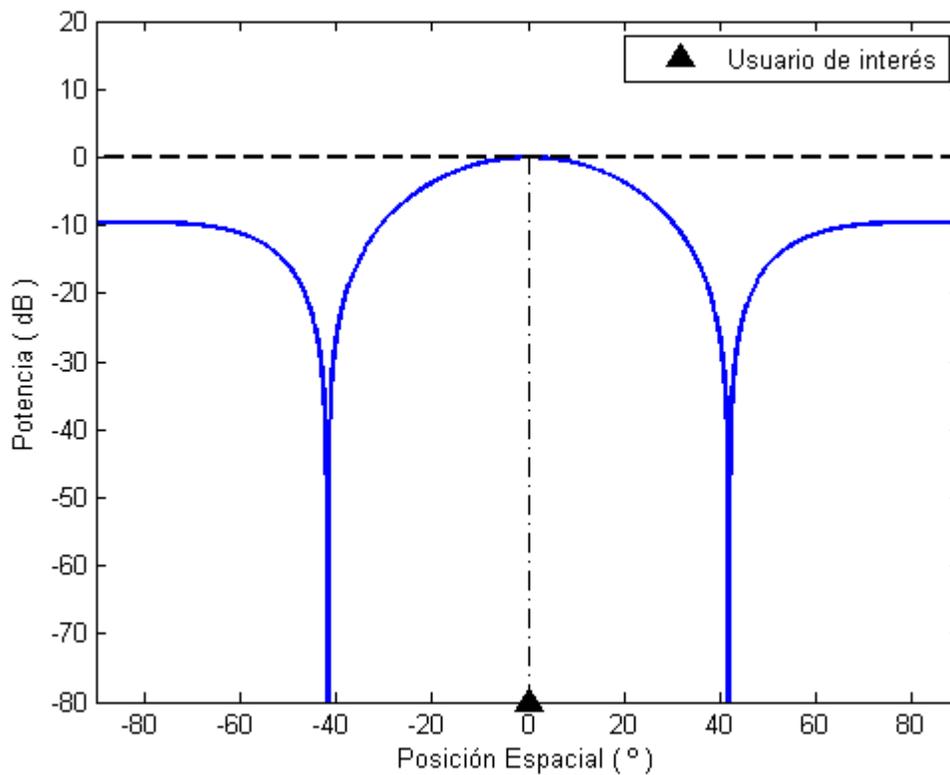


Figura 11. Diagrama de radiación Zero-Forcing para una agrupación de 3 elementos de antena y sin direccionamiento de nulos.

De la Figura 11 se puede comprobar que la potencia del haz principal se mantiene en 0dB.

Aunque es posible apuntar el haz principal en cualquier dirección dentro de la ventana de visibilidad del la agrupación de antenas, en este trabajo de investigación se estará considerando al usuario de interés en la ubicación espacial de  $0^\circ$ , por lo tanto el haz principal se direccionará a esa posición. En la Figura 12 se ilustra lo anteriormente mencionado, la posibilidad de direccionar el haz principal a una dirección diferente de  $0^\circ$ , en este caso a  $15^\circ$ .

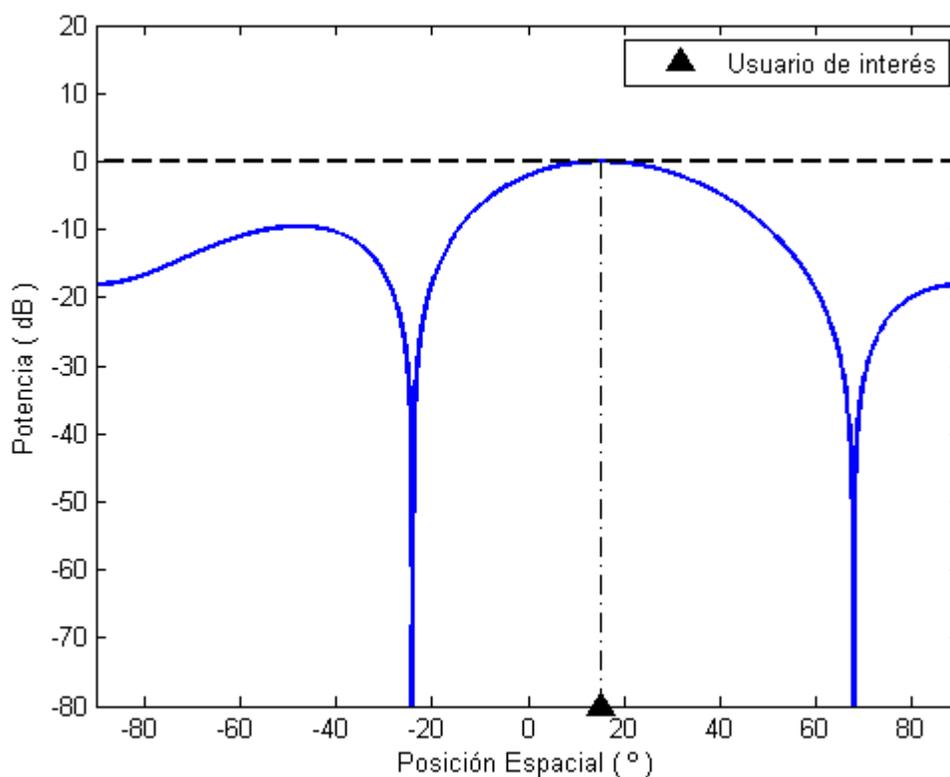


Figura 12. Diagrama de radiación Zero-Forcing para una agrupación de 3 elementos de antena, direccionando el haz principal a  $15^\circ$ .

El diagrama de radiación mostrado direcciona el haz principal hacia  $15^\circ$  donde se encuentra ubicado el usuario de interés, el diagrama de radiación tiene 0dB en esa

dirección. Se puede notar que los lóbulos laterales ya no son simétricos, y es una situación que se presenta al cambiar varios parámetros del diagrama de radiación con respecto al diagrama de radiación de la respuesta natural de la agrupación de antenas.

Tener la capacidad de direccionar el haz principal es muy importante. Dada la movilidad del usuario de interés existe la necesidad de poder direccionar el haz principal a cualquier dirección a la que el usuario se dirija, siempre y cuando dicho usuario se mantenga dentro de la ventana de visibilidad de la agrupación de antenas.

Al tener más de un usuario en la celda bajo análisis, se puede dar el caso de que los lóbulos laterales del diagrama de radiación se encuentren direccionados a las posiciones donde los usuarios interferentes estén ubicados. El que los lóbulos laterales estén direccionados hacia los usuarios interferentes provoca que exista interferencia en la celda y por lo tanto la calidad del servicio brindado decae.

Para evitar la interferencia dentro de la celda que se está analizando, se dirigen los nulos del diagrama de radiación hacia los usuarios interferentes, como se mostrará en la siguiente sección.

Es importante tener en cuenta que el tamaño en el número de elementos de la agrupación de antenas influye en la cantidad de nulos con los que contará el diagrama de radiación; y por lo tanto en la cantidad de usuarios interferentes que se podrán rechazar.

Es también de importancia definir el número de usuarios que se tendrán dentro de la celda, para así establecer en número de elementos de antena que tendrá la agrupación.

### III.6 Direccionamiento de nulos

Se vio en la sección anterior, que para direccionar el haz principal, se utiliza una restricción que indica la potencia que tendrá el diagrama de radiación hacia el usuario de interés. Es importante tener presente que la potencia máxima que se permite en la celda es de 0dB, por lo tanto es la potencia que se envía al usuario de interés.

Si se quieren ubicar nulos se agrega una restricción con la posición espacial en la cual se quiere colocar cada nulo y se iguala a 0. Por ejemplo si se van a ubicar dos nulos, las restricciones quedan de la siguiente manera:

$$w_z^H a(\theta_1) = 1$$

$$w_z^H a(\theta_2) = 0$$

$$w_z^H a(\theta_3) = 0$$

$\theta_2$  y  $\theta_3$  son las ubicaciones espaciales hacia donde se dirigirán los nulos, es por eso que esas restricciones están igualadas con 0. Recordar que  $w_z$  es el vector de pesos complejos y  $a(\theta_i)$  es el vector de direccionamiento para el  $i$  -ésimo usuario.

El número de elementos de antena es de gran importancia en este momento, ya que el número de nulos con el que cuenta el diagrama de radiación depende directamente del número de elementos de antena, como lo muestra la siguiente expresión:

$$\text{número de nulos} = \text{número de elementos de antena} - 1$$

Por ejemplo, si se tiene una agrupación de antenas con 16 elementos, se tendrán 15 nulos en el diagrama de radiación y por lo tanto 15 usuarios interferentes pueden ser rechazados teóricamente.

La profundidad de los nulos con el algoritmo de Zero-Forcing se encuentra por lo general por debajo de los  $-300\text{dB}$ , solo cuando el nulo se posiciona muy cerca del usuario de interés la potencia sube un poco, a lo más a  $-280\text{dB}$ .

Haciendo un barrido en la posición de un nulo se encontró que aunque el usuario interferente se encuentre muy cerca del de interés la profundidad de los nulos no se ve afectada, por lo menos no tiene una gran repercusión, pues como se muestra en la Figura 13, la profundidad de los nulos siempre está entre  $-360$  y  $-280\text{dB}$ .

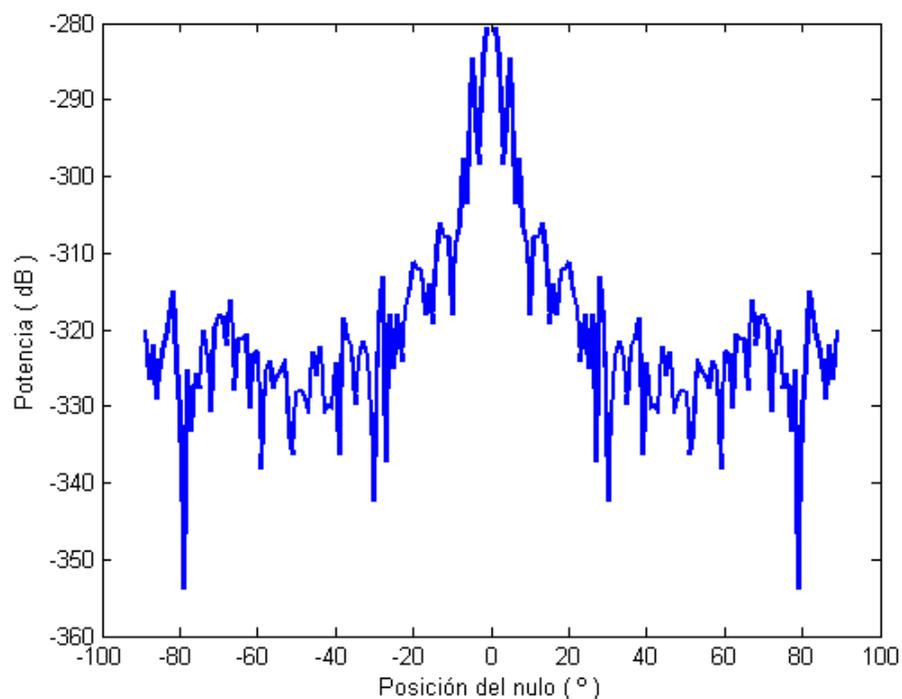


Figura 13. Profundidad de nulos para una agrupación de 3 elementos de antena, utilizando el algoritmo Zero-Forcing

La potencia máxima que se busca tener en la profundidad de nulos para poder cancelar un interferente es de  $-40\text{dB}$ , por lo que el algoritmo en ese sentido tiene bastante holgura.

A continuación se mostrará el diagrama de radiación, para una agrupación de 3 elementos de antena, dirigiendo dos nulos; uno a  $-40^\circ$  y otro a  $15^\circ$ , el usuario de interés se encuentra a  $0^\circ$ .

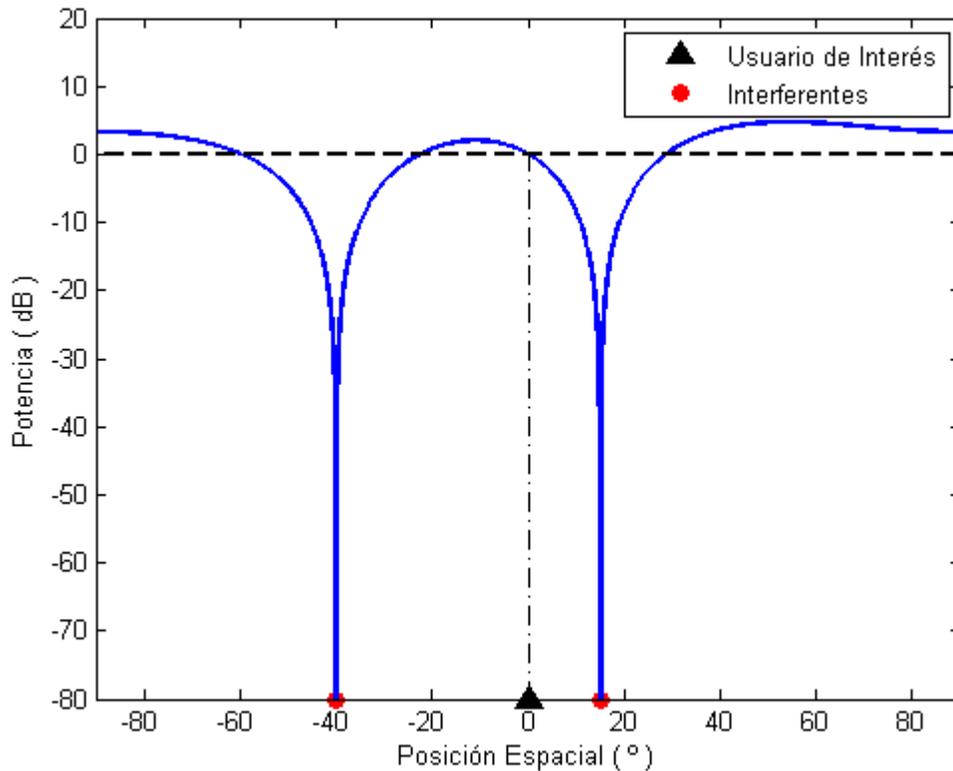


Figura 14. Diagrama de Radiación Zero-Forcing para una agrupación de 3 elementos de antena, dirigiendo nulos a  $-45^\circ$  y a  $15^\circ$ .

De la figura anterior se puede observar que el diagrama de radiación se “mueve” hacia la izquierda, para poder cumplir con las restricciones. Ésto sucede cuando se pasa un umbral de cercanía entre usuario de interés e interferente. Cuando la distancia es menor a dicho umbral se presenta un incremento en la potencia de salida, ésto tiene un efecto negativo en el sistema ya que provoca interferencia con las celdas adyacentes.

La cercanía que puede tener el usuario de interés con los usuarios interferentes, depende del ancho de haz principal que tenga el diagrama de radiación y del número de elementos de antena. El ancho de haz se reduce conforme se aumenta el número de elementos de antena, como se muestra en la Figura 15.

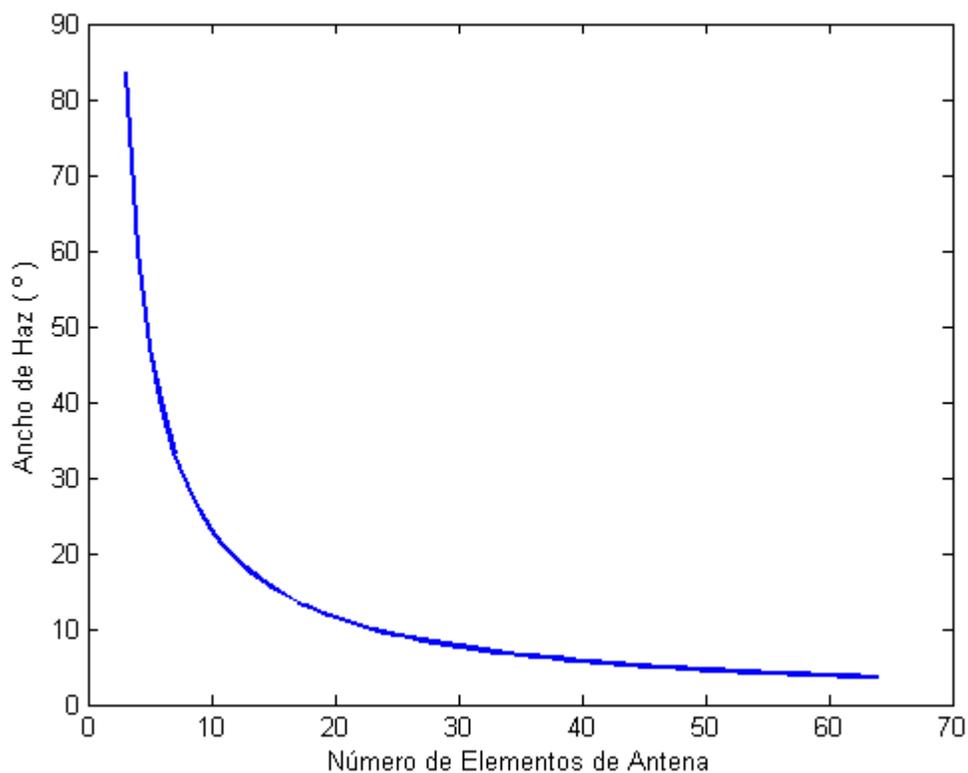


Figura 15. Ancho de haz principal con respecto al número de elementos de antena.

El ancho de haz es el mismo tanto en la respuesta natural de la agrupación de antenas, como con el algoritmo Zero-Forcing. La reducción en el ancho de haz es grande cuando son pocos los elementos (alrededor de  $23^\circ$  al pasar de 3 a 4 elementos de antena, y aproximadamente  $13^\circ$  entre 4 y 5 elementos). A partir de los 20 elementos de antena la reducción es muy pequeña conforme se aumenta el número de elementos de antena (menos de  $1^\circ$ ).

Como se mencionó, la cercanía entre usuarios (sin generar exceso de potencia) depende del ancho de haz, ya que al intentar ubicar un nulo en una posición donde está el haz principal, el diagrama de radiación se mueve en dirección contraria a donde se ubicó el nulo pero se debe mantener la potencia al usuario de interés. Ésto hace que se incremente la potencia, que se encuentre más allá de los 0dB, y provoca interferencia con las celdas adyacentes.

En la figura 16 se muestra la mayor distancia entre usuarios interferentes y de interés donde comienza a existir exceso de potencia, distancias menores a éstas tienen aún mayor exceso de potencia. En la curva mostrada se muestran las distancias entre usuarios que provocan un incremento de potencia de 0.5dB.

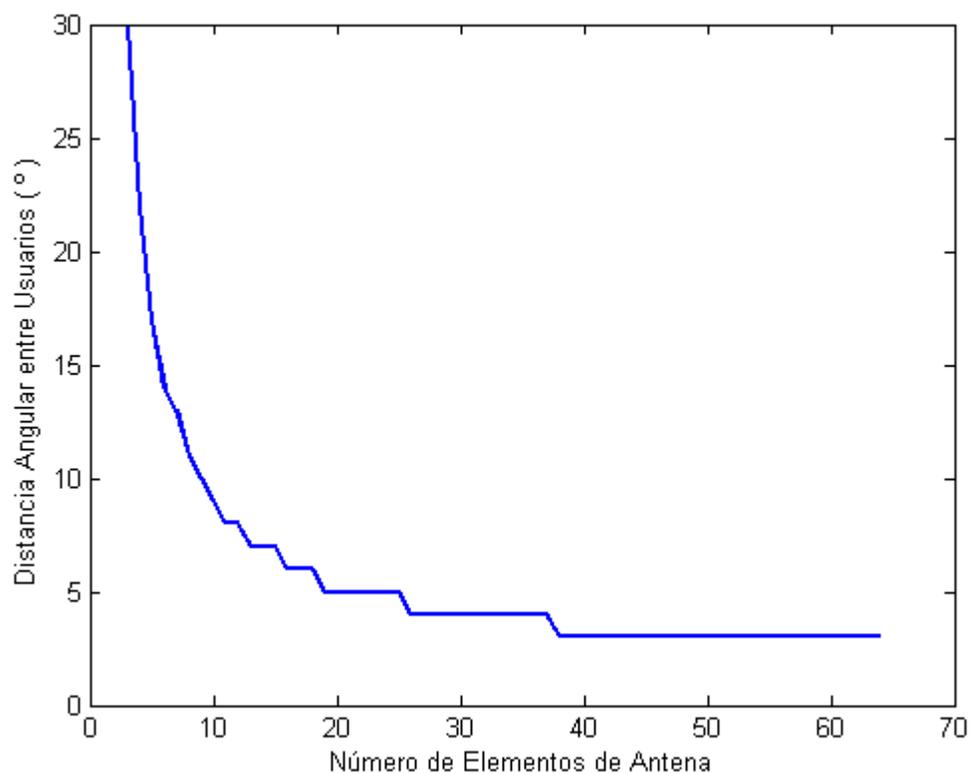


Figura 16. Umbral de separación entre usuario de interés e interferente donde empieza a existir incremento en la potencia.

En agrupaciones de hasta 18 elementos de antena con distancias entre usuarios de 5° existe incremento en la potencia a la salida de la agrupación de antenas.

Se encontró que a menor número de elementos de antena, la distancia entre usuario de interés, e interferente, debe ser mayor que para agrupaciones con más elementos para no provocar una potencia de salida mayor a 0dB.

Desde 3 hasta 10 elementos de antena la distancia del umbral de incremento de potencia siempre cambia. A partir de los 11 elementos de antena las distancias permanecen para algunas agrupaciones con diferente cantidad de elementos de antena, después cambia de nuevo. Existen rangos del número de elementos de antena que mantienen el mismo umbral.

La siguiente tabla muestra más claramente lo anterior:

Tabla II. Umbral cercanía entre usuarios donde se provoca un incremento de potencia de salida de la agrupación de antenas

Número de elementos	Distancia entre usuarios	Número de elementos	Distancia entre usuarios
3	29	10	8
4	21	11 - 12	7
5	16	13 - 15	6
6	13	16 - 18	5
7	12	19 - 25	4
8	10	26 - 37	3
9	9	38 - 64	2

El comportamiento de las distancias en agrupaciones con más de 11 de elementos, se puede explicar con la Figura 15, en la cual se puede observar que el ancho de haz varía muy poco en agrupaciones con mas de 10 elementos.

### III.7 Potencia en exceso

La potencia en exceso a la salida depende tanto del posicionamiento de los nulos, como del número de elementos de antena. La Figura 17 muestra cómo se comporta la potencia de salida de la agrupación de antenas con respecto al número de elementos que ésta tiene.

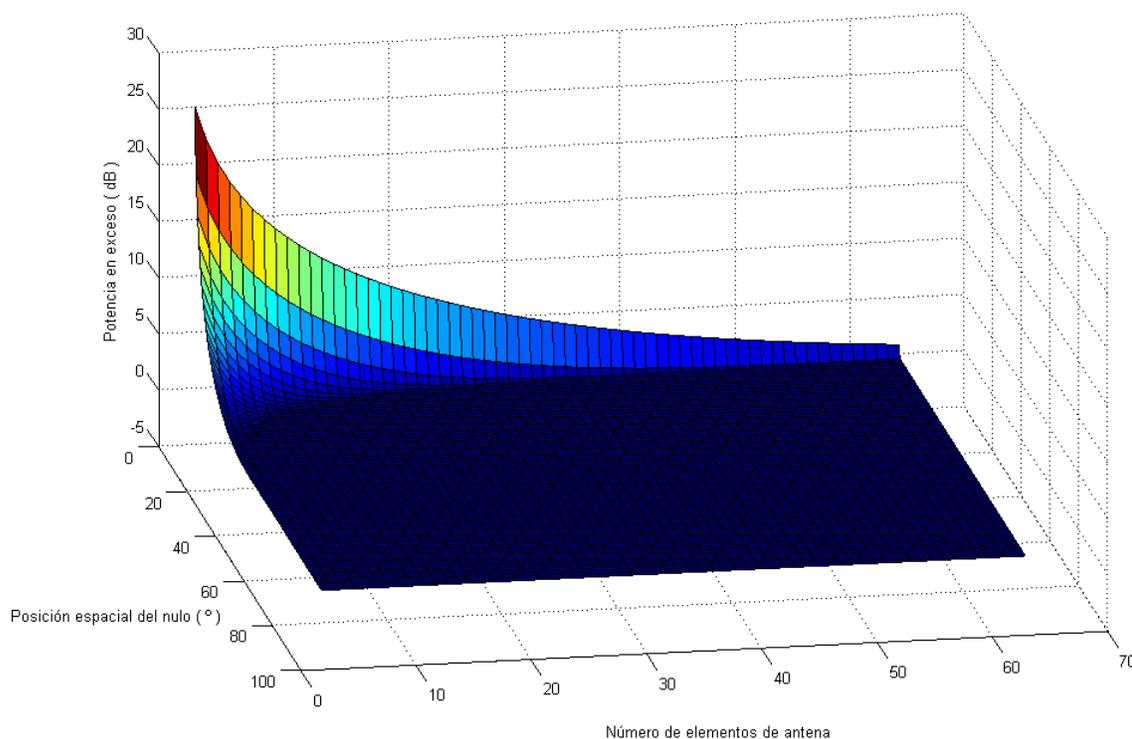


Figura 17. Potencia de salida respecto al número de elementos de la agrupación y la ubicación de un nulo.

Se puede ver que para agrupaciones de pocos elementos de antena se encuentran más zonas con exceso de potencia, sin embargo en agrupaciones muy grandes también se puede ver el exceso al ubicar un nulo muy cerca del usuario de interés (1 o 2°), situación que no se llegaría a dar en la realidad.

En caso de tener un usuario muy cerca del usuario de interés, a la distancia angular mencionada, se utilizaría alguna otra técnica para ignorar a dicho usuario en el diagrama de radiación correspondiente<sup>11</sup>. Una de las razones es que por la forma que tomaría el diagrama de radiación se podría dar el caso de que no se atiende al usuario de interés, ya que el cambio entre la potencia que se dirige a dicho usuario de interés y la potencia que tienen los nulos es bastante abrupto.

Además también depende de la resolución que tenga el algoritmo de detección de arriba para conocer las posiciones de los usuarios, puede ser que no se distinga entre usuario de interés e interferente.

En todo caso, para agrupaciones con pocos elementos de antena; es decir, cuando se presente incremento de potencia estando el usuario de interés cerca del usuario interferente (a 5° o poco más), se pueden utilizar las restricciones de potencia para manipular el diagrama de radiación y adaptarlo a reducir la potencia en exceso que se presenta, aún utilizando Zero-Forcing.

## III.8 Conclusiones

Se realizó una investigación y un análisis profundo del modelado matemático del algoritmo Zero-Forcing para la conformación digital de haz. Igualmente se realizó la simulación necesaria para la evaluación del comportamiento de dicho algoritmo, en lo que a generación del diagrama de radiación se refiere.

Se encontró que la potencia de salida de la agrupación de antenas disminuye cuando se aumenta el número de elementos a antena, al contrario de lo que sucede en la respuesta natural de la agrupación de antenas. Recordar que la modificación del número

---

<sup>11</sup>El presente trabajo no aborda técnicas que ayuden a ignorar a usuarios de interferentes que se ubiquen muy cercanos al usuario de interés.

de elementos de antena es muy recomendable para conocer el comportamiento del algoritmo mediante la simulación, pero resulta impráctico realizarlo en una antena física.

Cuando los usuarios interferentes se encuentran muy cerca del usuario de interés, existe un incremento en la potencia de salida de la agrupación de antenas. Dicha potencia excedente causa interferencia con las celdas adyacentes, por tal motivo es necesario reducirla. La potencia en exceso depende de la cercanía de los usuarios, de interés e interferente; pero también del número de elementos de antena.

Se encontró que a menor número de elementos de antena es mayor el incremento de potencia cuando la separación entre usuarios es la misma, y es mayor aún cuando el interferente se acerca más al usuario de interés.

Por los efectos en la potencia de salida mencionados, es necesario implementar un método que ayude a eliminar la potencia de salida excedente en agrupaciones pequeñas. Utilizando las restricciones del modelo del algoritmo Zero-Forcing se encuentra una posible solución, que se mostrará en capítulo siguiente.

## Capítulo IV

# Algoritmo para la modificación de profundidad de nulos en la conformación digital de haz Zero-Forcing

### IV.1 Introducción

En ocasiones cuando el usuario interferente se encuentra muy cerca del usuario de interés, y cuando el número de elementos de la agrupación de antenas es reducido (entre 3 y 5 elementos), se presenta un incremento en la potencia de salida total de la agrupación de antenas. Como se ha mencionado dicho incremento en la potencia de salida se traduce en un efecto indeseado debido a la interferencia que se provoca con las celdas adyacentes.

El conformador digital de haz Zero-Forcing es un método muy versátil, ya que las restricciones que se contemplan en el modelado de esta técnica de conformación, definen la potencia que tendrá el diagrama de radiación en la posición espacial que involucra la restricción en cuestión.

En el presente capítulo se mostrará una novedosa técnica que consiste en cambiar la profundidad de los nulos, esto implica que se aumente la potencia en la ubicación del nulo a cambio de reducir la potencia de salida del haz principal, la cual provoca la interferencia con las celdas adyacentes. Se aborda directamente el compromiso que existe entre la profundidad de nulos y la reducción de potencia, en un análisis completo del modelado, implicaciones y resultado de las simulaciones del algoritmo.

## IV.2 Modelo matemático del algoritmo de modificación de profundidad de nulos

Al ser una modificación del algoritmo Zero-Forcing, el modelo matemático del algoritmo de modificación de profundidad de nulos mantiene las restricciones, solamente que para este método se utilizan valores que pueden ir entre 0 y 1, a diferencia de Zero-Forcing que debe ser uno u otro.

Se utilizará  $w_{ND}$ <sup>12</sup> para representar los pesos complejos que resulten del algoritmo de modificación de profundidad de nulos.

El modelo del algoritmo de modificación de profundidad de nulos que se propone es el siguiente:

$$\min_{w_{ND}} P(w_{ND}) \text{ sujeto a } \begin{cases} w_{ND}^H a(\theta_1) = \delta_1 \\ w_{ND}^H a(\theta_2) = \delta_2 \\ \dots \\ w_{ND}^H a(\theta_L) = \delta_L \end{cases} \quad (30)$$

donde  $\delta_i$  se refiere a la profundidad del nulo del  $i$ -ésimo usuario.

Al igual que en el algoritmo Zero-Forcing  $a(\theta_i)$  es el vector de direccionamiento para el  $i$ -ésimo usuario.

$w_{ND}$  es el vector de pesos complejos del algoritmo de modificación de profundidad de nulos.

$L$  es el número de usuarios en la celda de interés.

$i = 2, \dots, L$ , se refiere a los usuarios interferentes, ya que el usuario de interés tiene el valor de  $i = 1$ .

---

<sup>12</sup>El subíndice  $ND$  es por la traducción al inglés de “profundidad de nulo”, Null Depth.

Por lo tanto la primera restricción es igual a 1, debido a que es el usuario de interés, por lo que se asignarán 0dB de potencia.

La profundidad de los nulos  $\delta_i$  se modela como una señal con amplitud y fase:

$$\delta_i = |\delta_i| e^{j\phi_i} \quad (31)$$

donde  $|\delta_i|$  representa la amplitud del  $i$ -ésimo nulo, y  $\phi_i$  su fase. Dado su modelo,  $\delta_i$  es un número complejo.

Con los valores de  $\delta_i$  se crea el vector de restricciones  $f_{ND}$ , el cual al igual que en el algoritmo Zero-Forcing está compuesto por unos y ceros. El modelo del vector de restricciones en función del nuevo parámetro se muestra a continuación:

$$f_{ND} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_2 & \cdots & \delta_L \end{bmatrix} \quad (32)$$

Una vez definido el vector de restricciones  $f$ , y utilizando la matriz de direccionamiento  $A(\theta)$  (Ecuación 21); se obtiene el vector de pesos complejos para el algoritmo de modificación de profundidad de nulos, de manera semejante que  $w_{zf}$ .

$$w_{ND} = A (A^H A)^{-1} f_{ND} \quad (33)$$

Y del mismo modo se obtiene la potencia de salida  $P_{ND}$ :

$$P_{ND} = w_{ND}^H w_{ND} = f_{ND}^H (A^H A)^{-1} f_{ND} \quad (34)$$

Como se puede observar en la Ecuación 34 la potencia total de salida de la agrupación de antenas puede ser calculada directamente con el vector de pesos  $w_{ND}$ , o bien utilizando las restricciones  $f$  y la matriz de direccionamiento  $A$ .

### IV.3 Diagrama de radiación con modificación de profundidad de nulos

El diagrama de radiación resultado de aplicar el algoritmo de modificación de profundidad de nulos, es muy semejante al diagrama de radiación Zero-Forcing, ya que la modificación de profundidad de nulos está basada en el modelo de restricciones de Zero-Forcing.

Como se mostró en el modelado, la idea de poner restricciones diferentes de cero es definir una potencia para la profundidad de los nulos, para así no obligar al haz principal del diagrama de radiación a ser más estrecho que en su respuesta natural.

Para observar las mejoras en las prestaciones, se compara el diagrama de radiación de Zero-Forcing con el diagrama de radiación del algoritmo de modificación de profundidad de nulos; lo anterior en función de los parámetros presentados en la siguiente tabla:

Tabla III. Parámetros para la comparación del diagrama de radiación Zero-Forcing con el de modificación de profundidad de nulos.

Parámetro	Valor
Número de elementos de antena ( $N$ )	3
Número de usuarios ( $L$ )	2
Posición del usuario de interés ( $\theta_1$ )	$0^\circ$
Posición del interferente ( $\theta_2$ )	$10^\circ$
Profundidad de nulos	-40, -10 dB

Se tienen dos usuarios en la celda, uno será el usuario de interés, aquel que estará siendo atendido por la estación base, y que su posición espacial es  $0^\circ$ ; y el otro, un usuario interferente ubicado en posición espacial a  $10^\circ$ , dirección a la cual será direccionado un nulo del diagrama de radiación.

Se utiliza una agrupación de 3 elementos de antena, debido a que es más sencillo observar la potencia de salida que se incrementa en la agrupación de antenas. Dado el tamaño de la agrupación de antenas se pueden dirigir 2 nulos, en este caso solo se utiliza uno, direccionado hacia donde se encuentra el usuario interferente,  $10^\circ$ .

La profundidad del nulos se manejará para un caso con un valor de  $-40\text{dB}$ ; y para otro caso  $-10\text{dB}$  con el fin de observar el comportamiento del algoritmo de modificación de profundidad de nulos. La figura 18 muestra dicha respuesta

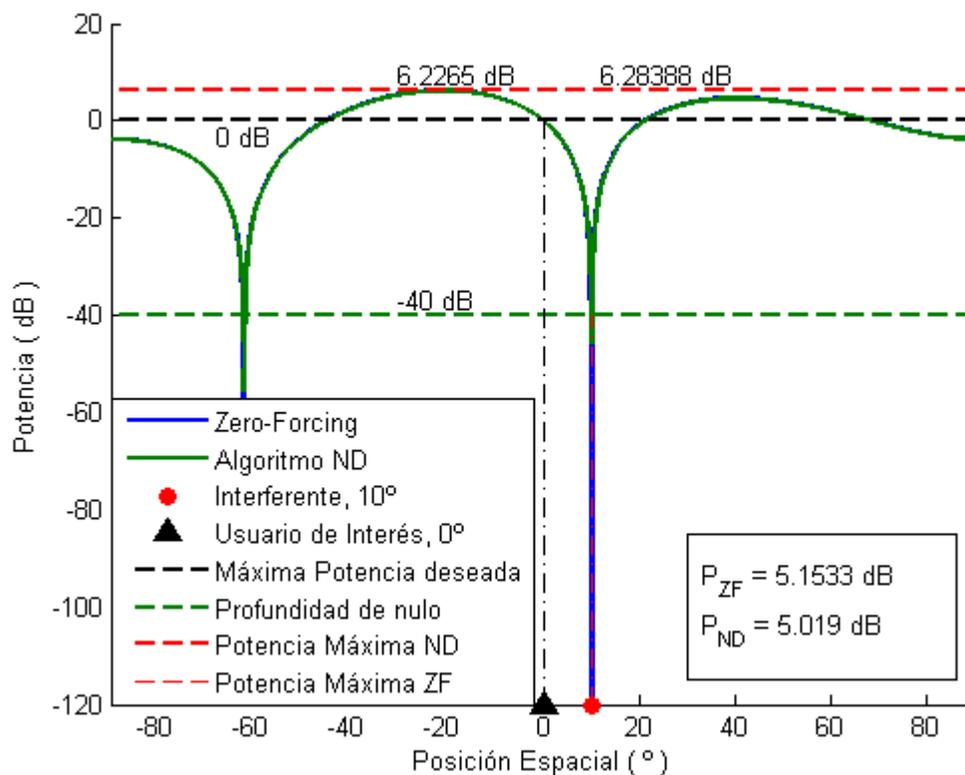


Figura 18. Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a  $10^\circ$ , y profundidad de nulos de  $-40\text{dB}$

Como se puede observar los diagramas de radiación son muy similares, la diferencia radica en la profundidad de los nulos; mientras que para Zero-Forcing es menor de  $-300\text{dB}$ , para el algoritmo de modificación de profundidad de nulos es de  $-40\text{dB}$ .

Lo anterior implica que la potencia de salida total de la agrupación de antenas sea diferente para cada uno de los algoritmos; en Zero-Forcing es de 5.15dB, y para el algoritmo de modificación de profundidad de nulos es de 5.01dB. La potencia del haz principal es de 6.22 y 6.28dB, para el algoritmo de modificación de profundidad de nulos y Zero-Forcing respectivamente.

Para poder entender mejor el comportamiento del diagrama de radiación del algoritmo de modificación de profundidad de nulos se mostrará ahora una gráfica con una profundidad de nulos de  $\delta = -10$ dB.

En la Figura 19 se muestran los diagramas de radiación Zero -Forcing y del algoritmo de modificación de profundidad de nulos.

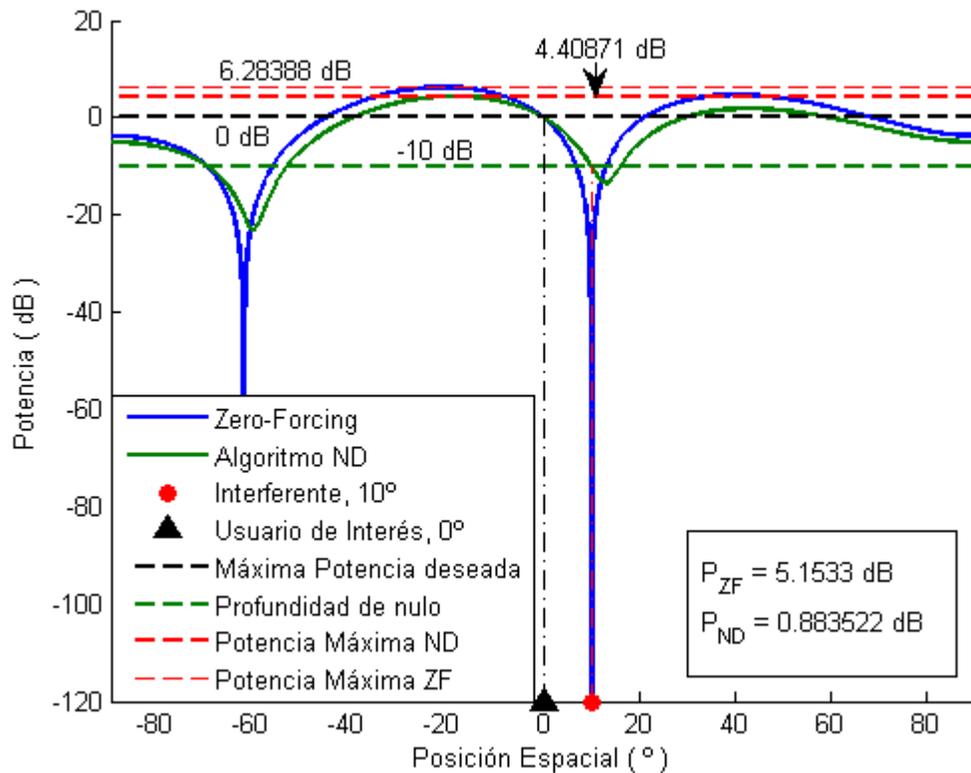


Figura 19. Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a  $10^\circ$ , y profundidad de nulos de  $-10$ dB

A diferencia de la figura 18 se pueden observar ambos diagramas de radiación y comprobar que la potencia de salida del haz principal, es menor para el diagrama de radiación del algoritmo de modificación de profundidad de nulos (6.28dB para Zero-Forcing y 4.4dB para el de nulos modificados). Además se observa que la potencia de salida se reduce aún más que en el caso anterior.

Es importante tener en cuenta que al igual que en las restricciones de Zero-Forcing, los valores deben escribirse en escala lineal, de la siguiente forma:

$$\delta_i (lin) = 10^{\delta_i (dB)/20} \quad (35)$$

de donde resulta que el valor para la profundidad del nulo<sup>13</sup> es  $10^{-40/20}$ .

La potencia que se entrega al usuario de interés es la misma para los dos algoritmos y cumple con la restricción de que ésta sea de 0dB. La potencia que se fijó para ser dirigida en dirección al usuario interferente también se cumple; sin embargo, no es un nulo del diagrama de radiación.

De acuerdo a la Figura 19, se puede analizar mejor el comportamiento del algoritmo de modificación de nulos, y en general de las restricciones del algoritmo de conformación de haz digital Zero-Forcing. El valor numérico que se asigna en las restricciones es el valor que tendrá el diagrama de radiación en esas ubicaciones, sin que esto signifique que el nulo se mantendrá en esa ubicación.

El algoritmo de modificación de profundidad de nulos intenta mantener la forma del diagrama de radiación, pero al adaptar ciertos puntos a potencias establecidas éste se desplaza, y debido a que se intenta establecer potencias bajas que no producen interferencia hacia los usuarios, los nulos se encuentran cerca de esas ubicaciones.

---

<sup>13</sup>Nótese que en este caso se están utilizando valores reales para  $\delta_i$  lo que implica que la fase del  $i$ -ésimo nulo es  $\phi_i = 0$ . Por lo tanto  $\delta_i$  representa solamente la amplitud de dicho nulo,  $|\delta_i|$ .

## IV.4 Potencia de Salida del algoritmo de modificación de nulos

La potencia de salida está en función de  $\delta$ , por lo tanto de  $|\delta|$  y  $\phi$  dado el modelo, tal como se mencionó en la sección IV.2.

Para el caso específico de una agrupación de antenas de 3 elementos, el usuario de interés se ubica espacialmente en  $0^\circ$  y un usuario interferente en  $10^\circ$  (se direcciona solamente un nulo a  $10^\circ$ ); y haciendo un barrido tanto en amplitud  $|\delta|$  como en fase  $\phi$  del nulo, se obtiene la potencia de salida  $P_{ND}$  para cada valor de  $w_{ND}$ . El resultado se muestra en la Figura 20.

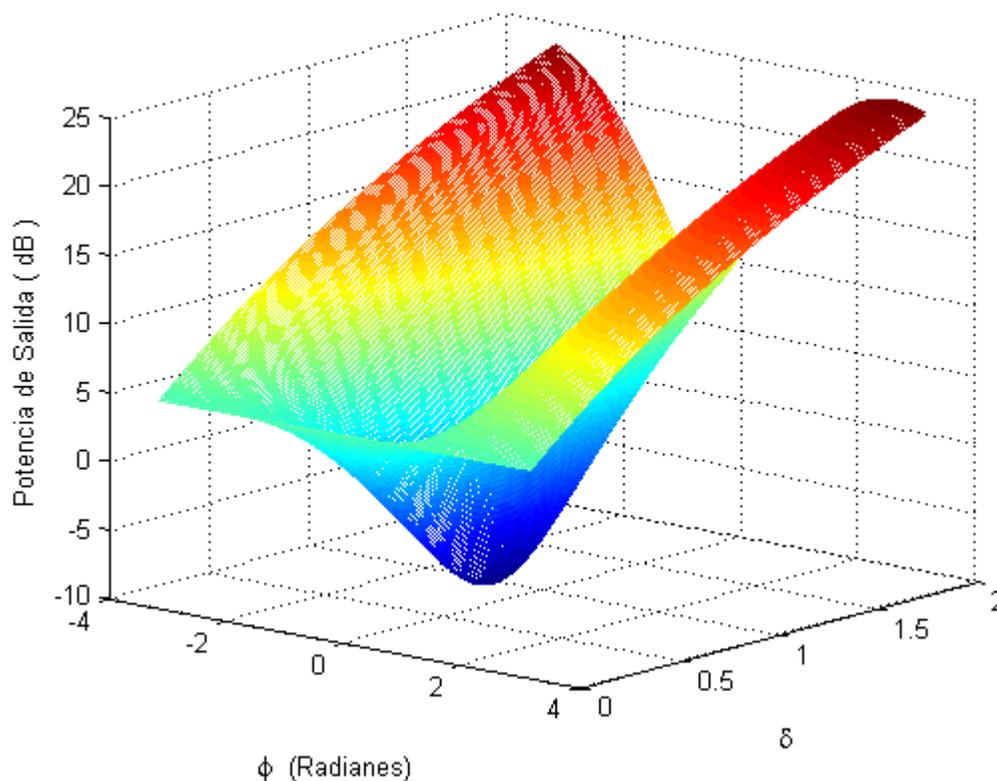


Figura 20. Potencia de salida  $P_{ND}$  de la agrupación de antenas debida a los pesos complejos  $w_{ND}$  obtenidos en función de la profundidad de nulos, que depende de amplitud y fase. Agrupación con 3 elementos de antena, interferente a  $10^\circ$ .

En la figura anterior se muestra la potencia de salida total de una agrupación de antenas de 3 elementos, apuntando el haz principal a  $0^\circ$  y dirigiendo un nulo hacia un usuario interferente ubicado a  $10^\circ$  y se realiza un barrido, tanto en amplitud, como en fase.

El barrido en amplitud va desde 0 hasta 2. El valor de la amplitud  $|\delta|$  debe ser menor de 1, ya que es la potencia que se envía al usuario de interés; sin embargo, con fines de análisis del comportamiento de la potencia de salida, se hace el barrido hasta 2.

En fase, el barrido se realiza desde  $-\pi$  hasta  $\pi$ , por ser  $\delta$  una función periódica, en el rango de  $-\pi$  a  $\pi$  para la fase  $\phi$ , se observa el comportamiento que se tendrá repetitivamente.

En la Figura 20 se puede observar que existe un valle en la superficie de potencia, esto representa la mínima potencia que se puede tener a la salida de la agrupación de antenas, para este caso en específico de 3 elementos de antena. Es decir el haz principal se encuentra a 0dB de potencia.

La mínima potencia se encuentra en  $\phi = -0.56$  radianes y  $\delta = 9.53$ . Estos parámetros, con tales valores, aseguran que no exista exceso de potencia en el haz principal y que la potencia de salida total de la agrupación sea la mínima que se puede tener.

La forma de la superficie de potencia cambia dependiendo del número de elementos de antena y de la posición del nulo.

## IV.5 Compromiso entre profundidad de nulos y potencia de salida

Haciendo la suposición de que no se tiene variación en la fase y que ésta es  $\phi_i = 0$ , la potencia de salida total de la agrupación de antenas  $P_{ND}$  queda directamente en función de la amplitud  $|\delta_i|$ . Realizando un barrido en la amplitud del nulo y encontrando la potencia de salida para cada valor, se llega a observar el compromiso que existe entre la profundidad del nulo y la potencia de salida total de agrupación de antenas.

En la Figura 21 se muestran las curvas compromiso para la ubicación del usuario interferente a diferentes distancias del usuario de interés. Las potencias han sido normalizadas para su mejor representación en la escala logarítmica.

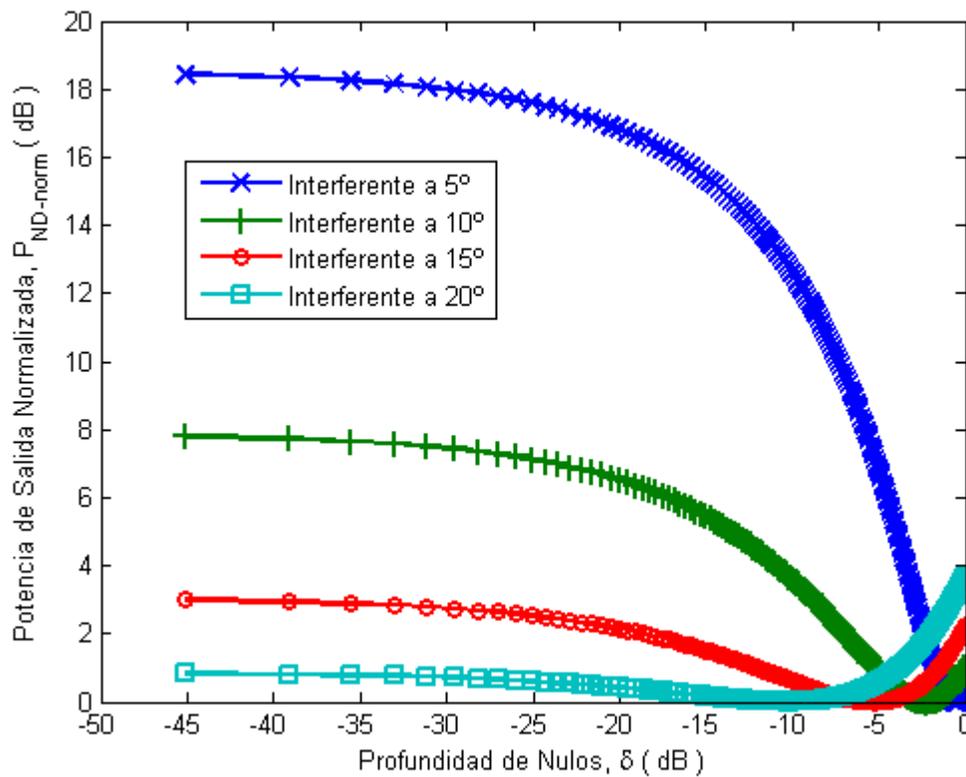


Figura 21. Potencia de salida total normalizada  $P_{ND-norm}$  con respecto a la profundidad de nulos, en una agrupación con 3 elementos de antena

Con la información obtenida de la figura anterior se puede decir que, dependiendo de la posición en la que se encuentre ubicado el interferente, será el valor de de la profundidad de nulo  $\delta$  en donde la potencia de salida comienza a reducirse. Para el caso de la curva de  $15^\circ$  la potencia se empieza reducir aproximadamente a los  $-35\text{dB}$  de profundidad de nulo aproximadamente, pero la reducción es más notable de los  $-20\text{dB}$  en adelante. Como es de esperarse, entre más cerca se encuentre el interferente del usuario de interés mayor será la potencia de salida de la agrupación de antenas.

Se observa en la Figura 21 que las curvas tienen 3 zonas diferenciables, una en la que la potencia de salida total de la agrupación se mantiene constante o varía una minúscula cantidad, otra donde se empieza a dar la reducción de la potencia de salida<sup>14</sup> y una última en donde se incrementa de nuevo la potencia a la salida de la agrupación de antenas.

En las cuatro curvas se puede notar que para profundidades de nulo menores que  $-20\text{dB}$  la potencia de salida no varía mucho, se reduce para cada una de las gráficas menos de  $0.01\text{dB}$  por cada  $\text{dB}$  de profundidad de nulos.

Tomando la curva que representa al usuario interferente a  $15^\circ$  del usuario de interés (mostrada con marcadores de círculos), se mostrarán los diagramas de radiación correspondientes a cada una de las 3 zonas mencionadas, con el fin de observar el comportamiento del haz principal y de los nulos de tales diagramas de radiación, para así conocer en que rango el algoritmo de modificación de profundidad de nulos mejora las prestaciones.

---

<sup>14</sup>Observar que entre más pequeña es la distancia entre los usuarios la caída en la potencia de salida de la agrupación de antenas es más abrupta

En principio se mostrará el diagrama de radiación correspondiente a la zona donde la potencia de salida se mantiene constante, o que varía una cantidad mínima. Dicha zona se encuentra entre los  $-300\text{dB}$  de profundidad de nulos y los  $-35\text{dB}$  aproximadamente.

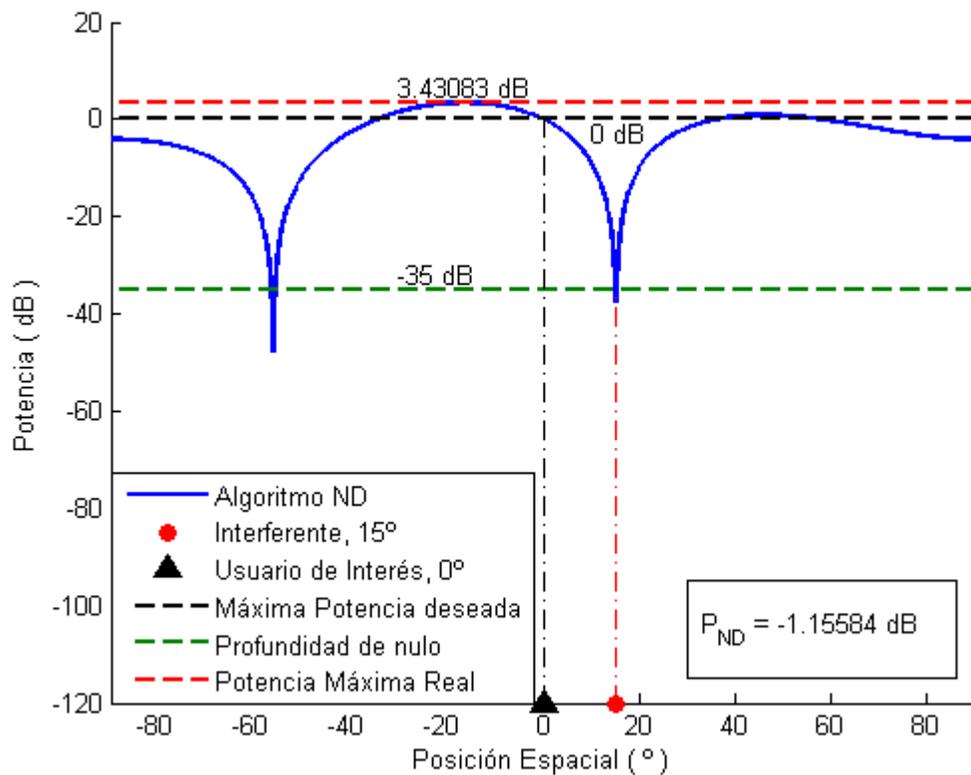


Figura 22. Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a  $15^\circ$ , y profundidad de nulos de  $-35\text{dB}$

La Figura 22 muestra que en el algoritmo de modificación de profundidad de nulos con  $\delta = -35$ , el nulo está dirigido en la dirección del usuario interferente.

Todos los diagramas de radiación para las profundidades de nulos, dentro de la zona en que la potencia de salida varía mínimamente, son casi idénticos. Lo único que varía es la profundidad de los nulos, la cual corresponde al valor que se define en las restricciones para  $\delta$  en esa posición.

Para la zona donde se empieza a notar una reducción en la potencia de salida total (de los  $-35\text{dB}$  a los  $-5\text{dB}$  para una separación de  $15^\circ$ ) se tienen diagramas de radiación como es mostrado en la Figura 23, donde se puede notar que el nulo ya no se encuentra dirigido a la ubicación del usuario interferente.

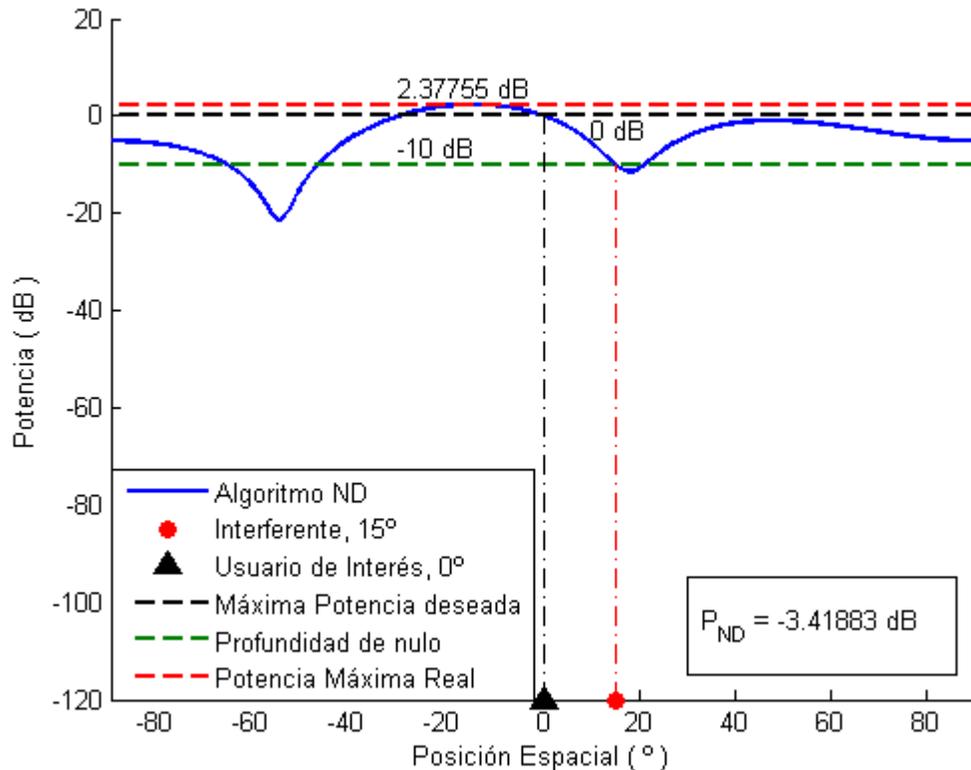


Figura 23. Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a  $15^\circ$ , y profundidad de nulos de  $-10\text{dB}$

De la figura anterior se observa que la potencia de salida total, así como la potencia del haz principal, son menores que al utilizar una profundidad de nulos de  $-35\text{dB}$ . Se cumplen adecuadamente con las restricciones establecidas. La potencia que tienen los nulos, debido a la resolución de la gráfica, parece mayor que con  $\delta = -35$ , sin referirse particularmente esto a la potencia que se dirige al usuario interferente, sino a la mínima potencia que tiene el diagrama de radiación en un punto.

La última zona de análisis es cuando la potencia de salida de la agrupación se empieza a incrementar de nuevo, entre los -5dB y 0dB con la separación de 15°. Dicha zona presenta diagramas de radiación como el mostrado en la Figura 24:

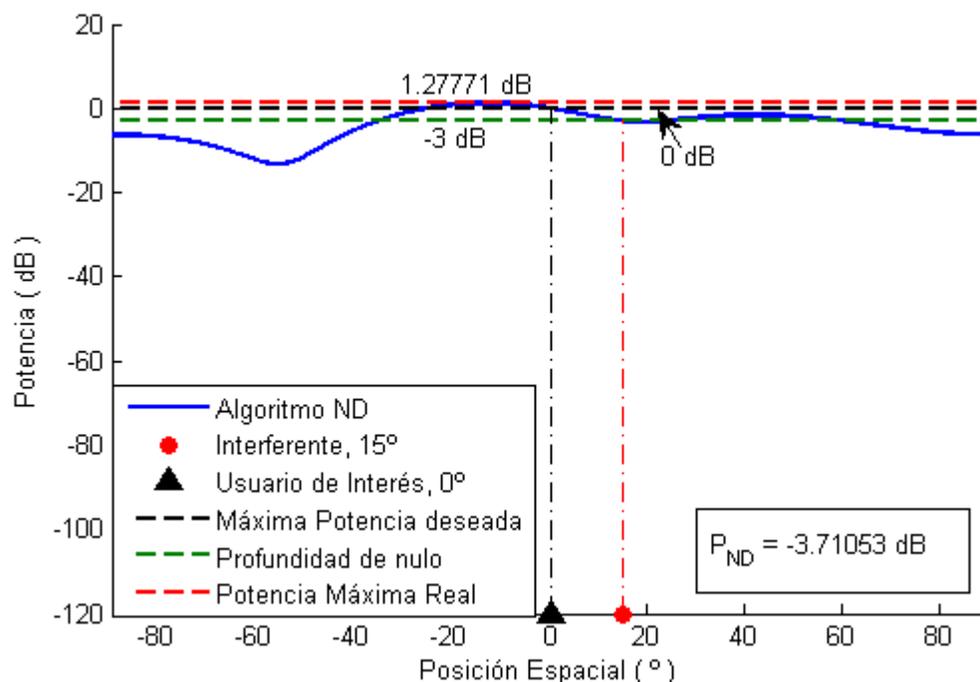


Figura 24. Diagrama de radiación para una agrupación de 3 elementos de antena, un nulo ubicado a 15°, y profundidad de nulos de -3dB

La potencia del haz principal excede con muy poco la potencia de 0dB que es lo que se busca tener en el haz principal; es decir, se redujo la potencia en ese sentido. A diferencia de los diagramas de radiación anteriores, la potencia en la mayoría de las ubicaciones aumenta, y por lo tanto la potencia de salida total de agrupación de antenas aumenta. El diagrama de radiación se acerca a lo que sería la radiación de una antena omnidireccional, dejando de lado todos los beneficios que presenta la utilización de las agrupaciones de antenas.

Debido al efecto observado en la última zona de análisis de las curvas compromiso, se considera conveniente analizar el comportamiento solamente de la potencia del haz principal del diagrama de radiación, ya que es éste el que provoca la interferencia con las celdas adyacentes.

Se mostrarán las curvas compromiso para diferentes ubicaciones de usuarios interferentes, como en el caso de las curvas compromiso de la potencia de salida total de la agrupación de antenas, analizando ahora el comportamiento de haz principal del diagrama de radiación.

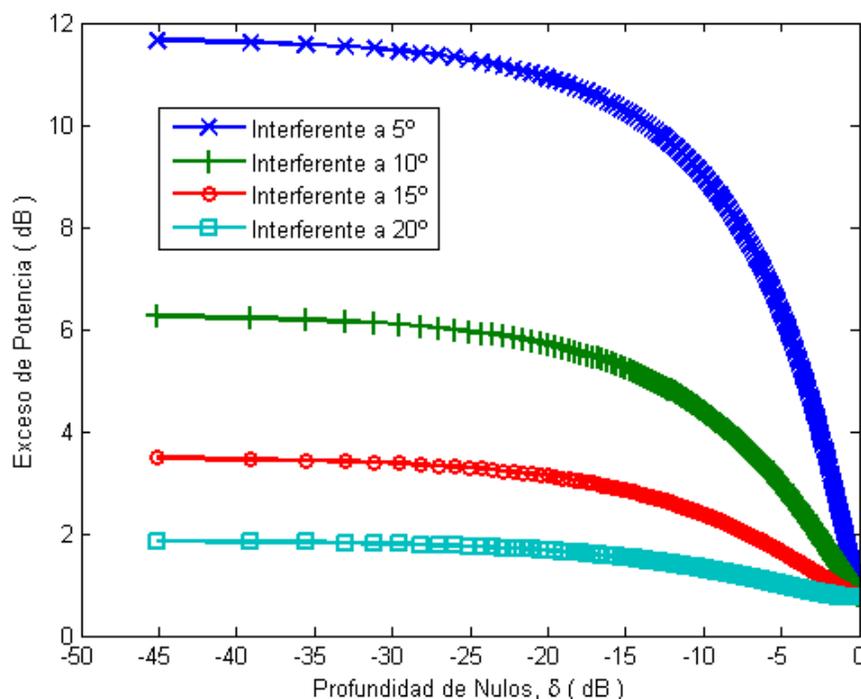


Figura 25. Potencia del haz principal respectoa la profundidad de nulos, para una agrupación con 3 elementos de antena

El comportamiento de las curvas de la potencia del haz principal es similar al observado con el de la potencia total, la diferencia es que para el caso del haz principal ya no se aumenta la potencia del haz conforme se disminuye  $\delta$ .

## IV.6 Conclusiones

Se analizó la manera en que se comportan las restricciones cuando se le asignan valores diferentes de 0 ó 1, usando tanto números reales como complejos de la forma  $|\delta| e^{j\phi}$ .

Utilizar solo valores reales para las restricciones es como tener  $\phi = 0$ , por lo tanto se comporta como el valor de la amplitud  $|\delta|$ .

Se encontró que las restricciones definen el nivel de potencia que tendrá en esa ubicación el diagrama de radiación. No varía la profundidad del nulo como se planteó al principio.

En los diagramas de radiación se puede ver como, al usar un valor diferente de 0 para  $\phi$ , cambia la forma; es decir, cambia la potencia en otros puntos del diagrama de radiación, pero la potencia asignada a la ubicación implícita en la restricción es la misma (el valor de  $|\delta|$ ). El cambio en la forma del diagrama de radiación varía la potencia de salida, por eso es conveniente utilizar un método para encontrar los valores óptimos  $|\delta|_{opt}$  y  $\phi_{opt}$ , como los que se presentan en Nguyen *et al.* [1999] y Nguyen y Faulkner [2000].

Se puede utilizar solo uno de los parámetros, y si éso es suficiente, en el sentido de que el diagrama de radiación que se obtenga cumpla con las características necesarias, se cumple el objetivo; sin embargo, puede ser que no sea el menor valor posible de potencia de salida.

Existe la posibilidad de dar un valor fijo a  $\delta$  y no utilizar la fase, esto es que  $\delta = |\delta|$  sin embargo, esto implica que el diagrama de radiación se tiene que adaptar a tener esa potencia en determinada ubicación, y puede resultar contraproducente. Lo anterior, podrá generar diagramas de radiación con una forma no deseada.

Un óptimo global implicaría encontrar los valores adecuados para cada uno de los nulos que se direccionen. Gracias al análisis de los diagramas de radiación se encontró que esto no es necesario, ya que la ubicación de los nulos muy cerca del usuario de interés son los que provocan el incremento de potencia, así entonces, los nulos ubicados hacia los usuarios interferentes más cercanos al usuario de interés, un usuario interferente a cada lado del usuario de interés, son los que deben ser modificados.

Una vez encontrado el óptimo de la profundidad de nulos para los usuarios interferentes más cercanos, si existe otro usuario muy cerca pero poco mas alejado que los mencionados, tendrá menos potencia del diagrama de radiación; y si estos usuarios se encuentran separados del usuario de interés más allá del ancho del haz principal, no producen incremento de potencia a la salida de la agrupación de antenas.

# Capítulo V

## Red de conformación digital de haz

### V.1 Introducción

Una vez conocidas las capacidades que tiene una agrupación de antenas, y los algoritmos que se pueden aplicar para obtener mejoras con respecto a la respuesta natural de éstas, resulta conveniente analizar dicha tecnología en un entorno real.

En un sistema de comunicaciones móviles, diferentes usuarios pueden requerir atención de la estación base a la vez, por lo tanto es necesario crear tantos diagramas de radiación como usuarios que soliciten servicio.

Para poder dar atención simultánea a un número dado de usuarios, se necesita utilizar los métodos de acceso al medio convencionales, ya sea acceso por división de tiempo (TDMA), por división de frecuencia (FDMA), por división de código (CDMA), o bien por división espacial (SDMA). Recordar que el acceso al medio por división espacial está implícito en la tecnología de antenas inteligentes<sup>15</sup>.

En este capítulo se verá la aplicación del algoritmo de conformación Zero-Forcing para obtener los pesos complejos correspondientes para los elementos de la agrupación de antenas, en una red de conformación digital de haz. Ésto representa una aportación importante dentro del grupo de investigación GCI, ya que por primera vez se aborda el reto de generar simultáneamente más de un haz principal. Ésto será abordado a continuación.

---

<sup>15</sup>En el libro de Litva y Kwok-Yeung Lo [1996], se pueden encontrar los diagramas a bloques de los esquemas de acceso al medio para una red de CDH.

## V.2 Red de conformación digital de haz

El propósito de una red de conformación digital de haz<sup>16</sup> es generar simultáneamente más de un diagrama de radiación en la estación base, ésto con el fin de poder atender a más de un usuario a la vez.

El número de usuarios que se pueden tener en una celda varía dependiendo de muchos factores, como pueden ser el entorno y la hora del día. Ciertos usuarios pueden requerir un servicio por parte de la estación base en el mismo momento. El caso más complicado se presenta cuando cada uno de los usuarios que se encuentran dentro de la celda, requiere de la atención de la estación base. En todo caso se genera un diagrama de radiación por cada uno de los usuarios a atender.

Solo se atiende un usuario por diagrama de radiación, entonces cada uno de los demás usuarios será considerado usuario interferente cuando no sea el usuario de interés.

Según Litva y Kwok-Yeung Lo [1996] las redes de conformación digital de haz se dividen en dos según el procesado de señal que realicen, las redes haz-espacio y las redes elemento-espacio, cada una con sus características específicas. Los dos tipos de redes de conformación digital de haz se utilizan tanto en transmisión y como en recepción.

En esta tesis únicamente se trabajará con la red elemento-espacio, ya que es la que mejor se adapta a la manera en que trabaja el algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing. Particularmente con el esquema de transmisión, ya que este trabajo está enfocado al enlace descendente de la agrupación de antenas.

Se mostrarán a continuación las características de una red de conformación elemento-espacio, así como el modelado matemático que la define.

---

<sup>16</sup>Red de conformación digital de haz por simplicidad de abreviará como RCDH

### V.2.1 Red de conformación elemento-espacio

En las redes de conformación elemento-espacio,<sup>17</sup> se manipulan las señales directamente en los elementos de antena aplicando los pesos correspondientes al método de conformación digital de haz, que se utilice para generar la respuesta deseada.

La Figura 26 muestra la estructura de una red de conformación digital de haz elemento-espacio para transmisión.

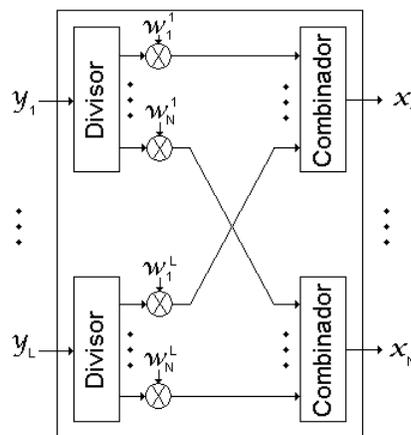


Figura 26. Esquema de una red de conformación digital de haz utilizada para la transmisión.

De acuerdo a la figura anterior, se tienen  $L$  señales que serán enviadas a los usuarios de interés. Cada una de las señales es dividida en  $N$  partes por medio de un divisor (un segmento corresponde a un elemento de antena).

Se modifican las señales por los respectivos vectores de pesos generados para cada usuario. Recordar que cada vector de pesos tiene  $N$  componentes así que existen tantos pesos como segmentos de señal.

Los segmentos de las señales que van hacia el mismo elemento de antena, una vez modificados por los pesos, se combinan para así tener una sola señal para cada elemento de antena. Por último se envían a los elementos de antena para ser radiadas.

<sup>17</sup>Dado que solo se trabajará con las redes de conformación digital de haz elemento-espacio, al mencionar red de conformación digital de haz se estará refiriendo a ésta.

Como se puede observar en la figura 26,  $x_n$  está en función de  $y_l$  y  $w_n^l$ . El modelo matemático que representa dicha figura es el siguiente:

$$x_n = \sum_{l=1}^L w_n^l y_l \quad (36)$$

donde:

$y_l$  es la señal que se desea enviar al  $l$ -ésimo usuario.

$x_n$  es la salida del  $n$ -ésimo elemento de la agrupación de antenas.

$w^l$  se refiere al vector de pesos complejos para el  $l$ -ésimo usuario; por lo tanto

$w_n^l$  es el peso correspondiente al  $n$ -ésimo elemento en el  $l$ -ésimo vector de pesos complejos.

El modelo de la red de conformación es muy similar al que se mostró en el capítulo II para el caso del modelo de señal para el enlace descendente, con la diferencia de que en esta ocasión, es la suma de todas las señales que serán enviadas a aquellos usuarios que estén requiriendo atención por parte de la estación base.

Una vez conocido el modelo de la red de conformación digital de haz, resta conocer los pesos que tendrán los elementos de la agrupación de antenas, para así poder generar las señales que serán radiadas por los elementos de antena. La superposición de estas señales genera los diagramas de radiación.

Las características que tendrán los diagramas de radiación dependerán del método de conformación de haz que se utilice para obtener los pesos.

## V.3 Red de conformación digital de haz basada en el algoritmo Zero-Forcing

Con el fin de obtener los pesos que utilizará la agrupación de antenas para la generación de sus diagramas de radiación, se puede utilizar el conformador que mejor se adapte a las necesidades que se demandan al sistema de comunicaciones.

Dado el enfoque que se aborda en el presente trabajo, se utilizará el algoritmo Zero-Forcing<sup>18</sup> para obtener los pesos complejos y así observar el comportamiento de la red de conformación digital de haz.

Ya que la red de conformación está basada en el algoritmo Zero-Forcing, los parámetros importantes para la red de conformación, al igual que en Zero-Forcing, son :

- Número de elementos de antena

El número de elementos de antena es importante ya que el número de nulos con los que cuentan los diagramas de radiación está ligado con este parámetro.

- Número de usuarios en la celda

Define el número de nulos que serán direccionados en cada diagrama de radiación.

- Posición espacial de los usuarios

Importante para saber hacia donde se dirigirán tanto los haces principales como los nulos.

Además se debe especificar cuales usuarios serán los usuarios de interés.

---

<sup>18</sup>Se referirá en algunas ocasiones a la red de conformación digital de haz basada en el algoritmo Zero-Forcing por sus siglas RCDH-ZF. De la misma manera se puede encontrar como red de conformación Zero-Forcing o red Zero-Forcing.

### V.3.1 Modelo matemático de una red de conformación digital de haz con el algoritmo Zero-Forcing

El modelo matemático para la red de conformación digital de haz, basada en el algoritmo Zero-Forcing, considera como punto de partida la minimización de la potencia de salida, representando ésto como:

$$\min_{w_{zf}} P(w_{zf}) \text{ sujeto a } \left\{ \begin{array}{l} w_1^H a(\theta_1) = 1 \\ w_1^H a(\theta_2) = 0 \\ \dots \\ w_1^H a(\theta_L) = 0 \\ \\ w_2^H a(\theta_1) = 0 \\ w_2^H a(\theta_2) = 1 \\ \dots \\ w_2^H a(\theta_L) = 0 \\ \vdots \\ w_L^H a(\theta_1) = 0 \\ w_L^H a(\theta_2) = 0 \\ \dots \\ w_L^H a(\theta_L) = 1 \end{array} \right. \quad (37)$$

donde:

$w_l$  es el vector de pesos complejos correspondiente al  $l$ -ésimo usuario

$a(\theta_l)$  es el vector de direccionamiento para el  $l$ -ésimo usuario

Se utilizan  $L$  vectores de pesos complejos ya que se atenderá a  $L$  usuarios

En el modelo Zero-Forcing se utiliza un solo vector de pesos complejos  $w$ , mientras que para la red de conformación se hace uso de una matriz, que contiene los vectores de pesos de cada uno de los usuarios que serán atendidos, representada ésta como:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_L \end{bmatrix} \quad (38)$$

La matriz  $W$  será llamada matriz de pesos complejos. Utilizando las matrices para la simplificación de las restricciones se tiene:

$$W^H * A(\theta) = I \quad (39)$$

donde:

$A(\theta)$  es la matriz de direccionamiento definida en el capítulo III en el modelado del algoritmo Zero-Forcing.

$I$  es la matriz identidad de  $L \times L$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Los pesos complejos se obtienen con la siguiente ecuación:

$$W = A (A^H A)^{-1} I \quad (41)$$

Una vez definido el modelo, se pueden obtener los pesos complejos y con esta información generar los diagramas de radiación.

### **V.3.2 Simulaciones sobre la red de conformación digital basada en el algoritmo Zero-Forcing**

Las simulaciones en este apartado consisten en la generación de los diagramas de radiación correspondientes a cada uno de los usuarios que requieran la atención de la estación base. Dependiendo de la técnica de acceso al medio se designa la forma en que se generan dichos diagramas.

Los diagramas de radiación que se generan en la RCDH-ZF para cada usuario corresponden a los analizados en el Capítulo III. La diferencia radica en la potencia de salida total de la agrupación de antenas, como es de esperarse se incrementa la potencia de salida total ya que se generan más diagramas de radiación.

Se analizarán los diagramas de radiación con diferentes números de usuarios de atención, para así observar el comportamiento de los haces principales según el posicionamiento de los interferentes.

Se mantiene la idea de dirigir los nulos hacia los usuarios interferentes, con el fin de reducir la interferencia en la celda en el momento en que se presenta un incremento en el haz principal, tal que produzca interferencia con alguna de las celdas adyacentes. Se buscará la reducción de la potencia de salida correspondiente al diagrama de radiación y que pueda causar dicha interferencia.

La reducción de potencia a la salida de la agrupación, en específico del diagrama de radiación que cause interferencia, supone la reducción de la potencia que contiene el haz principal en dicho diagrama de radiación, llegando así a cumplir con la reducción de la interferencia intercelda.

A continuación se presenta el orden en que se realizaron las simulaciones para una red de conformación digital de haz, basada en el algoritmo Zero-Forcing.

## Secuencia de simulaciones

Los parámetros de interés para la red de conformación son los mismos que los del algoritmo Zero-Forcing: número de elementos de antena, número de usuarios y posiciones de los usuarios (tanto los usuarios de interés, como los interferentes).

En la Tabla IV se muestran los parámetros que se utilizarán para la generación de los diagramas de radiación de la red de conformación digital de haz basada en el algoritmo Zero-Forcing.

Tabla IV. Parámetros para la red de conformación digital de haz basada en el algoritmo Zero-Forcing

Parámetro	Valor
Número de elementos de antena (N)	5
Número de usuarios (L)	2 - 5
Posición de los usuarios de interés	Se definirá para cada caso
Posición de los usuarios interferentes	Se definirá para cada caso

El número de elementos de antena se mantendrá fijo para las simulaciones de la red de conformación digital de haz basada en algoritmo Zero-Forcing.

El número de usuarios estará entre 2 y 5, en cada caso se mencionará cuantos son.

Las posiciones espaciales de los usuarios de interés se definirán también para cada caso. Recordar que todos los usuarios se consideran interferentes si no son el usuario de interés del diagrama de radiación que se esté analizando; por lo tanto, los usuarios de interés en otros diagramas de radiación serán interferentes.

La posición espacial de los usuarios interferentes se utilizará solo en los casos en que no todos los usuarios requieran atención por parte de la estación base, se aclarará cuando así sea el caso.

La Tabla V contiene la secuencia que se siguió para la realización de las simulaciones.

Tabla V. Casos de simulación sobre la red de conformación digital de haz Zero-Forcing

Caso	Escenario
Caso 1	$N = 5$ ; 2 usuarios $(-5^\circ, 25^\circ)$
Caso 2	$N = 5$ ; 2 usuarios $(-5^\circ, 25^\circ)$ ; 2 interferentes $(-15^\circ, 35^\circ)$
Caso 3	$N = 5$ ; 2 usuarios $(-5^\circ, 25^\circ)$ ; 3 interferentes $(-15^\circ, 10^\circ, 35^\circ)$

Recordar que  $N$  es el número de elementos de antena de la agrupación. Se utiliza una agrupación de antenas con 5 elementos para los primeros 3 casos y una de 7 para el último caso. Ésto con el fin de poder observar el comportamiento de los diagramas de radiación, ya que con un número elevado de elementos de antena no es posible apreciar si los diagramas de radiación cumplen con las características requeridas.

Como se tiene un bajo número de elementos de antena, se fijan 2 usuarios de interés para los primeros 3 casos. Ya que la agrupación tiene la capacidad de dirigir solo 4 nulos en cada diagrama de radiación, para el caso 3 se tendrán 3 usuarios interferentes, explotando así al máximo el algoritmo.

### Caso 1: N=5, 2 usuarios

El escenario para el caso 1 es el siguiente:

Se tiene una agrupación con 5 elementos de antena. Dentro de la celda están dos usuarios, ambos de interés, uno ubicado en  $-5^\circ$  y el otro en  $25^\circ$ .

Se obtienen, mediante el algoritmo de conformación digital Zero-Forcing, los vectores de pesos complejos para cada uno de los usuarios para posteriormente generar el diagrama de radiación correspondiente a cada usuario. Recordar que el usuario que no se este atendiendo con un diagrama de radiación será un interferente para dicho diagrama de radiación.

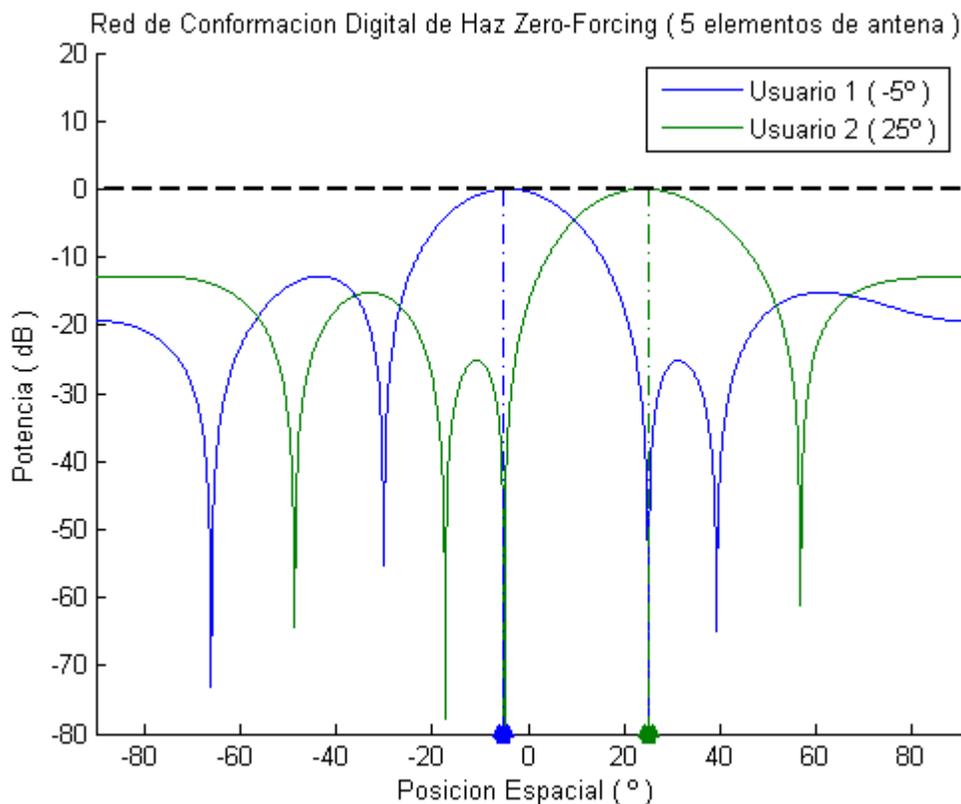


Figura 27. Diagramas de radiación para una RCDH-ZF con 2 usuarios de interés sin interferentes

La Figura 27 muestra los diagramas de radiación para los dos usuarios, en  $-5^\circ$  para el usuario 1 y en  $25^\circ$  para el usuario 2.

Ambos haces principales están a 0dB de potencia, restricción establecida en el modelo Zero-Forcing para la potencia dirigida al usuario de interés.

Se observa que se cumple con las restricciones de potencia de haz principal y profundidad de nulos, que se establecen para cada uno de los diagramas de radiación. Sin embargo, los haces principales se interfieren con una potencia muy alta, en  $-4.5\text{dB}$  aproximadamente.

De acuerdo a la Figura 27 las potencias de los diagramas de radiación cuantificadas son:

Tabla VI. Potencias de salida para el caso 1

Usuario	Potencia del haz principal	Potencia total
Usuario 1	0 dB	-13.58 dB
Usuario 2	0 dB	-13.58 dB

La potencia de ambos diagramas de radiación es la misma ya que son simétricos, aproximadamente  $-13.6\text{dB}$ .

La potencia de total salida es la suma de la potencia de ambos diagramas de radiación,  $P_o = -7.56\text{dB}$ , que es el doble de potencia de uno de los diagramas de radiación.

Recordar que se está trabajando en escala logarítmica, la potencia es el doble en la escala lineal, por lo tanto  $6\text{dB}$  mayor en la escala logarítmica.

### Caso 2: N=5, 2 usuarios, 2 interferentes

En una celda con una agrupación de 5 elementos de antena se tienen 4 usuarios, dos de ellos son de interés y dos son interferentes.

Los diagramas de radiación para los dos usuarios de interés se muestran en la siguiente figura:

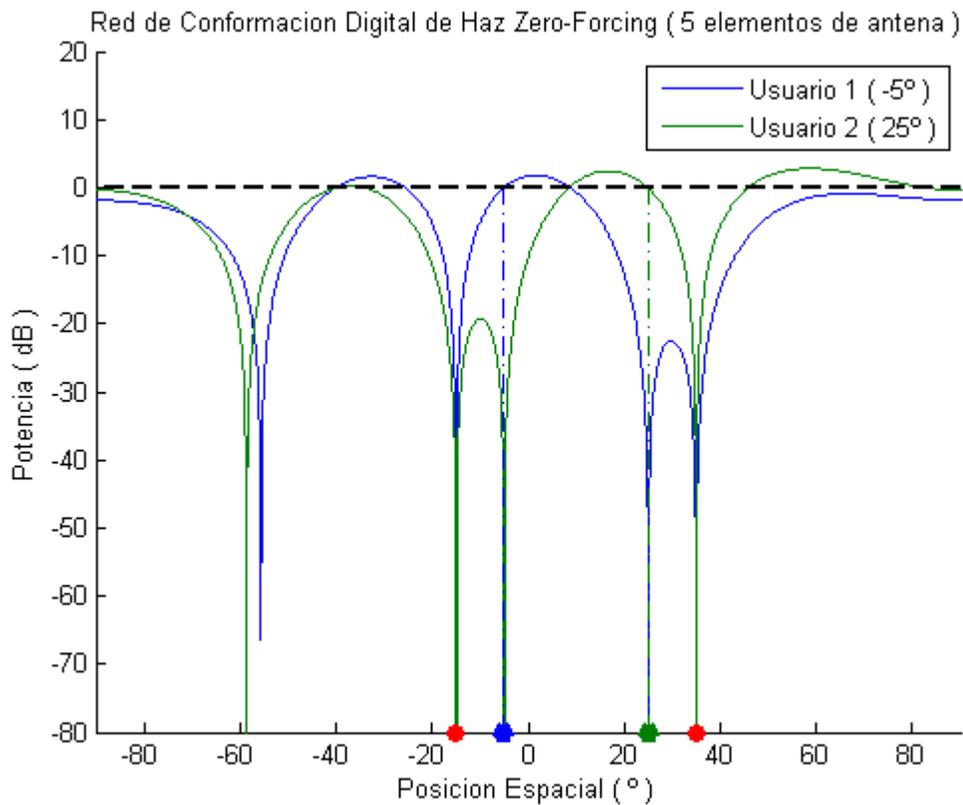


Figura 28. Diagramas de radiación para una RCDH-ZF con 4 usuarios, 2 de interés y 2 interferentes

Se agregan dos interferentes más, con respecto al caso 1; sin embargo, dado que la separación entre usuarios es menor ( $10^\circ$ ), y por el tamaño de la agrupación de antenas que se está utilizando (5 elementos), se presenta incremento en la potencia en ambos diagramas de radiación.

Los dos diagramas de radiación cumplen con la cancelación de interferentes, pero no con la potencia de haz principal permitida. Ambos diagramas de radiación rebasan los 0dB en el haz principal, y dos de sus lóbulos tienen una potencia muy cercana, incluso mayor de los 0dB.

Los lóbulos que rebasan los 0dB tienen aproximadamente la misma potencia que el haz que está dirigido al usuario de interés en ese diagrama de radiación.

De acuerdo a la Figura 28 las potencias de los diagramas de radiación evaluadas son mostradas en la Tabla VII:

Tabla VII. Potencias de salida para el caso 2

Usuario	Potencia del haz principal	Potencia total
Usuario 1	1.82 dB	-5.13 dB
Usuario 2	2.45 dB	-3.3 dB

La potencia de salida total de la agrupación es  $P_o = 1.85\text{dB}$ , la suma de las potencias de los dos diagramas de radiación.

El traslape entre los haces principales es mayor que en el caso 1, para el caso anterior era -4.5 y en este caso alrededor de los 0dB (potencia que idealmente debe ser la máxima del haz principal).

Es importante mencionar que a mayor número de elementos de antena estos problemas se reducen, por lo menos la separación entre usuarios puede ser más estrecha.

Para el caso de 32 elementos de antena el diagrama de radiación cumple completamente con los requisitos requeridos en este escenario, ya que el ancho de haz del diagrama de radiación generado por una agrupación de tales dimensiones es aproximadamente de  $7^\circ$ , por lo tanto puede existir una separación menor de  $5^\circ$ . El diagrama de radiación para este caso se generó, pero no se presenta debido al gran número de diagramas de radiación superpuestos, que no permiten una clara apreciación.

### Caso 3: N=5, 2 usuarios, 3 interferentes

Se tiene una agrupación de antenas con 5 elementos.

Se mantienen los usuarios del caso anterior y se agrega un interferente; es decir, 2 usuarios de interés ( $-5^\circ$  y  $25^\circ$ ) y ahora 3 usuarios interferentes ( $-15^\circ$ ,  $10^\circ$  y  $35^\circ$ ).

Los diagramas de radiación para los dos usuarios de interés se muestran en la siguiente figura:

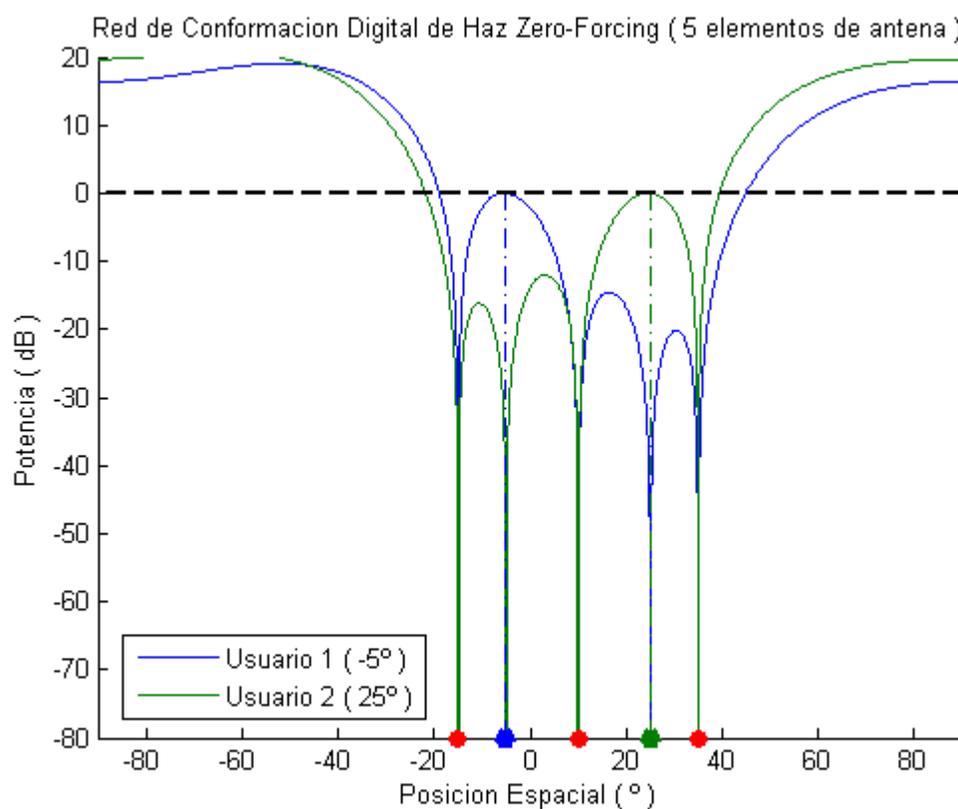


Figura 29. Diagramas de radiación para una RCDH-ZF con 2 usuarios de interés y 3 interferentes

Para este tercer caso se agrega un interferente más ( $10^\circ$ ), manteniendo todos los usuarios del caso 2. Un total de 5 usuarios en la celda.

La Figura 29 muestra los diagramas de radiación generados para este caso. Ambos diagramas de radiación cumplen con las restricciones de potencia de haz principal y

ubicación de nulos; sin embargo, debido al número de elementos de antena los lóbulos laterales de los extremos incrementan mucho su potencia (alcanzando los 20dB). Este fenómeno se da al ubicar todos los nulos del diagrama de ración hacia el centro de dicho diagrama de radiación.

En este caso es fácil ver que para una agrupación con más elementos de antena, no existiría ningún problema, ya que se formarían más lóbulos laterales evitando el excedente de potencia en los lóbulos de los extremos.

De la figura anterior las potencias de los diagramas de radiación evaluadas son:

Tabla VIII. Potencias de salida para el caso 3

Usuario	Potencia del haz principal	Potencia total
Usuario 1	0 dB	25.4 dB
Usuario 2	0 dB	28.1 dB

La potencia de salida total de la agrupación es la suma de la potencia total de los dos diagramas de radiación,  $P_o = 32.9\text{dB}$ .

En este caso no existe traslape entre los haces principales de los diagramas de radiación de los usuarios de interés 1 y 2, pues existe un nulo entre ambos. Se podría tener una reducción en la potencia del haz principal si se define una potencia entre -15 y -10 dB para la profundidad del nulo, ya que la profundidad que tiene solo con Zero-Forcing es menos de  $-300\text{dB}$ .

Este caso muestra que es posible mejorar los casos anteriores donde existe traslape de potencia de haces principales, pues aunque no exista interferente, se puede dirigir un nulo hacia la mitad de la distancia entre los usuarios, y definir en las restricciones el nivel de potencia que se quiere tener en dicha ubicación.

## V.4 Conclusiones

Se realizó investigación por primera vez en el GCI acerca de redes de conformación digital de haz, específicamente las de elemento-espacio, ya que es en éstas donde se trabaja individualmente con los elementos de antena, tal y como lo hace el algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing, y es por ello que puede ser aplicado para la obtención de los pesos complejos de la agrupación para cada uno de los usuarios que requieran de servicio.

Se analizó el modelado de la red de conformación y se agregó el algoritmo Zero-Forcing en la parte donde se obtienen los pesos complejos.

Se realizó simulación en diferentes escenarios considerando variación en el número de usuarios de interés e interferentes.

El algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing, funciona perfectamente sobre la red mientras se mantengan los usuarios separados más de  $5^\circ$ , para una agrupación de 32 elementos de antena.

Se encontró que para una agrupación como la anteriormente mencionada, existe traslape de los haces principales si la separación entre usuarios es menor de  $23^\circ$ .

Como ya se había observado en el capítulo III existe incremento de potencia si se dirige un nulo a menos de  $5^\circ$  del usuario de interés.

Ambos problemas pueden ser resueltos aplicando el algoritmo de modificación de profundidad de nulos.

Para el caso del traslape de haces principales, se dirige un nulo entre los dos usuarios de interés y se define la potencia que se quiere tener en dicha dirección.

Es importante recalcar que al igual que en el capítulo IV existe un compromiso entre la profundidad del nulo que se dirija y la potencia de salida de la agrupación de antenas.

A pesar de los inconvenientes que puedan presentar, tanto el algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing como el de modificación de profundidad de nulos, son adecuados para utilizarse en una red de conformación digital de haz, recordando que presentan mejores prestaciones cuando se utilizan agrupaciones de antena grandes.

# Capítulo VI

## Conclusiones

Este trabajo de investigación arrojó interesantes y abundantes conclusiones que para mayor facilidad de su presentación se han organizado de la siguiente forma:

### VI.1 De la conformación digital de haz (CDH)

La utilización de algoritmos de conformación digital de haz en las agrupaciones de antenas ayuda a reducir la interferencia cocanal, reduciendo el área de transmisión del diagrama de radiación, sin que ésto implique un degradamiento de la señal que llega al usuario de interés.

En los algoritmos de conformación de haz del tipo independientes de datos, se especula sobre la dirección que deben tener los usuarios. Así se genera el diagrama de radiación. Pueden apuntar el haz principal, y direccionan cierto número de nulos.

Por su parte los algoritmos CDH estadísticamente óptimos, utilizan la información que se encuentra en el canal, para generar los diagramas de radiación óptimos para la situación en que se realizó el muestreo. Sin embargo, si el usuario es un móvil, eventualmente el haz principal no estará dirigido hacia tal usuario.

Es de esta manera que se tiene la necesidad de la utilización de algoritmos de conformación digital de haz adaptativos, que tengan la capacidad de obtener la posición del usuario de interés en todo momento, para así generar un diagrama de radiación que siempre brinde el servicio.

A partir de lo anterior, se seleccionó el algoritmo de conformación Zero-Forcing,

debido a que tiene la capacidad de apuntar el haz principal, y su principal característica es que tiene la capacidad del direccionamiento de nulos. Además, como se demostró, tiene una baja carga computacional.

## **VI.2 Sobre el algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing**

El algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing resultó ser un algoritmo que se adapta perfectamente al objetivo de esta tesis, ya que plantea una minimización de potencia, con lo que se reduce la interferencia de canal adyacente. Además, con el direccionamiento de nulos se reduce la interferencia co-canal o de acceso al medio.

Se estudió el efecto que produce en la respuesta de la agrupación de antenas la variación de los parámetros: número de elementos de antena, posición de interferentes y número de usuarios en la celda.

Con respecto al número de elementos de antena, se analizó el comportamiento del ancho del haz principal, el cual se hace más directivo conforme se aumenta la cantidad de elementos.

El análisis se hizo considerando 3 elementos de antena que proporcionaron un ancho de haz de  $82^\circ$ , hasta 64 elementos de antena con un ancho de haz de aproximadamente  $4^\circ$ . Los lóbulos laterales se mantuvieron entre 12 y 13dB desde 3 elementos de antena hasta 64.

El ancho de haz define el umbral de distancia que existe entre el usuario de interés y un interferente. Si un interferente se acerca al usuario de interés cruzando dicho umbral, la potencia de salida del haz principal aumenta causando interferencia con las

celdas adyacentes. El umbral de potencia es aproximadamente la mitad del ancho de haz, cuando la potencia supera los 0dB; sin embargo, se realizaron simulaciones para cuando existe un incremento de más de 0.5dB. El umbral obtenido osciló entre los 29° y los 2°, para el rango de 3 a 64 elementos de antena en la agrupación.

Si los usuarios se encuentran fuera del umbral, no existe aumento en la potencia de del haz principal; sin embargo, la potencia de salida total aumenta conforme crece el número de usuarios en la celda.

El algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing tiene otras ventajas, que no se agregaron en este documento por motivos de espacio. Tales ventajas son la capacidad de apuntar más de un haz principal en el mismo diagrama de radiación y la posibilidad de dirigir bandas de nulos (broadband nulls); es decir, que un nulo abarque un espacio de varios grados (5° por ejemplo) en la celda.

Para apuntar más de un haz se agrega otra restricción igualada a 1, con lo que se dirigirán 0dB en esa dirección. Se debe tener en cuenta que este haz contiene la misma señal que el haz principal del diagrama de radiación, con lo que es posible dar atención al mismo usuario y ser utilizado para aprovechar las multitrayectorias en un ambiente de dispersión, pero se debe tener cuidado de no dirigirlo hacia donde se encuentran los usuarios interferentes. Para dirigir más de un haz en el mismo diagrama de radiación se necesita de un análisis a fondo del ambiente en que se encuentre la estación base, y realizar la modificaciones necesarias al conocer la ubicación de los usuarios. Esta aplicación da diversidad espacial a la agrupación de antenas.

La generación de nulos en amplias zonas (broadband nulls) puede ser utilizada para dirigir dichos nulos cuando existen muchos usuarios interferentes en un área específica. Por ejemplo, si se tienen 8 usuarios en un rango de 10°, direccionando 3 o 4 nulos en ese rango se pueden cancelar todos esos interferentes. Con esto se puede ir más allá de

la restricción que plantea que se deben tener menos usuarios que elementos de antena. Se debe tener en cuenta que deben estar cerca los interferentes entre sí, pero representa un caso en el que puede ser mejorado el sistema.

También pueden ser utilizados los broadband nulls para reducir multitrayectorias, cuando se tienen obstáculos muy grandes dentro de la celda, y con ésto se evita tener señales retardadas y reducir los errores. Es importante ver que, dependiendo lo que se requiera para el sistema, se pueden aprovechar o evitar las multitrayectorias.

### **VI.3 En cuanto al algoritmo de modificación de profundidad de nullos**

Una vez que se encontró que existe un incremento de potencia cuando un interferente pasa del umbral de distancia, se tiene la necesidad de modificar la potencia asignada al diagrama de radiación en la ubicación en que se encuentra el usuario interferente.

La modificación de las restricciones, que se plantean para el algoritmo de conformación digital de haz Zero-Forcing brinda esa capacidad. Las restricciones establecen la potencia que tendrá el diagrama de radiación en las ubicaciones indicadas, tales restricciones pueden estar en un rango de 0 a 1, donde 0 representa la profundidad que tiene originalmente en Zero-Forcing (menos de -300dB) y 1 representa 0dB.

Hay que tomar en cuenta que la restricción igual a 1 representa la potencia que se dirige al usuario de interés, por lo tanto no se debe dirigir a los interferentes. Se encontró que la potencia se reduce al mínimo, cuando se dirige al usuario de interés la potencia que tendría el diagrama de radiación hacia esa ubicación, si no se direccionara el nulo.

El aumento en la potencia en dirección de los interferentes ayuda a reducir la potencia que se incrementó en el haz principal, debido a la cercanía de interferente con el usuario de interés. Es aquí en donde se genera un compromiso entre la potencia que se permitirá dirigir al usuario interferente, con el fin de reducir la potencia en el haz principal, una vez que su potencia interfiere con las celdas adyacentes.

Debe quedar claro que algoritmo de modificación de nulos no modifica la profundidad de los nulos, tal como se pensaba al principio y por lo cual se llamó así al algoritmo. El algoritmo asigna una potencia, dada por las restricciones, a la ubicación deseada. Es por ésto que el diagrama de radiación sufre un desplazamiento para poder poner la potencia requerida en la ubicación indicada.

## **VI.4 Con respecto al objetivo de la tesis**

El objetivo de la tesis se puede dividir en 3: reducción de interferencia cocanal, reducción de la interferencia con celdas adyacentes y el compromiso de potencia entre la profundidad de nulos y la potencia de salida.

La reducción de interferencia cocanal se alcanzó dirigiendo los nulos en la dirección de los usuarios interferentes, y aumentando el número de elementos de antena se pudo acortar la distancia entre usuario de interés e interferente, sin provocar interferencia intercelda.

Es por ésto que el algoritmo Zero-Forcing cumplió con el objetivo adecuadamente, cuando los usuarios interferentes se mantienen fuera del umbral de distancia, el cual está ligado al número de elementos de antena.

Sin embargo, si se pasa de dicho umbral, el algoritmo de modificación de profundidad de nulos ayuda a reducir la potencia en el haz principal, evitando la interferencia de

canal adyacente. Recordar que se crea un compromiso entre la potencia que se permitirá tener hacia los interferentes y el exceso de potencia del haz principal. Esto quiere decir que existe un compromiso entre la interferencia cocanal y la interferencia de canal adyacente.

Con lo anterior se comprueba que el objetivo de este trabajo se logró al cien por ciento, dejando claro que hay que definir qué es lo más importante a analizar, la interferencia de canal adyacente o la cocanal.

Con el fin de llevar más allá la investigación se propuso el modelado de una red de conformación digital de haz, basada en el algoritmo Zero-Forcing. Con el fin de mostrar un comportamiento real de dicho algoritmo de conformación.

## **VI.5 Acerca de las redes de conformación digital de haz**

Los sistemas de comunicaciones móviles celulares son utilizados por varios usuarios al mismo tiempo, y es por eso que se debe generar un diagrama de radiación para cada uno de ellos. Esto se logra con una red de conformación.

Se utilizó una red de elemento-espacio, ya que es la que mejor se adapta al modelado del algoritmo Zero-Forcing.

Dicha red genera un diagrama de radiación para cada uno de los usuarios que demanden servicios de la estación base, cancelando la interferencia co-canal al dirigir los nulos hacia los usuarios que no son de interés para ese diagrama de radiación.

Se presentaron problemas cuando dos usuarios de interés se encontraban a una distancia menor a la distancia del umbral de la agrupación que se esté utilizando. Pues

además de provocar incremento de potencia en los haces principales de los dos diagramas de radiación, se interfieren entre sí dichos haces.

Se puede utilizar el algoritmo de modificación de profundidad de nulos, con el fin de definir la potencia en la que se interferirán los haces principales, y así reducir los errores en las señales. Sin embargo, al igual que para un solo usuario, existiría un compromiso entre la potencia donde se interfieran los haces y el exceso de potencia de tales.

Es posible echar mano de la capacidad de dirigir broadband nulls cuando varios usuarios se encuentren concentrados en una posición, con el fin de cancelar la interferencia de todos, relajando la potencia potencia total del diagrama de radiación.

Se puede decir que esta parte de la investigación, además de ser novedosa, resulta trascendente de cara al estado del arte que tiende a la generación multihaz a través de redes de conformación digital de haz.

## VI.6 Trabajo Futuro

El trabajo a futuro es incluir en la modelación las modificaciones mencionadas:

- Analizar la respuesta de la agrupación de antenas al utilizar el algoritmo de modificación de profundidad de nulos para definir la potencia en que se interfieren los haces.
- Valorar el exceso de potencia que existirá en los haces principales, al tener dos o más usuarios de interés más cerca de lo que el umbral de distancia permite.
- Incluir en el modelado la capacidad de dirigir broadband nulls.

## Referencias

- Arceo Olague, J. G. (2008). *Desarrollo de algoritmos para la síntesis del diagrama de radiación en comunicaciones móviles celulares basadas en antenas inteligentes*. Tesis de doctorado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacan. Sección de estudios de posgrado e investigación, México, D.F. 96 pp.
- Balanis, C. A. (1997). *Antenna theory: analysis and desing*. John Wiley & Sons, Inc., segunda edición. 941 pp.
- Blaunstein, N. y Christodoulou, C. G. (2007). *Radio propagation and adaptive antennas for wireless communication link: terrestrial, atmospheric and ionospheric*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 614 pp.
- Bonilla Hernández, D. (2005). *Modelado y simulación de la aproximación de máximo verosimilitud (ML) incondicional en la determinación del DoA en campo cercano*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 103 pp.
- García López, G. (2005). *Modelado y simulación de técnicas de conformador de haz para sistemas de comunicaciones W-CDMA*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 92 pp.
- Gross, F. B. (2005). *Smart antennas for wireless comunnications with MATLAB*. McGraw-Hill, Chicago. 270 pp.
- Haykin, S. (2002). *Adaptive filter therory*. Prentice Hall Information and System Series. Prentice Hall, Inc., cuarta edición. 920 pp.
- Liberti Jr., J. C. y Rappaport, T. S. (1999). *Smart antennas for wireless communi-cations: IS-95 and third generation CDMA applications*. Prentice Hall Communi-cations Engineering and Emerging Technologies. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. 376 pp.
- Litva, J. y Kwok-Yeung Lo, T. (1996). *Digital beamforming in wireless communications*. Mobile Communications Series. Artech House, Norwood, MA. 301 pp.
- Mendoza Montoya, J. F. (2006). *Estimación del DOA empleando métodos de rastreo de subespacio aplicados a music y esprit*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 68 pp.
- Monjardín Gonzáles, H. (2008). *Conformación digital de haz mediante método de capón robusto vía aproximación DLA*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 80 pp.

- Nguyen, T. y Faulkner, M. (2000). Null depth trade off for power reduction in adaptive arrays. En *Proceedings of the International Symposium on Wireless and personal multimedia communications, 2000 (WPMC'00)*, Bangkok, Thailand, 12 Nov - 15 Nov 2000.
- Nguyen, T., Berangi, R., y Faulkner, M. (1999). Null depth control for downlink adaptive array. En *Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and Its Applications, 1999 (ISSPA '99)*, Vol. 2, páginas 523 –526, Amsterdam, Netherlands, 22 Aug 1999-25 Aug 1999.
- Proakis, J. G. (1995). *Digital communications*. Electrical and Computer Engineering. McGraw-Hill, Upper Saddle River, New Jersey, tercero edición. 928 pp.
- Rappaport, T. S. (1996). *Wireless communications: principles and practice*. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. 641 pp.
- Sklar, B. (2001). *Digital communications: fundamentals and applications*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, segunda edición. 1079 pp.
- Van Veen, B. D. y Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. En *IEEE ASSP Magazine*, Vol. 5, páginas 4–24.
- Velázquez Jasso, A. A. (2002). *Modelado y simulación del conformador digital de haz en antenas inteligentes empleando optimización de pesos*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 223 pp.
- Vázquez Olguín, M. A. (2009). *Estimación de la posición de múltiples fuentes con movilidad, empleando algoritmo recursivo EM*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 72 pp.
- Yepes Arbeláez, L. F. (2006). *Conformación digital de haz adaptativa vía el método de proyección paralela en agrupamiento de antenas*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 96 pp.
- Zamora Rodríguez, J. A. (2002). *Modelado y simulación de técnicas para conformación de haz para antenas inteligentes*. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 298 pp.
- Zooghby, A. E. (2005). *Smart antenna engineering*. Artech House, Norwood, MA. 324 pp.