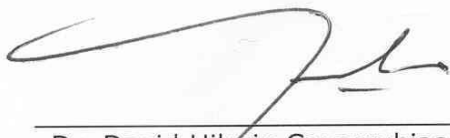


TESIS DEFENDIDA POR  
**Lennin Enrique Amador Castro**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



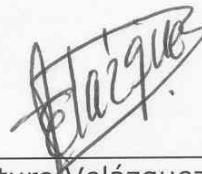
Dr. Roberto Conte Galván

*Director del Comité*



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

*Miembro del Comité*



Dr. Arturo Velázquez Ventura

*Miembro del Comité*



Dr. David Salazar Miranda

*Miembro del Comité*



Dr. José Luis Medina Monroy

*Miembro del Comité*



Dr. Arturo Velázquez Ventura

*Coordinador del programa de  
posgrado en Electrónica y  
Telecomunicaciones*



Dr. Edgar Gerardo Pavía López

*Director de Estudios de Posgrado*

10 de Agosto de 2007

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



---

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

---

**RECONFIGURACIÓN DINÁMICA DEL PATRÓN DE RADIACIÓN EN  
AGRUPAMIENTOS DE ANTENAS A BORDO DE SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA**

TESIS

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

Presenta:

**LENNIN ENRIQUE AMADOR CASTRO**

Ensenada, Baja California, México. Agosto de 2007.

Resumen de la tesis de **Lennin Enrique Amador Castro**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**. Ensenada, Baja California. Agosto del 2007.

## **RECONFIGURACIÓN DINÁMICA DEL PATRÓN DE RADIACIÓN EN AGRUPAMIENTOS DE ANTENAS A BORDO DE SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Roberto Conte Galván  
Director de Tesis

Tradicionalmente los sistemas de satélites de órbita baja han sido diseñados para ofrecer servicio continuo empleando constelaciones de satélites que se distinguen por su capacidad de cobertura global, de difusión y de permitir movilidad a sus usuarios. Sin embargo, la baja ganancia que ofrece el empleo de antenas omnidireccionales, así como el gran número de trasposos de células dentro del área de cobertura del satélite debido al uso de antenas sectoriales, y la poca duración del satélite a la vista de la estación terrena, provocan que la calidad del enlace no se aproveche de la manera más eficiente. La tecnología de antenas inteligentes permite generar diagramas de radiación adaptables y más directivos, así como controlar el nivel de los lóbulos laterales, permitiendo adaptarse a las condiciones del medio de transmisión y mejorando los parámetros de calidad de servicio (QoS) en estos sistemas, optimizando los recursos del satélite y logrando un incremento en la capacidad de tráfico así como un mejor desempeño del enlace satelital.

Se ha encontrado poca información acerca del uso de agrupamientos de antenas sobre satélites de órbita baja, y nada acerca del uso de haces dinámicos desde el satélite a la Tierra. Este trabajo de investigación considera la utilización de agrupamientos de elementos de antenas planares para establecer enlaces de comunicaciones entre satélites de órbita baja (LEOS) y estaciones terrenas de usuario (ET), dentro de una red satelital de comunicaciones basada en el uso de constelaciones de LEOS. Esto permite modificar el diagrama de radiación del agrupamiento de antenas, dirigiendo el lóbulo principal de manera adaptable a bordo del satélite hacia una dirección específica en la Tierra dentro de su ángulo de visibilidad. Además de obtener un haz más directivo y un mayor control sobre el impacto de sus lóbulos laterales, se realiza un análisis del máximo desplazamiento permitido del haz principal durante el tiempo de visibilidad del satélite, a fin de mantener una cierta probabilidad de error dentro de los límites de QoS, considerando un esquema de modulación QPSK.

**Palabras clave:** *LEOS, QoS, Cobertura del satélite, Probabilidad de error, Agrupamiento de antenas, Lóbulo principal, Diagrama de radiación*

Abstract of the thesis presented by **Lennin Enrique Amador Castro**, as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California. August 2007.

## **DYNAMIC RECONFIGURATION OF THE RADIATION PATTERN IN ANTENNA ARRAYS ONBOARD LOW EARTH ORBIT SATELLITES**

Abstract approved by:

---

Dr. Roberto Conte Galván  
Thesis Director

Traditionally Low Earth Orbit Satellites (LEOS) systems have been designed to offer continuous service using satellite constellations, which stand out for their global coverage capacity, broadcast and ability to support user mobility. However, the low gain that omnidirectional antennas offer, as well as the large number of handovers within the satellite footprint due to the use of sector and spot beam antennas, and the short satellite viewing time from the earth station, prevent the link quality to be used more efficiently. Array antenna technology allows the generation of steerable, adaptive and more directional radiation patterns with full control of sidelobe levels, adapting to the transmission channel conditions and improving Quality of Service (QoS) parameters, thus optimizing satellite resources and increasing traffic capacity as well as improving satellite link performance.

Little information has been found on the use of antenna arrays onboard low earth orbit satellites, and nothing regarding the use of dynamic beams from the satellite towards an earth station. This research work considers the use of planar element antenna arrays to establish communications links between Low Earth Orbit Satellites (LEOS) and user earth stations (ET) within a satellite communications network based on the use of LEOS constellations. This allows modifying the antenna array radiation pattern, directing adaptively the main lobe onboard the satellite towards a specific direction over the Earth, within its visibility angle. In addition to obtaining a more directive beam and a better control over the impact of its side lobes, an analysis of maximum allowed beam displacement during the satellite visibility time is performed, in order to maintain a certain error probability within QoS limits, considering the use of QPSK modulation.

**Keywords:** *LEOS, QoS, Satellite coverage, Error probability, Antenna arrays, Main lobe, Radiation pattern.*

## **DEDICATORIA**

### ***A mis padres***

*Héctor Enrique Amador Urías e Irma Leticia Castro Camacho por inculcarme los valores que hacen a una persona un buen ser humano, y por demostrarme que lo más importante en la vida ante la adversidad es saber levantarse, para posteriormente seguir en el camino. Mejores padres DIOS no me pudo dar, gracias porque todo este trabajo es gran parte de ustedes, pues sus palabras fueron la motivación para su culminación... Muchas GRACIAS, LOS QUIERO.*

### ***A mis hermanos***

*Mi hermana mayor Isabel, por ser ejemplo para mí en mi formación académica y sobretodo por estar siempre presente en los momentos más difíciles. A mi hermano Hegel por todas esas tardes de alegrías que hemos pasado en todos estos años y las que faltan. Gracias por ser mi carnalito y lo digo con todo el alma... GRACIAS.*

### ***A mis sobrinas***

*Marlet y Karol, ya que con solo pensar en ustedes los momentos de nostalgia eran más agradables, pues fueron en todo momento fuente de inspiración. Gracias por ser mis angelitos, las quiero mucho.*

### ***A mis amigos***

*Al yiyi (el gato), Víctor (el compadre), Jaime y Miguel (el potro) por toda su amistad brindada en todo este tiempo, se que como yo ustedes se alegran por esto.*

### ***A mis tíos***

*que siempre han confiado en mi, gracias por el apoyo brindado.*

### ***A mis abuelos***

*Albertina por ser ejemplo de vida para mí, gracias por que siempre estuviste pendiente de mí durante estos años de estudio fuera de mi mochis querido. También quiero agradecer a mi abuela María, aunque ya no estás presente físicamente, sé que desde el cielo tus bendiciones fueron parte importante para realizar este trabajo.*

### ***A María José***

*por llegar a mi vida en medio del camino y estar siempre presente en todos estos meses, me has permitido ver las cosas con otro matiz, doy gracias a Dios por permitirme haberte conocido, por darme la oportunidad de compartir grandes anécdotas, aunque se que la distancia ha intervenido un poco, sin embargo gracias por tu paciencia, solo espero el momento de volverte a ver y recuperar todo este tiempo. Gracias por ser como eres, por brindarme tu amistad y confianza, y sobretodo por ser una persona especial para mí, pues tú también fuiste motivo de inspiración en la parte final de este trabajo. Muchas gracias j j*

*“Una vida sin motivos, es un sendero sin sentido. Gracias por ser ese motivo, pues con ello aun sigo vivo”.*

## AGRADECIMIENTOS

A DIOS por brindarme paciencia en los momentos difíciles, sabiduría en los momentos de estudio y sobre todo por permitirme disfrutar el don más hermoso que nos has sido regalado: la vida.

A mi familia, por todo el apoyo brindado y ser motivo de inspiración a lo largo de este trabajo de tesis.

Al Dr. Roberto Conte Galván, por sus consejos y comentarios que me dieron la oportunidad de aprender de su experiencia vivida como investigador, así como también por convertir los momentos de estudio en momentos más agradables.

Al Dr. David Covarrubias Rosales, por todo su apoyo otorgado desde el inicio de mis estudios en CICESE como asesor durante el primer año, hasta la culminación de este trabajo de tesis. Gracias por sus consejos, críticas y la guía adecuada, ya que permitieron forjar en mí la forma en que se realizan las cosas para la obtención de resultados.

A los miembros de mi comité de tesis, Dr. Arturo Velázquez, Dr. José Luis Medina, Dr. David Salazar, por sus explicaciones y aportaciones realizadas para este trabajo, pero sobretodo gracias por formar parte de este comité, ya que ayudaron en gran medida.

A mis amigos del Grupo de Comunicaciones Inalámbricas (GCI): Richard, Edna, Jorge y Rubén, por brindarme su amistad, ayuda, compañía y compartir momentos de armonía no solo en la escuela sino fuera de ella.

También agradezco a mi gran amigo Beto por toda su amistad brindada no solo durante la maestría, sino a lo largo de todos estos años en que nos conocemos, a mis amigos y compañeros de generación, Mario, Iván, Andalón, Kobe, Aldo, Daniel, Dania, Javier, Paúl, Sarai, Lupita, Alejandra, Luis, Jonatan, Sergio, Andrés, Marco, Varún, Aldo, Carlitos, por todas esas tardes y momentos de alegría que quedarán grabados en nuestras memorias.

A todo el personal del CICESE y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por permitirme continuar con mis estudios y por el apoyo económico suministrado.

# Índice

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>viii</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL</b>	<b>1</b>
I.1. Antecedentes.....	4
I.2. Planteamiento del problema.....	5
I.3. Objetivo de la tesis.....	6
I.4. Metodología de la investigación.....	7
I.5. Estado del arte.....	8
I.6. Organización de la tesis.....	8
<b>CAPÍTULO II. CALIDAD DE SERVICIO (QoS) EN LOS SISTEMAS DE SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA (LEOS)</b>	<b>10</b>
II.1. Introducción a las comunicaciones por satélite.....	10
II.1.1. Características de las comunicaciones por satélite.....	12
II.2. Características básicas de los sistemas por satélite.....	13
II.3. Introducción a los sistemas de satélites de órbita baja.....	13
II.4. Diseño y modelado de constelaciones de satélites LEO.....	15
II.4.1. Consideraciones para el diseño de constelaciones de LEOS.....	16
II.5. Calidad de servicio (QoS) en los sistemas de comunicación por satélite.....	22
II.5.1. Cálculo de enlaces de comunicaciones vía satélite.....	25
II.6. Conclusiones.....	30
<b>CAPÍTULO III. ANTENAS INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR SATÉLITE</b>	<b>31</b>
III.1. Introducción.....	31
III.2. Antenas sectoriales.....	32
III.3. Antenas inteligentes en los sistemas de comunicación por satélite.....	33
III.3.1. Beneficios de las antenas inteligentes.....	35
III.3.2. Diferencias entre antenas inteligentes y los sistemas tradicionales.....	36
III.4. Parámetros de antenas.....	37
III.4.1. Diagrama de radiación.....	37
III.4.1.1. Parámetros de la estructura lobular del diagrama de radiación.....	38
III.4.2. Directividad y ganancia de antena.....	40
III.5. Agrupamientos de antenas.....	41
III.5.1. Agrupamiento lineal de antenas.....	44



## Índice (continuación)

III.5.1.1. Manipulación del diagrama de radiación de un agrupamiento lineal.....	47
III.5.1.2. Ancho de haz en función del direccionamiento del diagrama de radiación de un agrupamiento lineal.....	49
III.5.2. Agrupamiento planar de antenas.....	50
III.5.2.1. Directividad de un agrupamiento planar de antenas.....	53
III.6 Conclusiones.....	55
<b>CAPÍTULO IV. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>56</b>
IV.1. Introducción.....	56
IV.2. Desarrollo del proceso de simulación.....	57
IV.3. Consideraciones de simulación.....	59
IV.4. Escenarios de simulación.....	62
IV.4.1. Tecnología de antenas inteligentes para una red satelital con altura orbital de 780 km.....	62
IV.4.2 Tecnología de antenas inteligentes para una red satelital con altura orbital de 1400 km.....	70
IV.4.3 Tecnología de antenas inteligentes para una red satelital con altura orbital de 1700 km.....	75
IV.4.4 Técnica de optimización Tchebyscheff.....	79
IV.4.4.1 Red satelital con altura orbital de 780 km utilizando Tchebyscheff.....	80
IV.4.4.1 Red satelital con altura orbital de 1400 km utilizando Tchebyscheff.....	83
IV.5. Análisis de resultados.....	86
IV.5.1. Desplazamiento del haz principal y ganancia de antena.....	86
IV.5.2. Tiempo de visibilidad y radio de cobertura.....	88
IV.6. Análisis numérico y conclusiones.....	94
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y CONTRIBUCIONES</b>	<b>96</b>
V.1. Conclusiones.....	96
V.2. Recomendaciones.....	100
V.3. Aportaciones.....	101
V.4. Trabajo futuro.....	102

## Índice (continuación)

<b>REFERENCIAS</b>	<b>104</b>
<b>APÉNDICE A. AGRUPAMIENTOS PLANARES TCHEBYSCHIEFF</b>	<b>108</b>
A.1 Propiedades de los polinomios de Tchebyscheff.....	108
A.2 Agrupamientos planares Tchebyscheff.....	109

## Lista de Figuras

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
1	Metodología de investigación del desarrollo del trabajo de tesis.....	7
2	Constelación para cobertura global del sistema IRIDIUM [ <i>Del Valle, 2006</i> ].....	15
3	Consideraciones geométricas en el diseño de una constelación satelital.....	17
4	Relaciones geométricas de los hexágonos inscritos en las áreas de cobertura del satélite [ <i>Jamalipour, 1998</i> ].....	19
5	Potencia recibida en función de la relación portadora ruido, limitado por las restricciones de disponibilidad o de calidad en las prestaciones del sistema [ <i>ITU, 2002</i> ].....	24
6	Probabilidad de error en función de la calidad del enlace, con modulación QPSK y FEC con tasa $\frac{1}{2}$ .....	28
7	Diagrama de radiación de una antena sectorial a bordo de un satélite.....	33
8	Direccionamiento del haz principal de un agrupamiento de antenas a bordo de LEOS.....	34
9	Haz dirigible de un agrupamiento de antenas.....	36
10	Parámetros de la estructura lobular del diagrama de radiación: a) plano lineal, b) gráfica polar [ <i>Conte, 2006</i> ].....	39
11	Tipos de geometrías de agrupamientos de antenas a) geometría planar, b) geometría circular, c) geometría lineal.....	43
12	Estructura de un agrupamiento lineal de antenas.....	45

## Lista de Figuras (continuación)

13	Control de la orientación del diagrama de radiación de un agrupamiento lineal mediante la asignación de pesos.....	47
14	Agrupamiento planar de antenas de $M \times N$ elementos.....	51
15	Proceso de simulación empleado para la generación de haces dinámicos, a partir de la calidad de servicio y del diseño de constelaciones LEOS.....	58
16	Calidad del enlace total en función de la probabilidad de error para un BER de $10^{-3}$ y $10^{-6}$ , considerando una modulación QPSK y FEC con tasa $\frac{1}{2}$ .....	61
17	BER y HPBW de un agrupamiento de $22 \times 22$ elementos para diferentes desplazamientos del haz principal, en una red satelital LEO con altura orbital de 780 km y $\xi_{\min}$ de $12.7^\circ$ .....	64
18	BER y HPBW de un agrupamiento de $22 \times 22$ elementos para un desplazamiento del haz principal de $\pm 60^\circ$ , en una red satelital LEO con altura orbital de 780 km y $\xi_{\min}$ de $12.7^\circ$ .....	65
19	BER y HPBW de un agrupamiento de $14 \times 14$ elementos para diferentes desplazamientos del haz principal, en una red satelital LEO con altura orbital de 780 km y $\xi_{\min}$ de $30.8^\circ$ .....	67
20	Respuesta natural del diagrama de radiación de un agrupamiento de $14 \times 14$ elementos de antenas: a) en el espacio, b) coordenadas esféricas.....	68
21	Ganancia, potencia y PIRE requeridos en el presupuesto de enlace en función del número de elementos de antenas para una constelación LEO de 780 km.....	69
22	BER y HPBW de un agrupamiento de $29 \times 29$ elementos para diferentes desplazamientos del haz principal, en una red satelital LEO con altura orbital de 1400 km y $\xi_{\min}$ de $19.28^\circ$ .....	72

## Lista de Figuras (continuación)

23	Respuesta natural del diagrama de radiación de un agrupamiento de 29x29 elementos en el modo transversal, con espaciamiento uniforme de $0.5\lambda$ .....	73
24	Ganancia, potencia y PIRE requeridos en el presupuesto de enlace en función del número de elementos de antenas para una constelación LEO de 1400 km.....	74
25	BER y HPBW de un agrupamiento de 41x41 elementos para diferentes desplazamientos del haz principal, en una red satelital LEO con altura orbital de 1700 km y $\xi_{\min}$ de $9.7^\circ$ .....	76
26	Respuesta natural del diagrama de radiación en el modo transversal de un agrupamiento de 41x41 elementos, con espaciamiento uniforme de $0.5\lambda$ .....	77
27	Ganancia, potencia y PIRE requeridos en el presupuesto de enlace en función del número de elementos de antenas para una constelación LEO de 1400 km.....	78
28	BER y HPBW de un agrupamiento de 14x14 elementos aplicando síntesis de Tchebyscheff, en una red satelital LEO con altura orbital de 780 km y $\xi_{\min}$ de $30.8^\circ$ .....	82
29	Diagrama de radiación en el modo transversal de un agrupamiento de 14x14 elementos, aplicando síntesis de Tchebyscheff con espaciamiento uniforme de $0.5\lambda$ .....	82
30	BER y HPBW de un agrupamiento de 29x29 elementos aplicando síntesis de Tchebyscheff, en una red satelital LEO con altura orbital de 1400 km y $\xi_{\min}$ de $19.287^\circ$ .....	84
31	Diagrama de radiación en el modo transversal de un agrupamiento de 29x29 elementos, aplicando síntesis de Tchebyscheff con espaciamiento uniforme de $0.5\lambda$ .....	84

## Lista de Figuras (continuación)

32	Desplazamiento en elevación del haz principal de un agrupamiento de 14x14 elementos en respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff...	87
33	Ganancias de los agrupamientos de antenas de 14x14 y 29x29 elementos, en función del desplazamiento del haz principal en su respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff.....	88
34	Tiempo de visibilidad del satélite y radio de cobertura del haz principal sobre la Tierra, para un agrupamiento de 14x14 elementos en su respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff.....	89
35	Tiempo de visibilidad del satélite y radio de cobertura del haz principal sobre la Tierra, para un agrupamiento de 29x29 elementos en su respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff.....	91
36	Probabilidad de error de una red satelital con altura orbital de 1400 km para ángulos mínimos de elevación de la ET de 10°, 19.28°, 22°, 25°, 30° y 35°.....	93
37	Consumo de potencia del agrupamiento de antenas en su respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff para una constelación de 780 km y 1400 km.....	94
38	Polinomios de Tchebyscheff de grado $n$ [ <i>Cardama, 2002</i> ].....	108

## Lista de Tablas

<i>Tabla</i>		<i>Página</i>
I	Características de diseño de los sistemas Iridium y Globalstar.	22
II	Escenarios de simulación.	60
III	Parámetros de diseño para una constelación de satélites LEO con altura orbital de 780 km y $\xi_{\min}$ de 12.7°.	62
IV	Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y Rb de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 780 km y $\xi_{\min}$ de 12.7°.	63
V	Parámetros de diseño para una constelación de satélites LEO con altura orbital de 780 km y $\xi_{\min}$ de 30.8°.	66
VI	Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y Rb de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 780 km y $\xi_{\min}$ de 30.8°.	66
VII	Parámetros de diseño para una constelación de satélites LEO con altura orbital de 1400 km y $\xi_{\min}$ de 19.287°.	70
VIII	Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y Rb de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 1400 km y $\xi_{\min}$ de 19.287°.	71
IX	Parámetros de diseño para una constelación de satélites LEO con altura orbital de 1700 km y $\xi_{\min}$ de 9.7°.	75
X	Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y Rb de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 1700 km y $\xi_{\min}$ de 9.7°.	75
XI	Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y Rb de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 780 km aplicando síntesis de Tchebyscheff.	80

## Lista de Tablas (continuación)

XII	Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y Rb de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 1400 km aplicando síntesis de Tchebyscheff.	83
XIII	Tiempo de visibilidad y radio de cobertura del haz principal de un agrupamiento de 14x14 elementos en su respuesta natural.	90
XIV	Tiempo de visibilidad y radio de cobertura del haz principal de un agrupamiento de 14x14 elementos aplicando síntesis de Tchebyscheff.	90
XV	Tiempo de visibilidad y radio de cobertura del haz principal de un agrupamiento de 29x29 elementos en su respuesta natural.	91
XVI	Tiempo de visibilidad y radio de cobertura del haz principal de un agrupamiento de 29x29 elementos aplicando síntesis de Tchebyscheff.	92
XVII	Probabilidad de error en función del ángulo mínimo de elevación de la ET para una constelación de LEOS con altura orbital de 1400 km.	93



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN GENERAL

Los sistemas de Satélites de Órbita Baja Terrestre (Low Earth Orbit Satellites-LEOS) han sido desarrollados para ofrecer servicios de comunicación global. Sin embargo, el empleo de antenas omnidireccionales con su baja ganancia los hace susceptibles al desvanecimiento por multitrayectorias (edificios, cerros) que degrada la información de recepción. Utilizando un agrupamiento de antenas en fase (phased array antenna)<sup>1</sup> se puede combatir estos efectos multitrayectoria, reducir la interferencia, incrementar la eficiencia espectral, obtener diversidad en la ganancia y en general mejorar las prestaciones del sistema. Un sistema que utiliza un agrupamiento de antenas en fase es capaz de mejorar las técnicas avanzadas de procesamiento, el cual es conocido como *sistema de antenas inteligentes* [Lin, 1997]. Hoy en día, las demandas en servicios de banda ancha para las comunicaciones por satélite están creciendo rápidamente. Los futuros sistemas satelitales ofrecerán muchos servicios nuevos, tales como acceso a Internet a alta velocidad y servicios multimedia de banda ancha.

---

<sup>1</sup> Se define como un agrupamiento de antenas cuyo haz principal es controlado variando la fase o el tiempo de retardo de cada uno de los elementos de antenas que conforman el agrupamiento.

---

Dadas las limitaciones que se presentan en el espectro de frecuencia para los sistemas satelitales, resulta muy importante mejorar la eficiencia del espectro a fin de mantener la capacidad del sistema. La tecnología de antenas inteligentes llega a ser una de las técnicas más prometedoras para mejorar la capacidad de los sistemas de comunicaciones inalámbricas, pues una antena inteligente es capaz de generar haces múltiples realizando el acceso múltiple por división espacial (SDMA), en la cual la idea básica es generar un gran número de haces con alta ganancia y direccionamiento independiente. Esto se obtiene dividiendo el área de servicio del satélite en un gran número de células, donde cada célula tiene el servicio de un solo ancho haz de la antena [Li, 2004].

Los sistemas de comunicación satelital se distinguen por su capacidad de cobertura global, su flexibilidad de ancho de banda en demanda y su habilidad para soportar movilidad. Actualmente se tienen haces sectoriales (haces múltiples) que dividen el área de cobertura del satélite en varias células, similar al sistema IRIDIUM<sup>2</sup>. Siguiendo con este principio, en el empleo de antenas con haces múltiples, la huella de cada satélite se divide en varias áreas llamadas células, en donde, el concepto básico de dividir la huella del satélite dentro de células pequeñas, proviene de la misma idea que los sistemas terrestres celulares actuales [Jamalipour, 1998]. Generalmente mediante el empleo de antenas sectoriales se tienen las siguientes ventajas:

- Se tiene un reuso en la banda de frecuencias, así como una mejora en la eficiencia del ancho de banda.

---

<sup>2</sup> El sistema IRIDIUM está formado por una constelación de 66 satélites a una altura orbital de 740 km, con una huella satelital de 48 *spots beams* o haces tipo pincel.

---

---

- El consumo de potencia en los receptores de los usuarios puede reducirse debido a la concentración de potencia en áreas más pequeñas.

Sin embargo, el uso de antenas sectoriales en los sistemas de comunicación satelital trae consigo traspasos múltiples de células dentro del área de cobertura del satélite.

Hoy en día, una de las técnicas para lograr los requerimientos en capacidad y calidad de servicio en los sistemas de comunicaciones inalámbricas, se basa en el uso de antenas inteligentes o antenas adaptables. El objetivo detrás de este concepto, es generar diagramas de radiación adaptables a las condiciones cambiantes del área de cobertura del satélite, así como a los cambios en el medio de transmisión. Con esto la antena adaptable es capaz de cumplir varias funciones extra:

- Evitar desperdicio de potencia radiada en direcciones diferentes a la del usuario de interés, en este caso, la estación terrena (ET).
  - Eliminar señales interferentes de distintos usuarios a la ET de interés.
  - Aumentar la calidad del enlace terrestre-satelital y con ello mejorar la relación portadora ruido ( $C/N$  – carrier-to-noise).
  - Manejar escenarios múltiples a partir de una reconfiguración electrónica del diagrama de radiación.
  - Reducir la propagación multitrayectoria, la cual se logra al dirigir diagramas de radiación más directivos hacia la ET.
  - Simplificar parámetros de construcción de la estación terrena, reduciendo con ello los costos en el diseño de antenas.
- 
-

Una de las alternativas de las comunicaciones satelitales, la cual se aborda en esta tesis, es el diseño, modelado y simulación de diagramas de radiación por medio de un agrupamiento de antenas a bordo de un satélite de órbita baja. Actualmente los sistemas satelitales utilizan agrupaciones de antenas para brindar servicios personalizados e incrementar el ancho de banda disponible. Este trabajo se centra en el diseño de una constelación satelital utilizando la tecnología de antenas inteligentes<sup>3</sup>, para lo cual se describen los parámetros básicos de antenas, y se analiza su diagrama de radiación.

## **I.1 Antecedentes.**

Las comunicaciones satelitales son uno de los logros más impresionantes de los programas espaciales, los cuales han generado contribuciones importantes dentro de las comunicaciones internacionales. Un satélite de comunicación es básicamente un sistema autónomo eléctrico y electrónico, que se desplaza alrededor de la Tierra de acuerdo a una velocidad angular dependiente de su altura orbital, generando una serie de efemérides o parámetros orbitales del satélite [Pratt, 1986], cuyo objetivo principal es iniciar la transmisión de información a partir de un punto a otro a través de un repetidor en el espacio.

La transmisión de información desde satélites de órbita baja, implica la transmisión de información entre un satélite en movimiento dentro de su trayectoria orbital sobre la Tierra, y una estación terrena fija en un punto de la superficie terrestre.

---

<sup>3</sup> A lo largo de este trabajo, el término *antenas inteligentes* será utilizado para hacer referencia a un agrupamiento de antenas.

---

---

La radiación del ancho de haz principal desde el agrupamiento de antenas a bordo del satélite hacia el usuario final situado en una dirección específica en tierra, permitirá optimizar el consumo de potencia. Además de mejorar este consumo de energía, se puede proporcionar una mayor capacidad de tráfico en las áreas cubiertas por el haz de la antena, evitando dar servicio a lugares con poca o nula población. Por lo tanto, el uso de agrupamientos de antenas adaptables a bordo del satélite, permite reconfigurar su diagrama de radiación de acuerdo a las características del área de interés bajo su trayectoria orbital.

## **I.2 Planteamiento del problema.**

Un problema en los satélites de comunicaciones es que suelen obtener su energía eléctrica a partir de sus agrupamientos de fotoceldas y bancos de baterías. En un satélite LEO esta limitación en potencia se complica aún más debido al continuo bloqueo de la Tierra entre el satélite en órbitas bajas y el Sol, lo que puede causar múltiples eclipses al día. Por otro lado, el ancho de haz está relacionado con la ganancia de las antenas a bordo del satélite. En algunos casos al no tenerse haces muy directivos provoca que dicha ganancia no sea muy eficiente. Por lo tanto, la ganancia de antena será mayor a medida que el ancho de haz sea más estrecho, repercutiendo directamente en las dimensiones de la estación terrena, que pueden simplificarse en los siguientes beneficios:

- Se requiere una Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) mucho menor en la estación terrena para el enlace ascendente.
  - Se requiere una figura de mérito (G/T) mucho menor en la ET para el enlace descendente.
- 
-

La motivación de este trabajo es mejorar la eficiencia en el consumo de potencia de un satélite mediante el empleo de la tecnología de antenas inteligentes en los sistemas de comunicaciones por satélite, particularmente en la reconfiguración dinámica del diagrama de radiación. La capacidad que tienen los agrupamientos de antenas para modificar su diagrama de radiación puede ser aprovechada para dirigir el lóbulo principal de manera adaptable desde el satélite hacia el usuario final en una dirección específica en la Tierra. De esta forma mediante el empleo de un agrupamiento en el plano pueden generarse diagramas de radiación más directivos y, por consecuencia, obtenerse ganancias mayores en la dirección deseada.

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

Analizar y simular haces dinámicos por medio de un agrupamiento de antenas en el plano a bordo de un satélite de órbita baja, dirigiendo el lóbulo principal de manera adaptable dentro del área de cobertura y durante el tiempo de visibilidad del satélite hacia un punto fijo sobre la Tierra (ET), evaluando parámetros de antena, como dirigibilidad del haz, ancho de haz principal, ganancia y directividad, así como probabilidad de error dentro del presupuesto de enlace que permitan el diseño óptimo de una constelación de LEOS.

---

---

## I.4 Metodología de la investigación.

Los pasos empleados para la metodología del desarrollo de este trabajo utilizando la plataforma de MATLAB para la obtención de resultados, los cuales se presentan en el contenido de esta tesis, se muestran en la Figura 1.

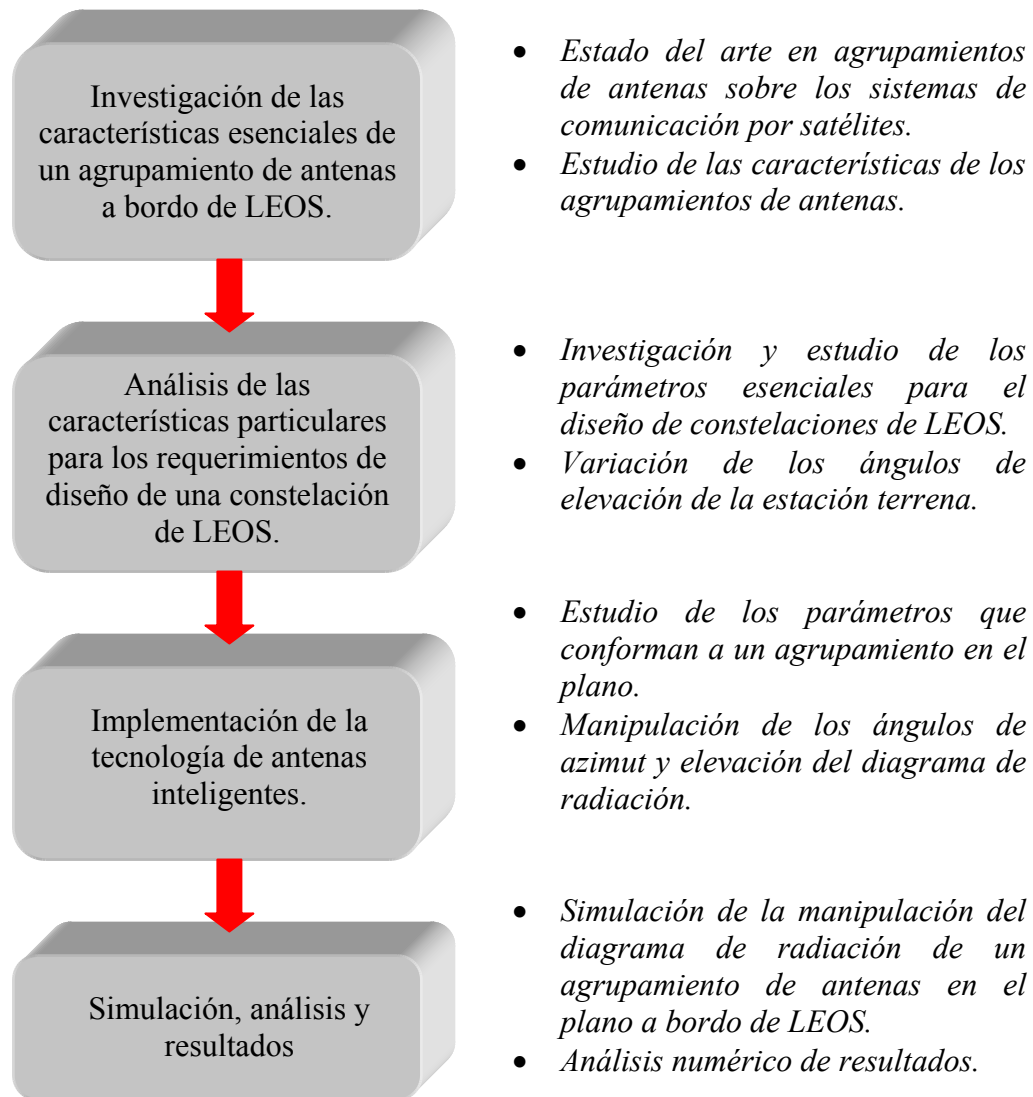


Figura 1. Metodología de investigación en el desarrollo del trabajo de tesis.

## **I.5 Estado del arte.**

A partir del inicio de operación del sistema IRIDIUM en 1998, el avance de la tecnología relacionada con el diseño de antenas en los sistemas de comunicaciones por satélite se intensificó, debido a la aparición de agrupamientos de antenas a bordo de satélites de órbita baja. Estos consistían en agrupamientos de antenas planares con haces sectorizados que mejoraban las prestaciones del sistema, permitiendo obtener un reuso de frecuencia, así como también una alta ganancia de la antena del satélite al tenerse haces más estrechos. En trabajos reportados por Langley [2005], se presenta la incorporación de agrupamientos de antenas en estaciones terrenas, teniéndose un incremento en la capacidad del sistema al rastrear la señal del satélite de manera más eficiente. En base a esto, surge el interés de este trabajo en incorporar la tecnología de antenas inteligentes desde la perspectiva a bordo de un satélite de órbita baja.

## **I.6 Organización de la tesis.**

Este trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera:

En el capítulo II se estudian las características básicas de los sistemas de comunicaciones satelitales. Posteriormente se da una breve introducción acerca de los sistemas de satélites de órbita baja, definiendo los problemas principales que implica el trabajar a estas alturas orbitales, para presentar finalmente las consideraciones que permiten establecer el modelo matemático necesario para el diseño de constelaciones de satélites LEO.

---

---



El capítulo III describe la tecnología de antenas inteligentes como la herramienta de aplicación en los sistemas satelitales, destacando los beneficios que conlleva utilizar dicha tecnología sobre otros sistemas que emplean antenas sectoriales. También se describen los parámetros de antena más importantes como son la ganancia, directividad, ancho de haz y diagrama de radiación. Por último se presenta el modelo matemático que permite obtener la respuesta tanto de un agrupamiento lineal como la de un agrupamiento en el plano. En el capítulo IV se comenta sobre los parámetros que sustentan la calidad de servicio, haciendo hincapié en el cálculo de la tasa de bit erróneo (BER) para las comunicaciones vía satélite. Se definen las expresiones matemáticas que permiten calcular la probabilidad de error utilizando una modulación QPSK dentro del presupuesto de enlace. Por otra parte, en el capítulo V se describen los escenarios de simulación de una red satelital para las distintas combinaciones de elementos de antenas sobre distintas alturas orbitales. También se efectúa el análisis de resultados, evaluando la calidad de servicio en función de la probabilidad de error del enlace satelital empleando la tecnología de antenas inteligentes. Finalmente, en el capítulo VI se presentan las conclusiones obtenidas de las estadísticas mostradas en el capítulo V, así como las aportaciones generadas en este trabajo de investigación.

---

---

# CAPÍTULO II

## CALIDAD DE SERVICIO (QoS) EN LOS SISTEMAS DE SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA (LEOS)

### II.1 Introducción a las comunicaciones por satélite.

La tendencia de las telecomunicaciones es prestar servicios sin importar la ubicación del usuario en diversas aplicaciones, como son telefonía, Internet de banda ancha, o el radio digital, entre otros. Una forma de solucionar el problema de suministrar estos servicios sin importar la ubicación del usuario es mediante el uso de satélites. Debido a la complejidad tecnológica del segmento espacial, históricamente se prefirió desarrollar estaciones terrenas de gran tamaño y utilizar satélites relativamente sencillos. El tipo de señal, características y aplicación de la información eran transparentes al satélite, el cual sólo se dedicaba a repetir la misma señal que había llegado a su receptor. Sin embargo, los avances en tecnología de satélites, tanto digitales como redes de datos, apoyan el desarrollo de nuevos transpondedores satelitales con procesamiento a bordo, permitiendo la transmisión de información de banda ancha de calidad con cobertura global [Conte, 2003].

---

---

Las comunicaciones por satélite, ya sea sobre órbitas geoestacionarias (GEO) o no-geoestacionarias (Non-GEO), proporcionan una plataforma eficaz para retransmitir señales de radio sobre la Tierra. Una comunicación implica la transferencia de información entre la fuente y el usuario a través de un medio o canal. Un ejemplo obvio de la transferencia de información a través de medios terrestres, se da por medio del uso de líneas de alambrado, cable coaxial, fibra óptica, o cualquiera de la combinación de estos medios. Los satélites de comunicaciones pueden implicar también el uso de otros subsistemas de comunicación importantes. En este caso, un sistema de comunicaciones por satélite está formado por estaciones terrenas para la transmisión y recepción de las señales. Se necesita además de estaciones que permitan el seguimiento, el control y la supervisión, tanto del satélite como de los sistemas de comunicaciones, a través de los sistemas de telemando y control de los mismos.

En el caso de transmisión directa de televisión vía satélite, el servicio que se da es de tipo unidireccional, por lo que normalmente se requiere una estación transmisora única que emita los programas hacia el satélite, donde numerosas estaciones terrenas de recepción captan solamente las señales provenientes del satélite. Otros tipos de servicios son bidireccionales y las estaciones terrenas son de transmisión y recepción. La función principal de la estación terrena transmisora es la adecuación de las señales para la transmisión hacia el satélite. Por lo tanto, estará formada por un subsistema de antena, un subsistema de seguimiento para apuntar el haz hacia el satélite deseado, un subsistema de transmisión-recepción en radiofrecuencia, una etapa de conversión de frecuencia, modulación y demodulación y un sistema de conexión con las redes terrenales.

---

---

### **II.1.1 Características de las comunicaciones por satélite.**

El diseño de un satélite para un sistema de comunicaciones es un proceso complicado que involucra la interacción de diversas disciplinas. El primer problema es el propio satélite, que debe ser tan pequeño y ligero como sea posible, utilizando el mínimo de energía. Por otro lado, las técnicas de acceso múltiple son también un problema a considerar, pues un satélite puede tener muchos usuarios dispersos en un país o incluso en un hemisferio completo. Por lo tanto, para maximizar el retorno económico el satélite debe proporcionar servicio a un número grande y cambiante de usuarios de manera simultánea y eficiente, con el mínimo control externo posible.

Finalmente se tienen las estaciones terrenas, las cuales deben ser lo suficientemente económicas para que puedan ser compradas por múltiples usuarios, pero a la vez también deben ser potentes y suficientemente sofisticadas para poderse comunicar de manera eficiente con los satélites. Deben ser capaces de encontrar a los satélites de forma rápida y mantener la comunicación con ellos a través de cambios orbitales a veces imprevistos [Pratt, 1986].

En definitiva, los satélites se utilizan para comunicaciones a gran escala entre dos antenas terrenas donde el satélite actúa como un repetidor no regenerativo. Esto es, el satélite simplemente recibe una señal desde una ET transmisora, la amplifica y la retransmite hacia otra estación receptora. Los canales del satélite ofrecen una excelente alternativa a las fibras ópticas y a los cables para transmisión a grandes distancias, particularmente sobre rutas dispersas en las que el tráfico de comunicaciones es pequeño.

---

---

## **II.2 Características básicas de los sistemas por satélite.**

Un sistema de comunicaciones por satélite puede ser dividirse dentro de dos segmentos: un segmento espacial y un segmento espacial. El *segmento espacial* está compuesto obviamente por los satélites. En un satélite de comunicaciones, el equipo que proporciona la conectividad del enlace entre el satélite transmisor y una antena receptora, se le conoce como transpondedor, el cual forma parte de una de las secciones principales de la carga útil. El *segmento terrestre* está compuesto por estaciones terrenas transmisoras y receptoras localizadas en diferentes lugares del planeta, las cuales pueden ser interconectadas con otras redes, así como también incluye a las estaciones de telemetría y comando (TT&C) necesarias para mantener al satélite en operación y monitorear su funcionamiento. También son incluidas en el segmento terrestre aquellas estaciones que se encuentran a bordo de barcos, estaciones comerciales y militares, así como estaciones móviles aeronáuticas. Las funciones de las estaciones terrenas se emplean para la ayuda logística de los satélites, tales como para proporcionar servicios de telemetría y comando [Roddy, 2001].

## **II.3 Introducción a los sistemas de satélites de órbita baja.**

La poca altura orbital de éstos satélites (entre 500 km y 2,000 km sobre la superficie de la Tierra) reduce el retardo de propagación de ida y vuelta de la información transmitida, el cual típicamente es alrededor de 10 ms comparado con los 230 ms para satélites GEO. Debido a que existe un menor trayecto de propagación de las señales, el

---

---

empleo de satélites LEO es óptimo para aplicaciones en tiempo real, como pueden ser la telefonía, videoconferencia y transmisión de datos. Una de las ventajas de los LEOS es que permiten tener terminales de bajo costo, ya que reducen tanto la potencia que los satélites necesitan emplear para transmitir a la ET, como la potencia que las estaciones terrenas requieren para transmitir hacia el satélite. Sin embargo, la baja altura también introduce desventajas, una de ellas es que se requiere de un mayor número de satélites trabajando en conjunto para ofrecer una cobertura completa de la Tierra, lo que se traduce en una mayor complejidad y costo de dichos sistemas. Un satélite LEO viaja a alta velocidad alrededor de su plano orbital para evitar ser atraído por la fuerza gravitacional de la Tierra. Esto provoca que sus transmisiones puedan verse afectadas por variaciones Doppler en el receptor terrestre, aunque este problema puede solucionarse prediciendo dichas variaciones e implementando el equipo para corregirlas. Otra característica de los LEOS es que utilizan varios trasposos de llamada (*hand-off*)<sup>4</sup> entre satélites vecinos para mantener la transmisión continua en tiempo real. Los sistemas satelitales LEO tienen como característica fundamental el constante movimiento de los satélites en sus respectivos planos orbitales de la constelación, así como también el movimiento de rotación de la Tierra. Esto genera varios problemas dentro de los cuales se describen las características de los LEOS, ya que afectan de manera importante los parámetros de calidad de servicio<sup>5</sup> de la información de la señal transmitida. Entre los problemas que afectan la calidad de servicio se encuentran, el esparcimiento en el retardo (*Delay Spread*), trasposos entre satélite (*Hand-off*), retardo

---

<sup>4</sup> El término *hand-off* es encontrado también en la literatura como *handover*.

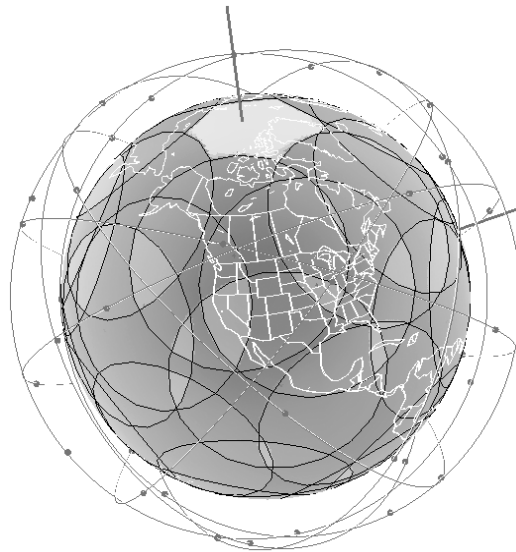
<sup>5</sup> Dentro de los parámetros de calidad de servicio que serán motivo de análisis en este trabajo, el más importante será la tasa de bit erróneo como resultado de emplear un agrupamiento de antenas.

---

---

de propagación en enlaces intersatelitales (ISLs), corrimiento Doppler en frecuencia [Zamora, 2005].

La figura 2 muestra las distintas órbitas del sistema de satélites IRIDIUM, con sus respectivas áreas de coberturas. Dicho sistema consta de 11 planos orbitales con una inclinación de  $86.4^\circ$  con respecto al ecuador, así como de 6 satélites por plano.



*Figura 2. Constelación para cobertura global del sistema IRIDIUM [Del Valle, 2006].*

## **II.4 Diseño y modelado de constelaciones de satélites LEO.**

El diseño óptimo de una constelación de satélites LEO es de suma importancia debido a que éste debe ser capaz de ofrecer una cobertura global, lo cual trae como consecuencia el empleo de decenas de satélites. A continuación se presentan las consideraciones más importantes para el diseño de constelaciones de satélites LEO.

---

---

## II.4.1 Consideraciones para el diseño de constelaciones de LEOS.

En el diseño de constelaciones es necesario tomar en cuenta los parámetros orbitales, entre los cuales podemos destacar los siguientes:

- **La altura orbital** ( $h_{sat}$ ) es la distancia desde la superficie de la Tierra al satélite, la cual se muestra en la Figura 3 y determina el período de rotación del satélite y el tiempo de visibilidad<sup>6</sup> del mismo.  $h_{sat}$  es uno de los parámetros de entrada que se debe definir con anterioridad para el diseño de constelaciones de satélites LEO.
- **El ángulo de inclinación** ( $i$ ) de la órbita de un satélite es el ángulo entre el plano ecuatorial de la Tierra y el plano de la órbita del satélite al entrar al hemisferio norte. Cuando el ángulo de inclinación es  $0^\circ$ , el satélite está directamente arriba del ecuador. Sin embargo, cuando este ángulo de inclinación es de  $90^\circ$ , el satélite pasará sobre cada polo una vez por período.
- **El ángulo mínimo de elevación** ( $\xi_{min}$ ), corresponde al ángulo de elevación de la estación terrena mínimo restringido para evitar problemas de propagación e interferencia terrestre. Si el ángulo de elevación de la ET es menor que el ángulo  $\xi_{min}$ , la ET no podrá comunicarse con el satélite.
- **El ángulo central en Tierra** ( $\alpha$ ) es el ángulo formado a partir del radio de la Tierra ( $r_e = 6378km$ ) y el radio de la órbita del satélite ( $r_s = r_e + h_{sat}$ ).
- **El ángulo nadir** ( $\gamma$ ) corresponde al ángulo visto desde el satélite y se forma con la línea del centro de la Tierra al satélite y la línea del satélite a la ET.

---

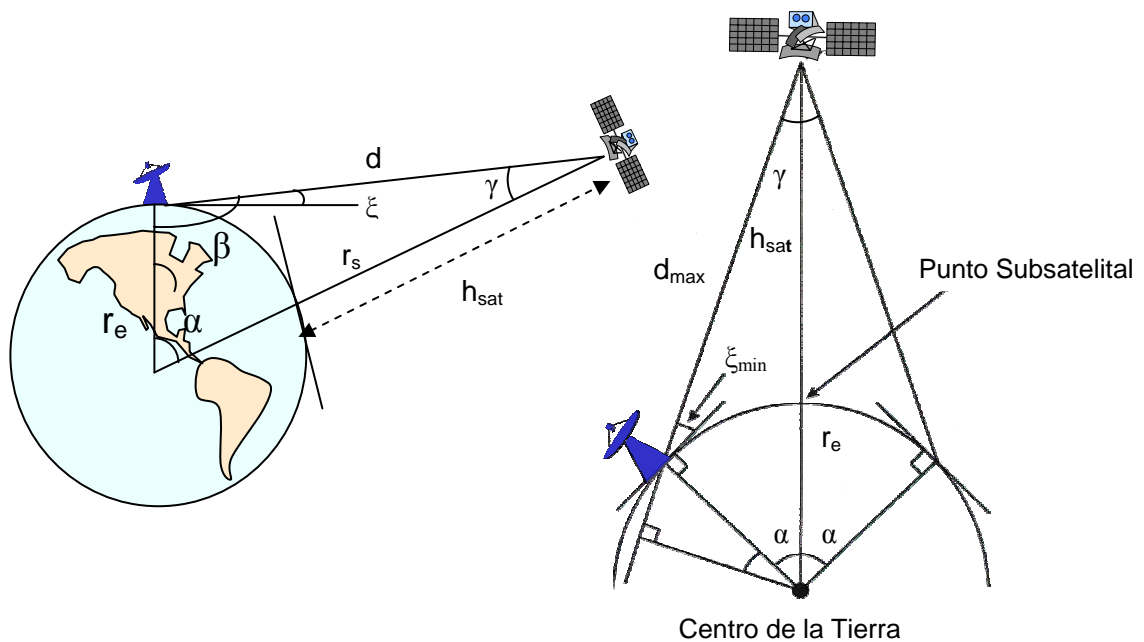
<sup>6</sup> Es el tiempo de enlace entre el satélite y una ET, antes de iniciar comunicación con el satélite adyacente.

---



Con los parámetros anteriormente mencionados es posible establecer las características esenciales para el diseño de constelaciones de satélites de órbita baja, tales como:

- Número de planos orbitales.
- Número de satélites por plano orbital.
- Área de cobertura del satélite.
- Área de traslape en la cobertura individual del satélite.



*Figura 3. Consideraciones geométricas en el diseño de una constelación satelital.*

De acuerdo con la Figura 3 y aplicando la ley de senos de un triángulo, se establece la siguiente expresión descrita por la siguiente relación:

$$\frac{d}{\text{sen}\alpha} = \frac{r_s}{\text{sen}\beta} = \frac{r_e}{\text{sen}\gamma} \quad (1)$$

Despejando  $\gamma$  de la expresión anterior es posible definir el ángulo de nadir:

$$\gamma = \text{sen}^{-1}\left(\frac{r_e}{r_s} \text{sen}\beta\right) \quad (2)$$

Utilizando la relación geométrica de los ángulos internos del triángulo formado en la Figura 4 y las consideraciones geométricas hechas para el diseño de constelaciones, se obtienen las siguientes relaciones [Zamora, 2005]:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \quad (3)$$

Un valor mínimo del ángulo denotado por  $\zeta_{min}$ , define los límites del área de cobertura de un satélite. La forma esférica de la Tierra y los obstáculos naturales tal como las montañas, y cualquier otra localización con un ángulo de elevación menor que  $\zeta_{min}$  no puede ser visto fácilmente desde el satélite, por lo que no se puede realizar una comunicación confiable para ángulos pequeños de elevación. Para un satélite con una huella satelital circular como su área de cobertura, significa que cualquier usuario localizado en el segmento esférico de la Tierra por debajo del ángulo de elevación se encontrará dentro del área de cobertura por el satélite.

---

De acuerdo a las relaciones geométricas mostradas en la Figura 4, el ángulo medio de cobertura en relación al ángulo mínimo de elevación  $\xi_{min}$  puede ser obtenido de la siguiente forma [Jamalipour, 1998]:

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{r_e}{r_s} \cos \xi_{min} \right) - \xi_{min} \quad (4)$$

El cálculo del ángulo medio de cobertura central de la Tierra permite obtener el número mínimo de satélites necesarios para una cobertura global. La huella de cobertura efectiva de un satélite está definida como el hexágono más grande inscrito dentro de la huella del satélite como se aprecia en la Figura 4.

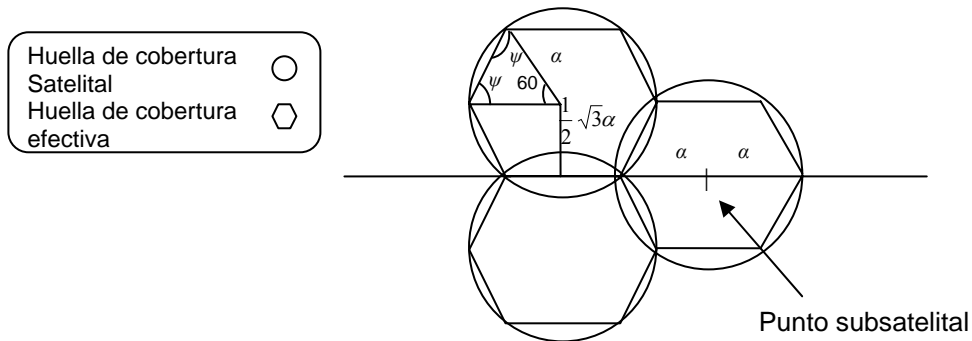


Figura 4. Relaciones geométricas de los hexágonos inscritos en las áreas de cobertura del satélite [Jamalipour, 1998].

Cada hexágono consta de seis triángulos isósceles, donde cada uno tiene un ángulo central de  $60^\circ$ , y dos ángulos idénticos  $\psi$  en la periferia de la huella del satélite. Considerando que la Tierra tiene una forma completamente esférica y de acuerdo en la literatura [Jamalipour, 1998], la relación del ángulo  $\psi$  se obtiene de la siguiente manera:

$$\tan \psi = \frac{\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \cdot \alpha}{\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{\sqrt{3}}{\cos \alpha} \quad (5)$$

Sea  $\sigma$  el ángulo de exceso esférico de los triángulos, matemáticamente se define por la siguiente ecuación:

$$\sigma = 2\psi - \frac{2\pi}{3} \quad (6)$$

De esta forma, el área de cobertura satelital efectiva tomando en cuenta el exceso esférico de los triángulos está dada por la ecuación (7):

$$A_{hex} = 6 \cdot r_e^2 \cdot \sigma \quad (7)$$

Para determinar el número de planos orbitales de una constelación de LEOS, es necesario considerar el área de cobertura de un satélite en el ecuador. Para ello se debe tomar en cuenta la consideración de que al menos haya dos satélites en cada órbita, donde cada órbita deba cubrir  $3r_e\alpha$  del ecuador [Jamalipour, 1998]. Por lo tanto, el número mínimo de órbitas para una cobertura global esta dada por:

$$\Omega = \left\lceil \frac{2\pi}{3\alpha} \right\rceil \quad (8)$$

Donde el término  $\lceil x \rceil$  denota el número entero igual o mayor próximo de  $x$ . Por otra parte, para determinar el número de satélites por plano orbital ( $sat / Orb$ ) para una constelación de satélites LEO se encuentra dada por la siguiente relación [Zamora, 2005]:

---

$$sat / Orb = \left\lfloor \frac{2\pi}{\sqrt{3} \cdot \alpha} \right\rfloor \quad (9)$$

Por ende, el número total de satélites ( $NumSat$ ) de dicha constelación, estará dado por la multiplicación del mínimo requerido de planos orbitales ( $\Omega$ ) y el número de satélites por plano orbital ( $sat / Orb$ ). Esta expresión queda de la siguiente forma:

$$NumSat = (Sat / Orb) [\Omega] \quad (10)$$

Otro parámetro importante a considerar en el diseño de constelaciones de satélites LEO es el tiempo de visibilidad, el cual se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$T_{visibilidad} = \frac{T_{orbital} \cdot 2\alpha}{360} \quad (11)$$

Donde  $T_{orbital}$  representa el tiempo de rotación del satélite alrededor de la Tierra expresado en minutos. Esta ecuación se presenta en (12):

$$T_{orbital} = 165.87 \times 10^{-6} (r_e + h_{sat})^{3/2} \quad (12)$$

De acuerdo a los parámetros de diseño de constelaciones LEOS, la Tabla I presenta una comparación entre las características esenciales de los sistemas IRIDIUM y GLOBALSTAR.

---



---

**Tabla I. Características de diseño entre los sistemas Iridium y Globalstar.**

<b>Parámetros</b>	<b>Iridium</b>	<b>Globalstar</b>
Altitud (km)	780	1400
Número de satélites	66	48
Número de planos	8	6
Tiempo de visibilidad (min)	5.54	8.21
Inclinación (°)	86.4	52
Mínimo retardo de propagación (ms)	2.60	4.63
Método de acceso múltiple	FDMA/TDMA/TDD	CDMA
Modulación	QPSK	QPSK
Haces por satélite	48	16
Radio del haz (km)	300	1127

## **II.5 Calidad de Servicio (QoS) en los sistemas de comunicación por satélite.**

La calidad y disponibilidad de transmisión son problemas esenciales del funcionamiento de todos los sistemas de comunicaciones, debido a los efectos aleatorios en el medio de propagación (interferencia, atenuación por lluvia, etc), o fallas en el equipo, por lo que no es posible garantizar una transmisión perfecta. Por lo tanto, el funcionamiento del sistema solo puede ser descrito en términos de la probabilidad lograda en un nivel de calidad de servicio dado o disponible, por el porcentaje de tiempo durante los cuales dicho nivel puede ser logrado [ITU, 2002]. La calidad de servicio que ofrece una red es experimentada por el usuario, e indica el nivel de calidad que requiere el sistema, así como también el nivel percibido por el servicio prestado.

---

El desempeño de una red se refiere al funcionamiento técnico de los elementos de la red o de su totalidad, contribuyendo en la calidad de servicio que ofrecerá al usuario. Por lo tanto, proporcionar la calidad de servicio basado en la capacidad y limitaciones de la red es ofrecer lo que hay disponible, independientemente de lo que se requiere. La ITU en su recomendación E.800 define a la calidad de servicio como el efecto colectivo del desempeño de servicio, en el cual determina el grado de satisfacción del usuario en servicio.

El nivel de calidad puede expresarse por el usuario en lenguaje técnico y no técnico, por lo que a un usuario típico no le interesa la manera en que se le esté proporcionando dicho servicio, sino que únicamente le interesan los resultados de la calidad de servicio extremo a extremo [Del Valle, 2006].

Dentro de la calidad de servicio existen ciertos factores que pueden ofrecer una medida o valor que sustente dicha calidad pretendida. Algunos de los factores que son conocidos como *parámetros de calidad de servicio* son:

- 1) ***Latencia o retardo.*** Se define como el tiempo total que le toma a un paquete ser transportado desde el transmisor hacia el receptor.
  - 2) ***Variación en el retardo.*** También conocido como *jitter*, es la variación entre los tiempos de retardo que existe en el tránsito de paquetes de extremo a extremo en un enlace.
  - 3) ***Razón de pérdidas de paquetes.*** Se define como la razón del número de paquetes no entregados con respecto al total de paquetes enviados en un enlace.
- 
-

4) **Tasa de bit erróneo (BER)**. También conocido como probabilidad de error, se define como la cantidad de errores de bit que se presentan, para un número de bits transmitidos en un enlace de comunicaciones. En otras palabras, son los bits, elementos, caracteres o bloques incorrectamente recibidos del total de números de bits, caracteres o bloques enviados durante un intervalo de tiempo específico.

Dentro de los parámetros de calidad de servicio descritos anteriormente, sólo la tasa de bit erróneo será motivo de estudio en este trabajo de tesis. El análisis de la dirigibilidad del ancho de haz del agrupamiento de antenas se presenta con más detalle en las estadísticas obtenidas en el capítulo IV, en el cual además de estar en función de su ganancia, éste se encontrará limitado por la probabilidad de error en una cota superior e inferior, tal como se muestra en la Figura 5.

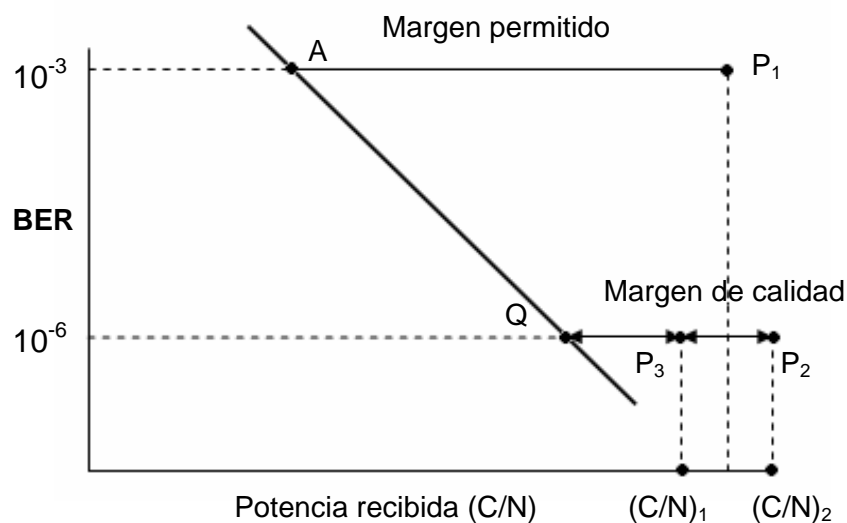


Figura 5. Potencia recibida en función de la relación portadora ruido, limitado por las restricciones de disponibilidad o de calidad en las prestaciones del sistema [ITU, 2002].



Este diagrama representa la curva típica de desempeño en el receptor de un satélite de comunicaciones digitales BER vs C/N, incluyendo FEC (*Forward error correction*). La Figura 5 muestra que el punto *A* representa la disponibilidad del umbral ( $10^{-3}$ ), mientras que el punto *Q* representa el umbral de calidad ( $10^{-6}$ ).

En primer caso  $(C/N)_1$ , el C/N correspondiente a  $P_1$  es mayor que el C/N correspondiente a  $P_3$ , por lo que la calidad del enlace se determina por la restricción de disponibilidad. En el segundo caso  $(C/N)_2$ , el C/N correspondiente a  $P_2$  es mayor que el C/N correspondiente a  $P_1$ , por lo que la calidad del enlace se determina por la restricción de calidad. Cabe señalar, que la curva de desempeño está en función de las características del tipo de FEC utilizado, ya que es un parámetro de gran importancia que define la pendiente de dicha curva. Para las simulaciones realizadas en este trabajo se utilizó una modulación QPSK con un FEC de tasa  $\frac{1}{2}$ .

### **II.5.1 Cálculo de enlaces de comunicaciones vía satélite.**

El propósito del presupuesto de enlace es calcular el nivel de calidad de servicio de un satélite de comunicaciones, el cual se puede dividir como se indica:

- En el caso analógico (transmisiones con modulación en frecuencia), la calidad de servicio se evalúa por la relación señal a ruido (S/N).
- En el caso de las comunicaciones digitales, la calidad es medida por la tasa de bit erróneo de la señal de información.

Sin embargo, se debe hacer énfasis que en aplicaciones prácticas, generalmente se sigue un proceso inverso: para una transmisión de una señal dada entre dos estaciones terrenas con requerimientos dados en disponibilidad y calidad, el propósito final del presupuesto de enlace será calcular los parámetros de diseño técnico para la señal. Estos son el tipo de modulación, código corrección de error, así como la relación G/T y el PIRE para la estación terrena. Estos parámetros técnicos, determinan el tipo de equipo a utilizar (tipo y tamaño de antena, potencia de los amplificadores, módems, códecs, etc) según se indica en ITU [2002].

La calidad de un enlace de comunicaciones digitales se mide de acuerdo al número de bits erróneos recibidos en el extremo final del enlace, donde su probabilidad de ocurrencia es la probabilidad de error ( $P_e$ ). Por lo tanto, la probabilidad de que lleguen bits erróneos para una modulación QPSK durante el diseño es:

$$P_e = Q\left(\frac{2E_b}{N_0}\right) \quad (13)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda \quad (14)$$

donde  $E_b$  es la energía de bit,  $N_0$  es la densidad espectral de potencia de ruido y  $Q(x)$  corresponde a la función de error complementaria. Para fines prácticos, se utiliza una aproximación para la ecuación (14) determinada por:

$$P_e = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (15)$$


---

Otra expresión frecuentemente utilizada en el cálculo de la probabilidad de error es la que se encuentra en término de la función *erfc* ya definida en MATLAB, la cual se muestra en la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (16)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-z^2} dz \quad (17)$$

Dado que la probabilidad de error está en función de  $E_b/N_0$ , es importante definir la expresión que relacione dicho parámetro con el presupuesto de enlace:

$$\frac{E_b}{N_0} (dB) = \frac{C}{N}_{tot} + B_N - R_b \quad (18)$$

donde  $R_b$  se refiere a la tasa de bits utilizada en el enlace,  $C/N_{tot}$  representa el presupuesto de enlace total,  $B_N$  es el ancho de banda de ruido definido por:

$$B_N = \frac{R_b}{\eta_{mod} \cdot r} \quad (19)$$

donde  $\eta_{mod}$  es la eficiencia espectral del tipo de modulación, y  $r$  representa la tasa del código de corrección de errores.

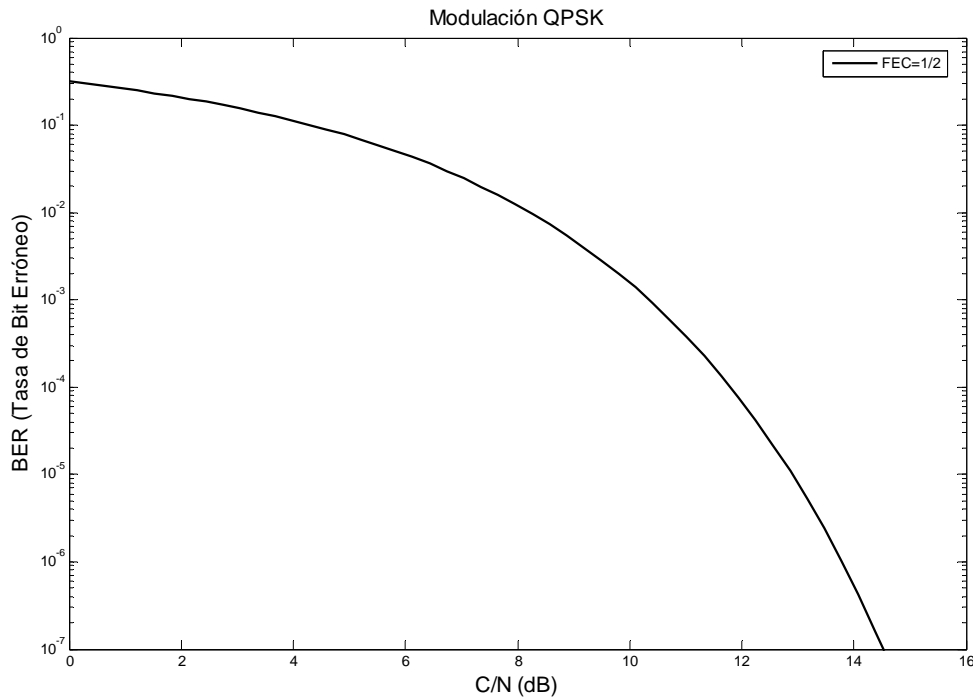


Figura 6. Probabilidad de error en función de la calidad del enlace, con modulación QPSK y FEC con tasa  $\frac{1}{2}$ .

La Figura 6 muestra la pendiente de la curva como resultado de utilizar un código de corrección de error con tasa  $\frac{1}{2}$  para una modulación QPSK. Se puede apreciar que dicha curva se encuentra en función del BER y del presupuesto de enlace. Al emplear los parámetros anteriores se obtiene que en (19), el ancho de banda ( $B_N$ ) será igual a la tasa de bits ( $R_b$ ), y por ende el presupuesto del enlace total será igual a  $E_b/N_0$  dado en (18), es decir,  $C/N|_{tot}=E_b/N_0$  cuando  $B_N=R_b$ .

Por otra parte, la ecuación que presenta el cálculo del presupuesto de enlace total en función del enlace ascendente, descendente y de la relación portadora interferente (C/I), se muestra en (20):

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{tot}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_u} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_d} + \frac{1}{\left(\frac{C}{I}\right)} \quad (20)$$

Las ecuaciones para los enlaces ascendente y descendente se presentan en (21) y (22) respectivamente:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_u = PIRE_{ET} + G/T_{sat} + [kB_N]_{dB} - Lo_u \quad (21)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_d = PIRE_{sat} + G/T_{ET} + [kB_N]_{dB} - Lo_d \quad (22)$$

donde  $k$  es la constante de Boltzman y  $Lo$  representa las pérdidas por propagación por espacio libre. Esta expresión se muestra en (23).

$$Lo = 20 \text{Log} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (23)$$

donde  $R$  es la distancia entre la ET y el satélite, y  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal utilizada.

En las simulaciones realizadas durante todo este trabajo de investigación se empleó la banda de frecuencia Ku, debido a que tiene una longitud de onda pequeña, la cual es ideal en el diseño de agrupamientos de antenas con el fin de miniaturizar dicho agrupamiento.

## II.6 Conclusiones.

En el presente capítulo, se establecieron las ecuaciones que determinan los parámetros de diseño de una constelación de satélites LEO, los cuales coadyuvarán a establecer los escenarios de simulación.

Por otra parte se describió la calidad de servicio en los sistemas de comunicaciones vía satélite, donde se definieron los parámetros que permiten obtener dicha calidad. Para fines de ésta tesis, el parámetro de mayor relevancia fue la tasa de bit erróneo, para lo cual se establecieron las expresiones que permiten obtener la probabilidad de error para una modulación QPSK.

La tasa del código de corrección de error es un parámetro de suma importancia en la calidad de servicio, ya que define la pendiente de la curva entre el BER y el presupuesto de enlace. Esto permite determinar la ganancia y el número de elementos de antenas requerido en el agrupamiento para satisfacer las necesidades del sistema.

El siguiente capítulo trata del problema que implica el uso de antenas sectoriales en los sistemas de comunicación por satélite. Por lo tanto, el objetivo de esa parte será el empleo de la tecnología de antenas inteligentes a bordo de los satélites de órbita baja, a fin de tener la capacidad de dirigir el haz principal durante el período de visibilidad del satélite.

---

---

# CAPÍTULO III

## ANTENAS INTELIGENTES EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES POR SATÉLITE

### III.1 Introducción.

En este capítulo se destaca la importancia que conlleva el utilizar agrupamientos de antenas en los sistemas de comunicaciones por satélite, especialmente en satélites de órbita baja. Se hace una comparación con los sistemas anteriores que empleaban agrupamientos de antenas con haces sectoriales, así como los primeros avances en la incorporación de agrupamientos de antenas en estaciones terrenas, hasta la implementación de las mismas a bordo de LEOS, los cuales representan el estado del arte y el objetivo principal de estudio en este proyecto de tesis.

---

---

### **III.2 Antenas sectoriales.**

En años recientes, las antenas con haces sectoriales múltiples están ganando popularidad en las comunicaciones por satélite, debido a las diversas situaciones del área de cobertura y al cambio en el área de servicio dentro del período del satélite. Es bien conocido que un agrupamiento de antenas en fase es la estructura de radiación más apropiada para producir haces múltiples tipo pincel dentro del área de cobertura que proporciona un satélite. Sin embargo, su costo de manufactura es mucho más alto que otros tipos de antenas tales como los reflectores de alimentadores múltiples, aunque éste último no es flexible como el anterior en considerar las características eléctricas, incluyendo la forma del haz en tiempo real [Bhattacharyya, 2004].

Las ventajas de tener satélites con antenas multihaz incluyen una alta ganancia de antena dentro de cada haz individual, lo que trae consigo una carga útil más compleja y un mayor tamaño en la antena. El tener coberturas con antenas multihaz permite la posibilidad de tener un reuso de frecuencia. Sin embargo, los haces adyacentes deben utilizar distintas bandas de frecuencias entre un haz y otro para evitar la interferencia entre haces, la cual se presenta como una desventaja, pues obliga a las estaciones terrenas a cambiar su frecuencia mientras el satélite pasa por encima.

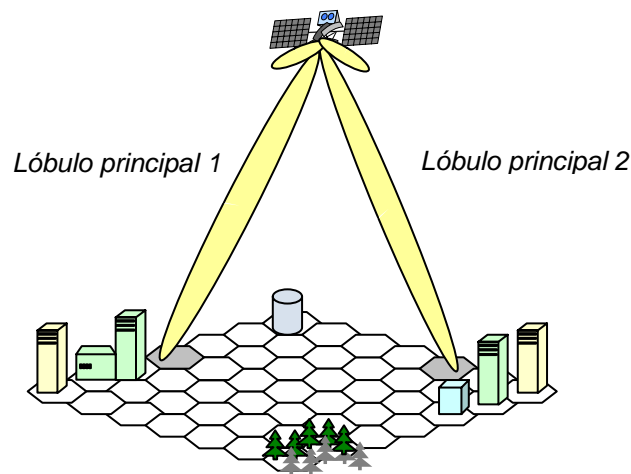
Generalmente la ventaja de tener células múltiples permite mejorar la eficiencia del ancho de banda, debido a la capacidad de reutilizar dichas bandas de frecuencias en células suficientemente separadas. Esto permite dividir un amplio servicio en áreas pequeñas, donde la potencia de la señal de radiofrecuencia de los usuarios es igualmente reducida, lo

---

---



que equivale a tener una alta ganancia en la antena del satélite. En la Figura 7 se muestra la sectorización del área de cobertura de un satélite, brindando servicio hacia distintos usuarios por medio de la generación de haces múltiples. De acuerdo a este principio, la potencia es reducida proporcionalmente al número de células en cada huella del satélite.



*Figura 7. Diagrama de radiación de una antena sectorial a bordo de un satélite.*

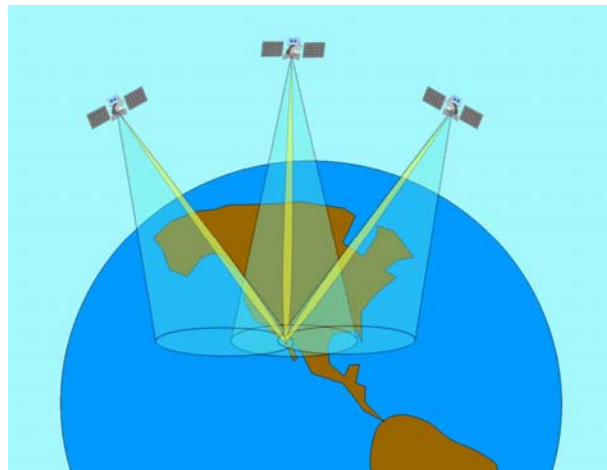
### **III.3 Antenas inteligentes en los sistemas de comunicación por satélite.**

Hoy en día se tienen trabajos de investigación que toman en cuenta la implementación de agrupamientos de antenas en fase en estaciones terrenas, lo que permite que los diagramas de radiación se ajusten electrónicamente miles de ocasiones por segundo para seguir al satélite durante su período de visibilidad [Langley, 2005]. Por lo tanto, las antenas inteligentes proporcionan beneficios en términos de capacidad y funcionamiento con respecto a las antenas estándares, ya que pueden adaptar su diagrama de radiación para

---

adecuarse a un tipo determinado de tráfico o a entornos difíciles. De esta forma, mejoran su rendimiento mediante la combinación de las dimensiones espaciales de la antena con la dimensión temporal. Existen dos tipos básicos que son a) las antenas sectoriales con haces múltiples, las cuales fueron descritas anteriormente, y b) los agrupamientos de antenas adaptativos, cuyo diagrama de radiación varía con el entorno del canal.

El trabajo de esta tesis se enfoca en el empleo de un agrupamiento de antenas en el plano con el fin de obtener anchos de haz más estrechos a bordo de satélites de órbita baja, lo que consiste en dirigir el diagrama de radiación de dicho agrupamiento en un punto fijo sobre la Tierra (en este caso una estación terrena). Lo anterior se puede visualizar de una mejor manera en la Figura 8, donde se muestra como el satélite va reconfigurando su diagrama de radiación dentro de su área de cobertura conforme recorre todo su período de visibilidad.



*Figura 8. Direccionamiento del haz principal de un agrupamiento de antenas a bordo de LEOS.*

---

---

### III.3.1 Beneficios de las Antenas Inteligentes.

Entre los beneficios que implica el uso de los sistemas de antenas inteligentes, se pueden mencionar los siguientes [Langley, 2004]:

- Pueden formar diagramas de radiación para cancelar interferentes y mejorar las señales deseadas. Los sistemas de antenas tradicionales no pueden aislar las señales de la fuente de los ambientes de interferencia, los cuales incluyen a otros usuarios y presentan señales multitrayectoria. En nuestro trabajo, dado que el agrupamiento de antenas estará a bordo del satélite, no se considerarán las señales multitrayectorias.
  - Se incrementa la capacidad del sistema, ya que se localizan las señales en movimiento más eficientemente que los sistemas mecánicos.
  - Emplean de manera más eficiente el uso de la energía espectral, permitiendo a varios usuarios compartir la misma frecuencia del canal.
  - Son capaces de manejar escenarios múltiples instantáneamente a partir de una reconfiguración electrónica.
  - Tienen la capacidad de enfocar la energía hacia los usuarios de interés en lugar de dirigirla hacia direcciones innecesarias, como lo hacen las antenas omnidireccionales.
  - Incrementan la confiabilidad del sistema debido al movimiento mínimo o nulo de las partes que conforman la antena al momento de dirigir el haz principal.
- 
-

### III.3.2 Diferencias entre antenas inteligentes y los sistemas tradicionales.

Las antenas parabólicas tradicionales son empleadas para localizar mecánicamente al satélite, teniendo las siguientes características principales:

- Diagrama de radiación constante.
- Direccionamiento del diagrama de radiación realizado mecánicamente

En cambio las antenas inteligentes dirigen su diagrama de radiación electrónicamente con el objetivo de cumplir las siguientes funciones:

- Variar su diagrama de radiación muchas veces por segundo para su propia optimización, mejorando la señal deseada y minimizando la interferencia.
- Capacidad de manejar múltiples variables (una por elemento de antena), para dirigir mejor el diagrama de radiación y localizar al usuario de interés.

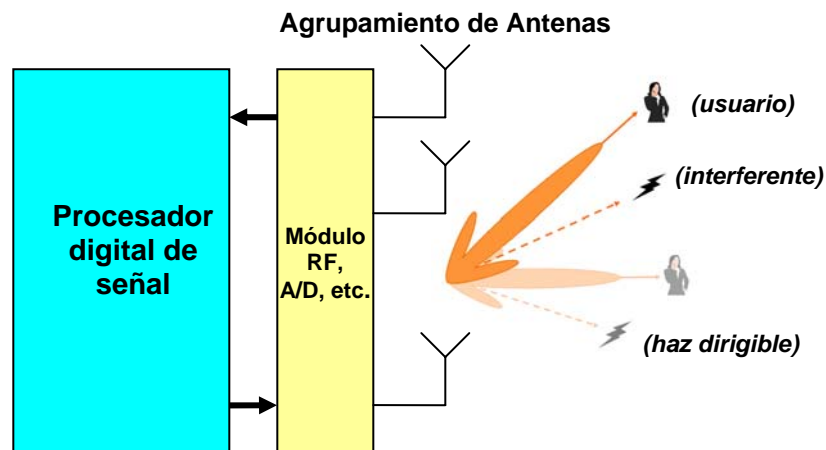


Figura 9. Haz dirigido de un agrupamiento de antenas.

### **III.4 Parámetros de antenas.**

Las antenas pueden transmitir y recibir ondas de radio, según sea la situación en particular. En el modo de recepción, las antenas concentran las señales recibidas y las dirigen a un punto donde se encuentra una línea de transmisión adjunta. En todos los casos las antenas tienen características de directividad, donde una densidad de potencia electromagnética es radiada desde una antena transmisora que varía de acuerdo a un ángulo alrededor de la antena [Muñoz, 2002]. Para describir las prestaciones de una antena, es necesaria la definición de algunos de sus parámetros, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

#### **III.4.1 Diagrama de radiación.**

Es un diagrama polar o gráfica que representa las intensidades de los campos o la potencia de radiación en varias posiciones angulares en relación con la antena [Covarrubias, 2006]. En la mayoría de los casos, el diagrama de radiación se determina en la región de campo lejano, donde las propiedades de radiación incluyen la densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, fuerza del campo, directividad, fase o polarización. Sin embargo, la propiedad de radiación más importante es la distribución de energía radiada en dos o tres dimensiones, como una función de la posición del observador a través de una trayectoria o superficie de radio constante [Balanis, 2005]. De acuerdo a su estructura lobular, una antena puede clasificarse de la siguiente manera:

---

---

- **Antena Isotrópica.** Un radiador isotrópico se define como una antena sin pérdidas con la capacidad de radiar con la misma intensidad de potencia en todas las direcciones.
- **Antena Direccional.** Un radiador direccional es aquel que permite que la mayor parte de la energía sea radiada en una dirección en particular. Puede darse el caso en que se desee emitir en varias direcciones, pero siempre se tratará de un número de direcciones determinado donde se encontrarán el lóbulo principal y los secundarios.
- **Antena Omnidireccional.** Un radiador omnidireccional es aquél con un diagrama de radiación no direccional en cierto plano y uno direccional en cualquier plano ortogonal.

#### **III.4.1.1 Parámetros de la estructura lobular del diagrama de radiación.**

Cuando el diagrama de radiación se representa gráficamente, surgen parámetros de su estructura lobular que es importante definir, ya que éstos determinan el comportamiento del diagrama de radiación.

- **Lóbulo principal.** El lóbulo principal de una antena es el lóbulo en la dirección donde se encuentra la máxima potencia de radiación, recibiendo la mayor parte de la energía. Es importante mencionar que puede existir más de un lóbulo principal.
  - **Lóbulos laterales.** También son llamados lóbulos secundarios o menores, y se encuentran en cualquier otra dirección distinta a la del lóbulo principal. Normalmente, los lóbulos laterales representan una recepción indeseada.
- 
-

- **Ancho de haz.** El ancho de haz de una antena es la separación angular de lóbulo principal en su diagrama de radiación en campo lejano. El ancho de haz de media potencia (HPBW half-power beamwidth), representa la separación angular entre los puntos de potencia media del lóbulo principal. El punto de potencia media se encuentra 3 dB por debajo del punto máximo del lóbulo principal, como se muestra en la Figura 10.
- **Factor de agrupamiento.** Corresponde al diagrama de radiación de una agrupación de elementos isotrópicos. Cuando los diagramas de radiación de cada elemento del agrupamiento son iguales y los elementos están orientados en la misma dirección, el diagrama de radiación de la agrupación de antenas se puede obtener como el producto del factor de agrupamiento por el diagrama de radiación de cada elemento.
- **Nivel de lóbulos laterales (SLL-side lobe level).** Es una medida del nivel de aislamiento del lóbulo principal con respecto a los lóbulos secundarios o laterales.

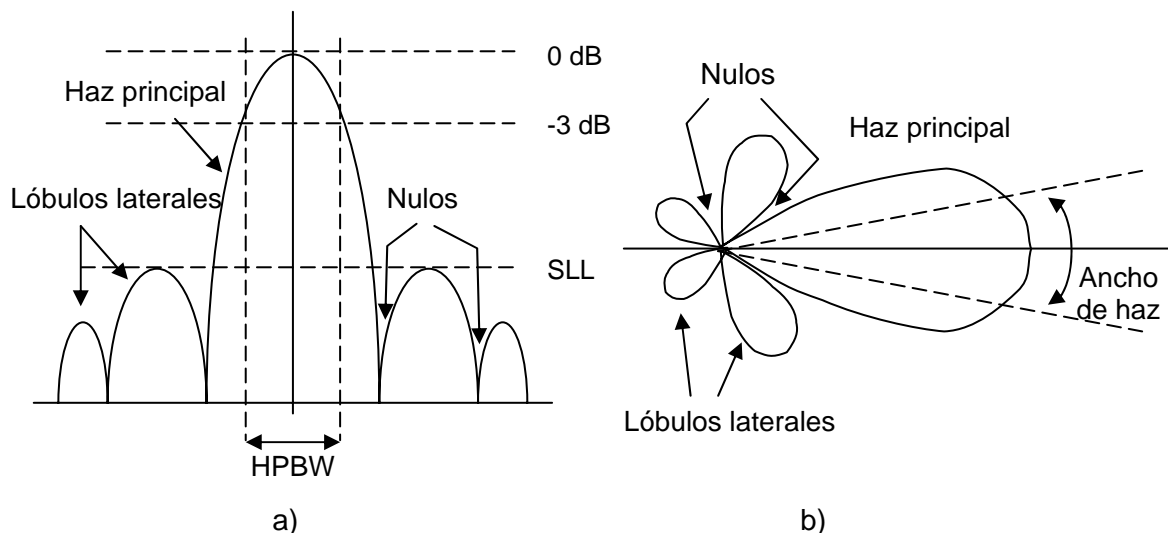


Figura 10. Parámetros de la estructura lobular del diagrama de radiación: a) plano lineal, b) gráfica polar [Conte, 2006].

### III.4.2 Directividad y ganancia de antena.

La directividad ( $D$ ) de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección a una distancia determinada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena [Cardama, 2002]. La ecuación (24) muestra como se calcula:

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_{rad} / (4\pi r^2)} \quad (24)$$

Para fines particulares, es de interés el cálculo de la directividad en la dirección de máxima radiación, ya que es donde se establecen los enlaces de las comunicaciones inalámbricas o se trata de orientar la máxima radiación hacia el usuario de interés, en nuestro caso la estación terrena. Por lo tanto, si no se especifica la dirección angular, se entiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima de radiación, como se muestra en la ecuación (25).

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho_{\max}(\theta, \phi)}{P_{rad} / (4\pi r^2)} \quad (25)$$

Un segundo parámetro directamente relacionado con la directividad es la *ganancia* de la antena. Su definición es semejante, pero la comparación no se establece con la potencia radiada, sino con la entregada a la antena. Por lo tanto, la ganancia es una medida de la habilidad de la antena para dirigir la potencia de entrada en potencia radiada hacia una dirección en particular y se mide en la máxima intensidad de radiación, lo que permite

---



tener en cuenta las posibles pérdidas en la antena, ya que entonces no toda la potencia entregada es radiada al espacio. Lo anterior se presenta en la ecuación (26).

$$G(\theta, \phi) = \frac{P_{\max}(\theta, \phi)}{P_{in}/(4\pi r^2)} \quad (26)$$

La ganancia de una antena es menor que la directividad debido a las pérdidas óhmicas en la antena, y como el total de la potencia radiada ( $P_{rad}$ ) está relacionada con la potencia total de entrada ( $P_{in}$ ) entonces  $P_{rad} = kP_{in}$ . La razón entre la ganancia y la directividad se le llama *factor de eficiencia de la antena*, por lo que es expresada mediante la ecuación (27):

$$G(\theta, \phi) = kD(\theta, \phi) \quad (27)$$

donde  $k$  es el *factor de eficiencia* y cuyo valor se encuentra entre 0 y 1 ( $0 \leq k \leq 1$ ). Si la antena no posee pérdidas, cosa habitual a altas frecuencias (aunque en la realidad si se tienen algunas), ambos parámetros son equivalentes [Cardama, 2002].

### III.5 Agrupamientos de Antenas.

Un agrupamiento de antenas es la interfaz directa entre el entorno espacial de las señales electromagnéticas y el procesamiento de las mismas. Cada agrupamiento de antenas esta formado por un número finito de elementos de acuerdo a una forma geométrica, espaciados entre sí a una determinada distancia, medida en base a la longitud de onda de la señal electromagnética de interés [Zamora, 2002].

---

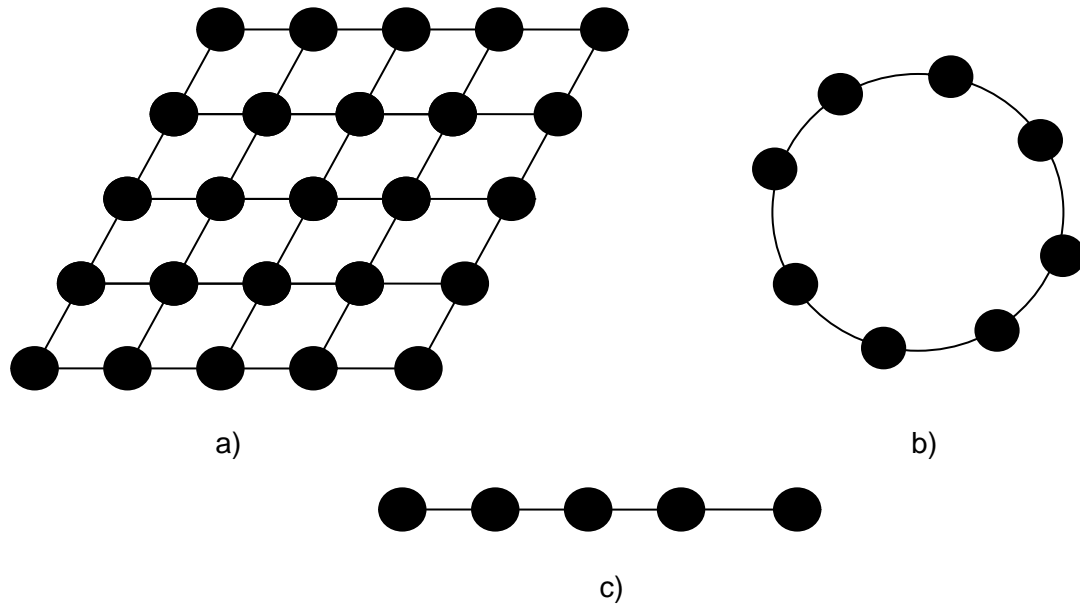
Se considera de forma generalizada que cada uno de los elementos individuales que forman el agrupamiento de antenas radian de forma isotrópica, aunque es posible incluir el efecto radiante particular de cada elemento. El campo total del agrupamiento está determinado por la suma vectorial de los campos radiados de cada uno de los elementos individuales. Por lo tanto, para generar diagramas de radiación más directivos es necesario que los campos radiados por el agrupamiento de antenas interfieran constructivamente en la dirección deseada y se interfieran destructivamente en el resto del entorno. De acuerdo con [Balanis, 2005], en un agrupamiento formado por elementos idénticos, se tienen parámetros fundamentales que pueden ser utilizados para cambiar la forma del diagrama de radiación del agrupamiento de antenas:

- La geometría del agrupamiento empleada, la cual puede ser de forma lineal, circular, planar, esférica, etc.
- El espaciamiento entre cada uno de los elementos que forman el agrupamiento de antenas.
- El diagrama de radiación relativo generado por cada uno de los elementos individuales del agrupamiento.
- La amplitud y fase de excitación de cada uno de los elementos de antena.

Con respecto al diseño del agrupamiento para la generación de los diagramas de radiación, se tiene un gran número de geometrías. En la Figura 11, solo se presentan para fines prácticos las geometrías de agrupamientos de antenas más comunes.

---

---



*Figura 11. Tipos de geometrías de agrupamientos de antenas: a) geometría planar, b) geometría circular, c) geometría lineal.*

Los agrupamientos adaptativos de antenas difieren de los agrupamientos convencionales en el sentido de que un agrupamiento adaptativo es realmente un agrupamiento de antenas en fase, el cual es capaz de ajustar la fase de los elementos automáticamente, controlando su propio diagrama de radiación. Estas antenas son utilizadas ampliamente en radar y en los sistemas de comunicación que están sujetos a interferencia y bloqueo de la señal. Ajustan su diagrama de radiación automáticamente a la señal del medio para reducir el nivel de interferencia, logrando la optimización de la relación señal-interferente más el ruido (SINR, Signal to Interference-plus-Noise Ratio) en la salida del agrupamiento. De esta manera, la capacidad que tienen estos agrupamientos de antena para modificar su diagrama de radiación, puede aprovecharse para dirigir el ancho de haz de manera adaptable hacia una ET durante el tiempo de visibilidad del satélite.

---

Existen varias ventajas en el uso de agrupamientos adaptativos de antenas en comparación con los agrupamientos convencionales. Una de ellas es que tienen la capacidad de detectar la presencia de fuentes de ruido de interferencia, así como también de suprimir la interferencia mientras simultáneamente se mejora la señal deseada sin previo conocimiento de la señal/interferente del medio. La operación de un agrupamiento adaptativo puede ser fácilmente visualizada considerando la respuesta de su diagrama de radiación, donde la cancelación de la señal interferente se obtiene por el direccionamiento apropiado de los nulos y reduciendo el nivel de lóbulos laterales en la dirección de las fuentes interferentes, mientras que la señal deseada se obtiene por el direccionamiento del haz principal [Jin, 1997].

### III.5.1 Agrupamiento lineal de antenas.

Un agrupamiento lineal de antenas es la configuración más simple, cuyos elementos de antenas están sobre una línea recta espaciados a una distancia  $d$  entre si, como se muestra en la Figura 12. El campo total radiado por el agrupamiento corresponde a la suma de los campos individuales radiados por cada elemento, por lo que, haciendo referencia a dicha Figura, el campo radiado por la agrupación será [Cardama, 2002]:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jn\psi} \quad (28)$$

donde  $\vec{E}_0(\vec{r})$  es el campo radiado por la antena básica con alimentación unitaria,  $I_n$  representa los fasores de alimentación y  $\psi$  es el ángulo eléctrico, el cual representa la

---

diferencia de fase entre las contribuciones en campo lejano de dos antenas consecutivas. Esta diferencia de fase es igual a la suma de la diferencia de caminos,  $kd \operatorname{sen} \theta$  en función del ángulo de incidencia ( $\theta$ ) del frente de onda de la señal, más la fase progresiva de la alimentación ( $\alpha$ ). Dicho ángulo puede ser representado mediante la siguiente expresión:

$$\psi = kd \operatorname{sen} \theta + \alpha \quad (29)$$

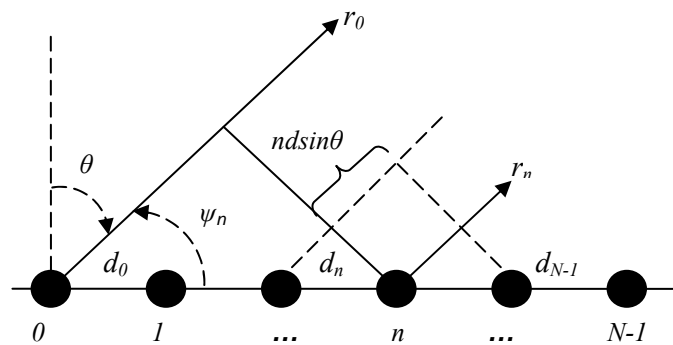


Figura 12. Estructura de un agrupamiento lineal de antenas.

Por otro lado, los fasores de alimentación  $I_n$  normalmente presentan una fase progresiva  $\alpha$  entre cada par de antenas consecutivas, de tal forma que suele escribirse como:

$$I_n = a_n e^{jn\alpha} \quad (30)$$

Los coeficientes  $a_n$  representan una excitación en amplitud del  $n$ -ésimo elemento, que son en general números complejos, y que toman valores reales en el caso más habitual en que la fase de alimentación sea progresiva. De la misma manera, en la Figura 12 se representa la diferencia de caminos en campo lejano para cada una de las antenas. Puede

---

observarse que, en la hipótesis de rayos paralelos, esta diferencia de caminos entre la antena situada en el origen y la  $n$ -ésima es [Cardama, 2002]:

$$r_n - r_0 = r_o^2 + d_n^2 - 2r_0 d_n \cos \psi_n \quad (31)$$

$$\cos \psi_n = \text{sen} \theta \quad (32)$$

Por lo tanto tomando en cuenta un punto de observación alejado  $(r_n - r_0) \gg d_n$  y considerando la ecuación (32), se tiene que:

$$r_n - r_0 = -nd_n \text{sen} \theta \quad (33)$$

Combinando las ecuaciones (30), (33) y (29) en (28), se tiene que el campo eléctrico del agrupamiento será:

$$\bar{E}(\vec{r}) = \bar{E}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(kd_n \text{sen} \theta + \alpha)} \quad (34)$$

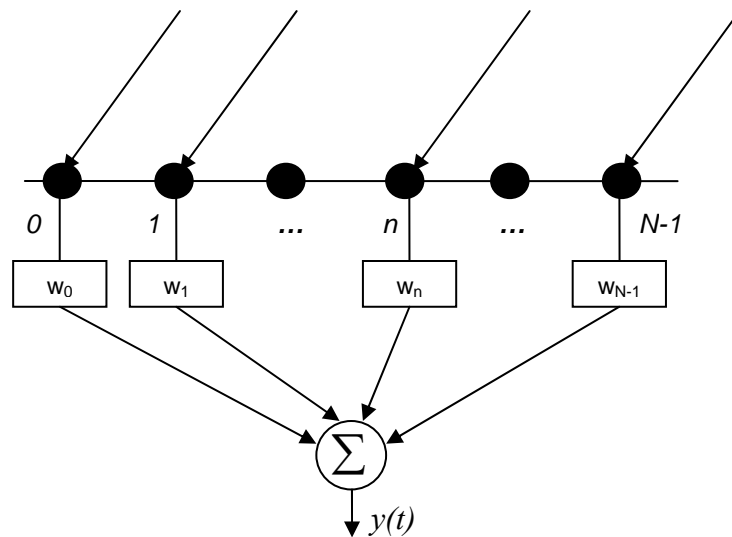
La ecuación (34) puede observarse que el diagrama de campo radiado por la agrupación es igual al producto de la antena básica  $\bar{E}_0(\vec{r})$ , multiplicado por un factor que tiene en cuenta la interferencia de las  $N$  ondas generadas por las  $N$  antenas. Este factor de agrupamiento depende únicamente de la separación entre elementos de la agrupación, de la alimentación y de la frecuencia de trabajo, que para un agrupamiento lineal está definido de la siguiente manera:

$$FA_{lineal}(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(kd_n \text{sen} \theta)} \quad (35)$$


---

### III.5.1.1 Manipulación del diagrama de radiación de un agrupamiento lineal.

Hay ocasiones en que no basta radiar el lóbulo principal en la dirección de máxima radiación (cuando  $\theta = 0$ , modo transversal) dentro del contexto de los sistemas de antenas inteligentes, por lo que se requiere dirigirlo en la dirección donde se encuentra el usuario de interés. De ahí la importancia de este trabajo de tesis en el estudio de la manipulación del diagrama de radiación, ya que a partir de la aparición del satélite sobre el horizonte, éste reconfigurará su diagrama de radiación sobre una estación terrena fija durante su periodo de visibilidad. La forma de controlar la orientación del diagrama de radiación será mediante la inserción de un desfaseamiento adicional [Velázquez, 2002]. Este desfaseamiento se inserta en el agrupamiento de antenas en forma de pesos complejos tal como se muestra en la Figura 13.



*Figura 13 Control de la orientación del diagrama de radiación de un agrupamiento lineal, mediante la asignación de pesos.*

El peso complejo asignado al  $n$ -ésimo elemento del agrupamiento de antenas está definido como [Velázquez, 2002]:

$$w_n = a_n e^{jn\alpha} \quad (36)$$

La excitación de fase progresiva está dada por:

$$\alpha = -\frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \text{sen}\theta_0 \quad (37)$$

La fase progresiva es de gran importancia para la obtención del diagrama de radiación, ya que por medio del control de fase aplicada a los elementos de antena, permite orientar el haz principal hacia la dirección deseada. Por lo tanto, la expresión que define el factor de agrupamiento, considerando el control de orientación del diagrama de radiación, se determina por la ecuación (38).

$$FA = \sum_{n=0}^{N-1} w_n e^{jn\psi} \quad (38)$$

De esta forma y combinando las ecuaciones (29), (36) y (37) en (38), se tiene finalmente el factor de agrupamiento para dirigir el haz principal de manera dinámica:

$$FA_{lineal}(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jnk d_n (\text{sen}\theta - \text{sen}\theta_0)} \quad (39)$$

donde  $\theta_0$  representa la dirección angular hacia la cual se orientará el lóbulo principal del diagrama de radiación.

---



### III.5.1.2 Ancho de haz en función del direccionamiento del diagrama de radiación de un agrupamiento lineal.

El ancho de haz representa una forma de medir la directividad de un agrupamiento de antenas, por lo que se encuentran directamente relacionados. Entre más estrecho sea el ancho de haz, mayor será la directividad y por ende la ganancia misma. Por lo tanto, el grado de directividad depende del ancho de haz que presenta el direccionamiento del lóbulo principal en el diagrama de radiación del agrupamiento de antenas. Debido a la simetría del agrupamiento de antenas, la separación angular entre los puntos de media potencia es igual al doble de la separación angular del punto máximo del lóbulo principal a uno de los puntos de media potencia. Para determinar la ubicación angular del punto máximo del lóbulo principal, se obtiene la expresión para determinar el ancho de haz de media potencia [Velázquez, 2002]:

$$\Theta_h = 2|\theta_m - \theta_h| \quad (40)$$

en donde  $\theta_m$  representa la dirección del lóbulo principal, el cual es la respuesta máxima del diagrama de radiación direccional. En cambio  $\theta_h$  indica la ubicación angular de un punto de media potencia del lóbulo principal, ambas definiciones se representan por las siguientes expresiones:

$$\theta_h = \text{sen}^{-1} \left[ \frac{\lambda}{2\pi d} \left( -\alpha \pm \frac{2.782}{N} \right) \right] \quad (41)$$

$$\theta_m = \text{sen}^{-1} \left[ \frac{\lambda \alpha}{2\pi d} \right] \quad (42)$$


---

### III.5.2 Agrupamiento planar de antenas.

Dado que los agrupamientos lineales tienen varias limitantes, uno de ellos, dirigir el lóbulo principal en el plano que contiene los centros de los elementos de antena [Stutzman, 1998], para lo cual es necesario la utilización de nuevas geometrías que permitan mejorar las prestaciones del sistema. Tal es el caso de los agrupamientos planares de antenas. Un agrupamiento planar contiene variables adicionales las cuales pueden ser empleadas para controlar y cambiar la forma del diagrama de radiación, por lo que son más versátiles ya que son empleados en aplicaciones que requieren haces más estrechos y alta ganancia, así como la capacidad de dirigir el haz principal en cualquier dirección [Balanis, 2005].

El presente trabajo de tesis requiere la incorporación de un agrupamiento en el plano, ya que además de tener haces más directivos, se tiene la capacidad de desplazar el haz principal tanto en azimut como elevación. Esto es una ventaja, pues a diferencia de un agrupamiento lineal, un agrupamiento planar maneja dos variables para el direccionamiento del lóbulo principal. De esta manera, utilizando un agrupamiento planar como el mostrado en la Figura 14, este puede considerarse como un agrupamiento de agrupamientos lineales, donde el factor de agrupamiento en el plano será la suma de los campos radiados por los agrupamientos lineales.

En base a lo anterior, y considerando un agrupamiento planar de  $N \times M$  elementos de antenas, es conveniente expresar la excitación de cada elemento como:

$$I_{nm} = a_n a_m e^{jn\alpha_n + jm\alpha_m} \quad (43)$$


---

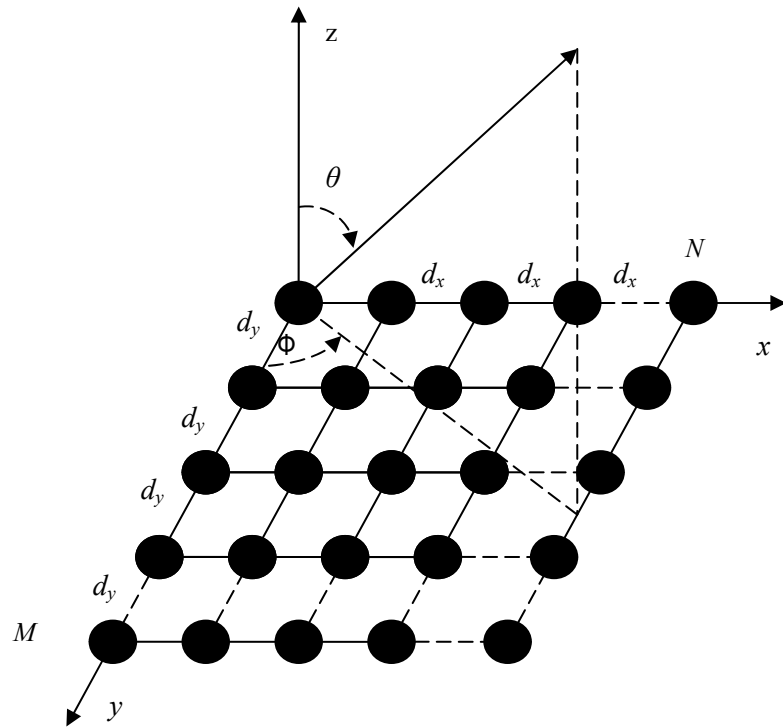


Figura 14. Agrupamiento planar de antenas de  $N \times M$  elementos.

donde  $\alpha_n$  es la fase de excitación progresiva en los elementos de antena a lo largo del eje  $x$ .

En cambio,  $\alpha_m$  es la fase de excitación progresiva de los elementos de antena en el eje  $y$ ,

cuyas expresiones están representadas por las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_n = -kd_n \text{sen} \theta_0 \cos \phi_0 \quad (44)$$

$$\alpha_m = -kd_m \text{sen} \theta_0 \text{sen} \phi_0 \quad (45)$$

donde  $\theta_0, \phi_0$  representan los ángulos de direccionamiento del haz principal en elevación y azimut respectivamente.

Así de esta forma y de acuerdo con Balanis [2005], el factor de agrupamiento de un agrupamiento planar como el mostrado en la Figura 14, estará determinado por la siguiente expresión:

$$FA_{Plano}(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \left[ \sum_{m=0}^{M-1} I_m e^{jm(kd_n \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\phi + \alpha_m)} \right] \cdot e^{jn(kd_n \text{sen}\theta \cdot \cos\phi + \alpha_n)} \quad (46)$$

Para simplificar la expresión anterior, ésta se puede desglosar en dos agrupamientos lineales, quedando como se muestra a continuación:

$$S_n = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jn(kd_n \text{sen}\theta \cos\phi + \alpha_n)} \quad (47)$$

$$S_m = \sum_{m=0}^{M-1} I_m e^{jm(kd_m \text{sen}\theta \text{sen}\phi + \alpha_m)} \quad (48)$$

De acuerdo al principio de multiplicación de los diagramas de radiación [Litva, 1996], el cual establece que *el diagrama de radiación de un agrupamiento de antenas*  $G(\theta, \phi)$  *es el producto del diagrama del elemento*  $f(\theta, \phi)$  *y el factor de agrupamiento*  $F(\theta, \phi)$ :

$$G(\theta, \phi) = f(\theta, \phi)F(\theta, \phi) \quad (49)$$

Por lo tanto, y en base a este principio de multiplicación, es posible expresar el factor de agrupamiento como el producto de dos factores de agrupamientos lineales en el eje  $x$  y eje  $y$ .

---

$$FA_{plano} = S_n S_m \quad (50)$$

Este principio muestra como los teoremas relacionados con el diseño de agrupamientos son independientes de un elemento de antena en particular usado para formar el agrupamiento, por lo que pueden ser empleados para determinar el factor de agrupamiento de un agrupamiento más complejo, que se forma a partir de sub-agrupamientos de antenas.

De lo anterior, se puede apreciar que el factor de agrupamiento de un agrupamiento lineal mostrado en (35) toma valores para un conjunto de ángulos de elevación  $\theta$ . En cambio el factor de agrupamiento planar tiene dos grados de libertad para desplazar el haz principal: elevación  $\theta$  y azimut  $\varphi$ .

### III.5.2.1 Directividad de un agrupamiento planar de antenas.

A diferencia de los agrupamientos lineales, los cuales son independientes del ángulo de direccionamiento del haz principal, la directividad de un agrupamiento planar de antenas es dependiente de este ángulo de inclinación  $\theta$  [Kochali, 2005]. Existen varias ecuaciones para aproximar la directividad de acuerdo al direccionamiento del haz, tal como se muestran en (51) y (52).

$$D(\theta) = D_0 \cdot \cos \theta \quad (51)$$

$$D(\theta) = D_x D_y \cdot \pi \cos \theta \quad (52)$$

donde:

$D_0$  es la directividad sin direccionamiento del haz

$\theta$  es el ángulo de inclinación del haz

$D_x, D_y$  son las directividades en los ejes  $x, y$  respectivamente.

En algunas ocasiones la directividad está relacionada con el ángulo sólido, y de acuerdo con [Balanis, 2005] se expresa mediante la siguiente aproximación:

$$D \approx \frac{32,400}{\Omega_A (\text{Grados}^2)} \quad (53)$$

En un agrupamiento planar de antenas, este ángulo sólido del haz principal ( $\Omega_A$ ) está en función de los anchos de haces de media potencia, tanto del plano  $x$ - $y$  ( $\Psi_h$ ) como del plano  $y$ - $z$  ( $\Theta_h$ ), haciendo como referencia la Figura 14.

$$\Omega_A = \Theta_h \Psi_h \quad (54)$$

### **III.6 Conclusiones.**

En este capítulo se analizaron las ventajas de utilizar la tecnología de antenas inteligentes en comparación con las antenas sectoriales. Para ello se definieron los parámetros de antenas más importantes que permiten evaluar las prestaciones que ofrece dicha antena, estableciendo las necesidades por las cuales se plantea el uso de agrupamientos de antenas en los sistemas de satélites de órbita baja.

Por otra parte, se definió el uso de pesos complejos para la excitación de fase en los elementos del agrupamiento de antenas, con lo cual es posible dirigir el diagrama de radiación desde el satélite hacia el usuario de interés durante el período de visibilidad.

Asimismo, se obtuvo la expresión que representa el factor de agrupamiento planar, que por medio del principio de multiplicación de los diagramas de radiación, fue posible representarlo como el producto de dos factores de agrupamientos lineales.

En el siguiente capítulo se establecen los escenarios de simulación, que con la ayuda de la tecnología de antenas inteligentes en el diseño de constelaciones de satélites LEO, permitirán la reconfiguración del diagrama de radiación del agrupamiento de antenas dentro de la apertura del satélite, cumpliendo con los requerimientos de calidad de servicio en función de la probabilidad de error.

---

---

# CAPÍTULO IV

## ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### IV.1 Introducción.

En este capítulo se definen los distintos escenarios de simulación en una red satelital para las diferentes condiciones involucradas en esta tesis, como son la altura orbital de la constelación de satélites LEO, ángulo mínimo de elevación de la estación terrena, esquema de modulación, calidad del enlace, ganancia y desplazamiento máximo del agrupamiento de antenas utilizado.

Por otro lado, se tiene como finalidad evaluar los resultados de las simulaciones de acuerdo a los modelos presentados en los capítulos II y III, para lo cual, se realiza un análisis de la calidad de servicio de las estadísticas obtenidas. Por lo tanto, el objetivo central consistirá en evaluar las prestaciones del sistema, considerando el desplazamiento

---

---



del haz principal del agrupamiento de antenas dentro del área de cobertura y durante el período de visibilidad del satélite, en función de la tasa de bit erróneo.

Asimismo, dado que uno de los problemas en los satélites LEO es la limitación en potencia debido al continuo bloqueo entre la Tierra y el sol, se presenta una evaluación de los parámetros obtenidos en los escenarios de simulación, pero ahora empleando técnicas analíticas de agrupamientos de antenas, aplicando polinomios de Tchebyscheff como herramienta de optimización en el diagrama de radiación para la obtención de anchos de haz más estrechos. De esta manera, se tiene la capacidad de obtener una mejora en el consumo potencia en el agrupamiento de antenas a bordo del satélite debido a dicha reducción del haz principal con respecto a la respuesta natural del sistema.

## **IV.2 Desarrollo del proceso de simulación.**

En la Figura 15 se muestra la metodología del proceso de simulación para la generación de estadísticas. Se observa que la primera etapa consiste en determinar el escenario de simulación, definiendo la altura orbital de la constelación de satélites LEO con la que se trabajará, y estableciendo el entorno en el cual se empleará la tecnología de antenas inteligentes. Posteriormente, el siguiente punto consiste en realizar la evaluación de los parámetros producto del diseño de la constelación de LEOS. Una vez definido el escenario de simulación se procede con el cálculo del presupuesto de enlace, por lo que éste parámetro junto con la tasa de bit erróneo que establece la calidad de servicio, definirán la ganancia de antena requerida para el enlace entre el satélite y la estación terrena (enlace descendente), realizando un análisis del consumo de potencia del transmisor.

---

---

Después de haber conocido los valores de la ganancia de antena dentro del presupuesto de enlace, lo que sigue es incorporar la tecnología de antenas inteligentes en los sistemas de comunicación por satélite. En esta etapa de simulación se determinará el número de elementos de antena del agrupamiento planar a utilizar, permitiendo desplazar el lóbulo principal de manera dinámica dentro del área de cobertura del satélite. Por último, después de observar que los parámetros evaluados cumplan con la calidad de servicio, se originará la obtención de estadísticas, cuantificando el desplazamiento máximo del lóbulo principal del agrupamiento de antenas y el ángulo mínimo de elevación de la ET para mantener cierta calidad de servicio.

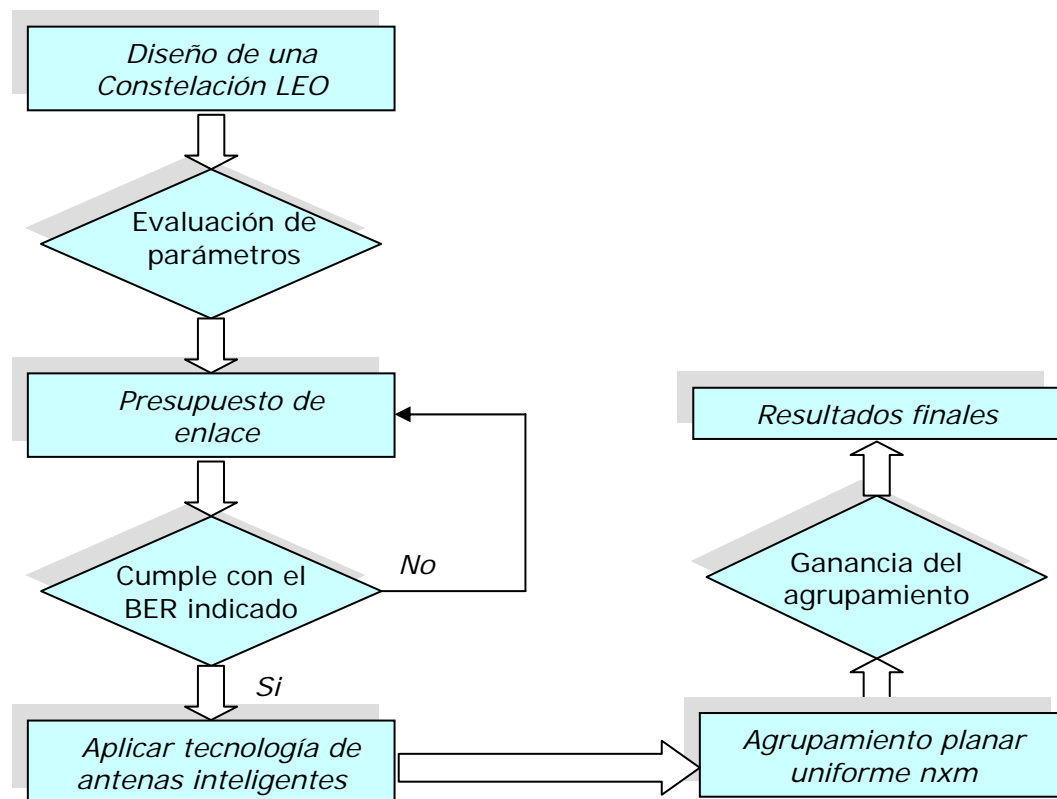


Figura 15. Proceso de simulación empleado para la generación de anchos de haz dinámicos, a partir de la calidad de servicio y del diseño de constelaciones LEOS.

### IV.3 Consideraciones de simulación.

Para la simulación de anchos de haz dinámicos a bordo de satélites LEO, se requiere establecer las consideraciones necesarias que permitan proponer los distintos escenarios e iniciar el proceso de simulación. Entre las consideraciones tomadas para el desarrollo de las simulaciones, se pueden mencionar las siguientes:

- Dependiendo de las características de los parámetros orbitales, la geometría Tierra-satélite y el tipo de constelación, se pueden realizar diferentes diseños de redes de satélites LEO. En base esto, el desarrollo de esta tesis se basa en el diseño de constelaciones con alturas orbitales de 780 km, 1400 km, y 1700 km, con el fin de comparar resultados al momento de incorporar un agrupamiento de antenas para el direccionamiento del haz principal.
  - La banda de frecuencia Ku fue la utilizada en el enlace ascendente (14.5 GHz) y descendente (12.2 GHz), de acuerdo a las frecuencias asignadas por la ITU.
  - El tipo de técnica para el traspaso del enlace se considera síncrono, debido a que se hace uso de agrupamientos de antenas capaces de dirigir electrónicamente el haz principal a bordo del satélite [Zamora, 2005].
  - Por otra parte se consideró un esquema de modulación QPSK empleado por algunos sistemas satelitales de órbita baja (Iridium, Globalstar). Este tipo de modulación incluye el uso de un código de predicción de errores con tasa  $\frac{1}{2}$ .
- 
-

- Se utilizó una velocidad de transmisión de 128 kbps en las simulaciones realizadas, lo que permite tipos de servicios que pueden ser transmitidos como voz, datos, fax, mensajería, localización de posición.
- En cuanto al presupuesto del enlace descendente, este fue evaluado de acuerdo a la calidad de servicio en función de la tasa de bit erróneo. Para esto, se consideró una probabilidad de error de  $10^{-3}$  en el peor de los casos, cuando el satélite se encuentra más alejado de la ET. En cambio, cuando la distancia entre el satélite y la ET es mínima, la probabilidad de error considerada fue de  $10^{-6}$  en el mejor de los casos.
- En el análisis de la calidad de servicio, la dirigibilidad del haz principal considerado fue el desplazamiento en elevación, debido a que éste es dependiente de la directividad de un agrupamiento planar de antenas [Kochali, 2005].
- Finalmente, una vez relacionada la probabilidad de error con el presupuesto de enlace, es posible conocer la ganancia y el número de elementos requeridos por el agrupamiento antenas.

La Tabla II presenta los escenarios de simulación a considerar para la obtención de estadísticas. A continuación se describen las características de cada uno de ellos.

**TABLA II. Escenarios de simulación.**

Altura orbital (km)	Frecuencia (GHz)		Velocidad de transmisión (kbps)	Esquema de modulación	FEC	BER
	Ascendente	Descendente				
780	14.5	12.2	128	QPSK	1/2	$10^{-3}$ y $10^{-6}$
1400	14.5	12.2	128	QPSK	1/2	$10^{-3}$ y $10^{-6}$
1700	14.5	12.2	128	QPSK	1/2	$10^{-3}$ y $10^{-6}$

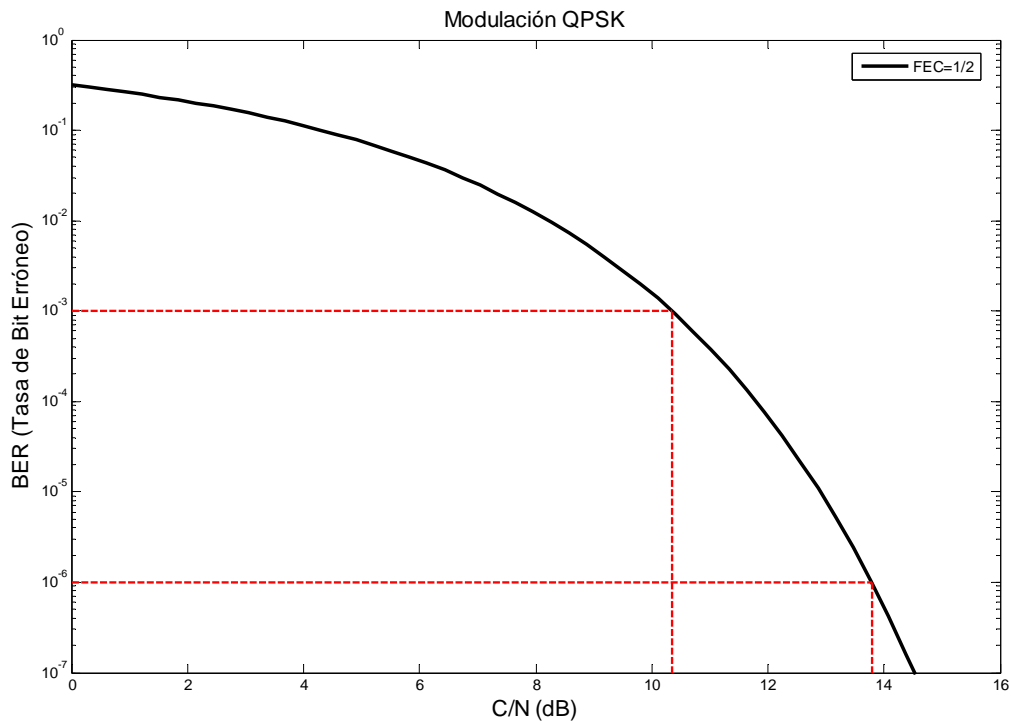


Figura 16. Calidad del enlace total en función de la probabilidad de error para un BER de  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ , considerando una modulación QPSK y FEC con tasa [ITU, 2002].

La Figura 16 presenta la curva compromiso entre el BER y el C/N total del presupuesto de enlace, la cual se genera por medio de las ecuaciones (16) y (18) del capítulo II. El objetivo de esta gráfica es establecer los intervalos de trabajo en que operará el desplazamiento del lóbulo principal del agrupamiento planar de antenas, a fin de mantener la calidad de servicio en un BER de  $10^{-3}$  para el peor de los casos y un BER de  $10^{-6}$  para el mejor de los casos. Además se puede observar que para una probabilidad de error de  $10^{-3}$  el C/N total requerido es de aproximadamente 10.3 dB, en cambio, se necesita un C/N total de 13.7 dB para mantener una probabilidad de error de  $10^{-6}$ .

## IV.4 Escenarios de simulación.

En esta sección del capítulo se plantean diversos escenarios de simulación, permitiendo realizar un análisis de acuerdo a la calidad de servicio, y aplicando la tecnología de antenas inteligentes sobre los sistemas de satélites de órbita baja. Todo esto es realizado siguiendo la metodología en el proceso de simulación presentada en la Figura 16 para los escenarios de simulación presentados en la Tabla II.

### IV.4.1 Tecnología de antenas inteligentes para una red satelital con altura orbital de 780 km.

El propósito de simular esta altura orbital es determinar la viabilidad del empleo de las antenas inteligentes en el sistema Iridium (780 km), en la reconfiguración dinámica del diagrama de radiación del agrupamiento de antenas. Para ello, es necesario calcular los parámetros que definen las características esenciales en el diseño de la constelación, las cuales fueron descritas ampliamente en el capítulo II, en el cual empleando las ecuaciones (1) a (12) se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla III.

**TABLA III. Parámetros de diseño para una constelación de satélites LEO con altura orbital de 780 km y  $\xi_{min}$  de 12.7°.**

Altura orbital [km]	$T_{visibilidad}$ [min]	Numero planos	Sat./plano orbital	Total de satélites	$\xi_{min}$ [°]	Apertura sat. [°]
780	9.448	6	11	66	12.7	120.738

Donde  $\xi_{min}$  representa el ángulo mínimo de elevación de la estación terrena.

Por otro lado los parámetros evaluados del presupuesto de enlace se muestran en la Tabla IV, que permitirán conocer la ganancia y el número de elementos del agrupamiento de antenas necesarios para satisfacer la calidad de servicio, cuyos resultados fueron obtenidos a partir de las ecuaciones (20) a (23).

**TABLA IV. Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y  $R_b$  de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 780 km y  $\xi_{\min}$  de 12.7°.**

$P_{\text{sat}}$ [w]	Número de elementos	Distancia ET-Sat [km]	PIRE <sub>sat</sub> [dBW]	$G_{\text{sat}}$ [dB]	$G_{\text{agrup}}$ [dB]	$C/N_{\text{tot}}$ [dB]	$C/N_{\text{desc}}$ [dB]	BER	$\theta_0$ [°]
0.933	22x22	780	31.425	31.72	31.82	13.789	17.94	$10^{-6}$	0
7	11x11	2136.77	33.997	25.54	25.54	10.345	11.768	$10^{-3}$	$\pm 50.6$

En la Tabla IV se puede apreciar que para una distancia de 780 km (BER  $10^{-6}$ ) el PIRE requerido en el satélite es de aproximadamente 31.42 dBW, mientras que para la distancia más alejada a la estación terrena (BER  $10^{-3}$ ), el PIRE a bordo del satélite debe ser 33.99 dBW. De igual manera,  $P_{\text{sat}}$  representa la potencia aplicada a bordo del satélite en el análisis para el peor y mejor de los casos (7 W y 0.933 W respectivamente). Por otra parte, en el análisis para el peor de los casos se tiene el empleo de un agrupamiento de antenas de 11x11 elementos, sin embargo, la máxima calidad de servicio que se estaría cumpliendo sería a partir de una probabilidad de error de  $10^{-3}$ . Esto significa que la ganancia máxima empezaría a degradarse a partir de 25.54 dB conforme el lóbulo principal se desplaza dentro del área de cobertura del satélite. Por lo tanto, en el análisis para el mejor de los casos, el resultado obtenido fue el empleo de un agrupamiento de 22x22 elementos. De esta manera no solo es posible satisfacer la calidad de servicio para una probabilidad de error de

$10^{-6}$ , sino que también para un BER de  $10^{-3}$ . Esto significa que de acuerdo al presupuesto de enlace (Tabla IV), el agrupamiento de 22x22 elementos requiere una ganancia máxima de 31.72 dB en la dirección de máxima radiación, y una ganancia mínima de 25.54 dB cuando el ancho de haz del agrupamiento se encuentre en su desplazamiento máximo ( $\theta_0 = \pm 50.6$ ) para una probabilidad de error de  $10^{-6}$ . Este ángulo de desplazamiento del lóbulo principal está en función de la ganancia de antena, ya que dicho parámetro determina su desplazamiento máximo dentro del área de cobertura a fin de mantener la calidad de servicio dentro de los requerimientos establecidos. Lo anterior se puede observar en la Figura 17, la cual muestra la variación de la probabilidad de error en función del ancho de haz del agrupamiento para desplazamientos del lóbulo principal de  $\pm 50.6^\circ$ ,  $\pm 54^\circ$ ,  $\pm 57^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  y  $\pm 65^\circ$  para una constelación de 780 km de altura.

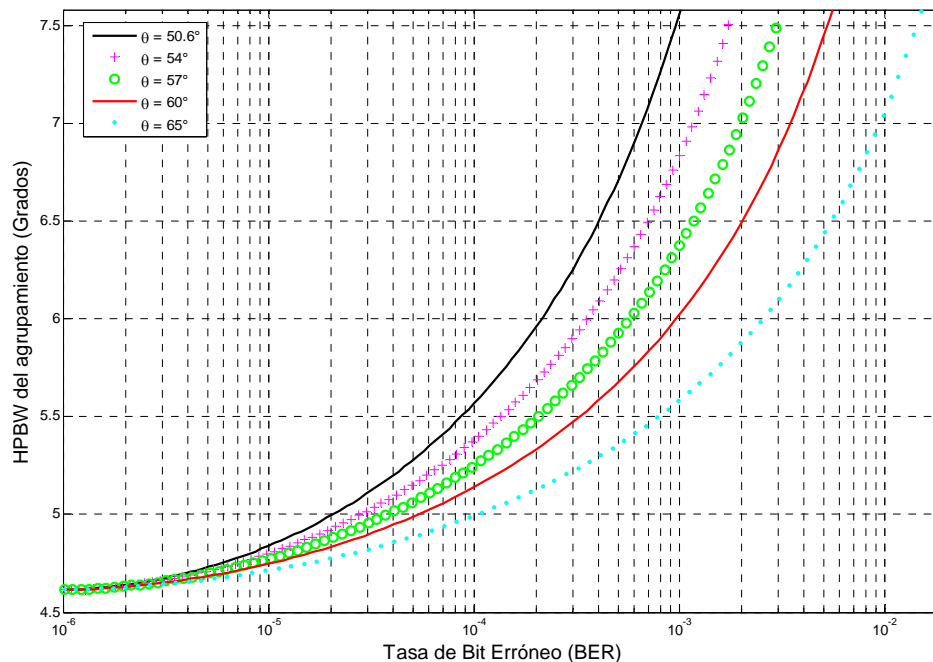


Figura 17. BER y HPBW de un agrupamiento de 22x22 elementos para diferentes desplazamientos del haz principal, en una red satelital LEO con altura orbital de 780 km y  $\zeta_{min}$  de  $12.7^\circ$ .



La Figura 17 muestra que para un desplazamiento del lóbulo principal de  $\pm 50.6^\circ$ , el ancho de haz del agrupamiento de antenas de  $22 \times 22$  elementos varía de  $4.55^\circ$  a  $7.55^\circ$ , garantizando de esta forma los requerimientos en la calidad de servicio para un BER  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ . Sin embargo, este direccionamiento máximo no se desplaza en su totalidad dentro de la apertura del satélite, provocando que queden ángulos de libertad sin utilizarse, por lo que no se garantiza la comunicación total del enlace durante el período de visibilidad. Para asegurar la comunicación total del enlace en este sistema, el desplazamiento del haz tendría que ser muy cercano a  $\pm 60^\circ$ , con lo que el lóbulo principal se desplazaría en su totalidad dentro de la apertura del satélite de  $120.7^\circ$ . Sin embargo, la probabilidad de error aumentaría a  $1.59 \times 10^{-2}$ , lo que no cumpliría la calidad de servicio para el peor de los casos, tal como se muestra en la Figura 18.

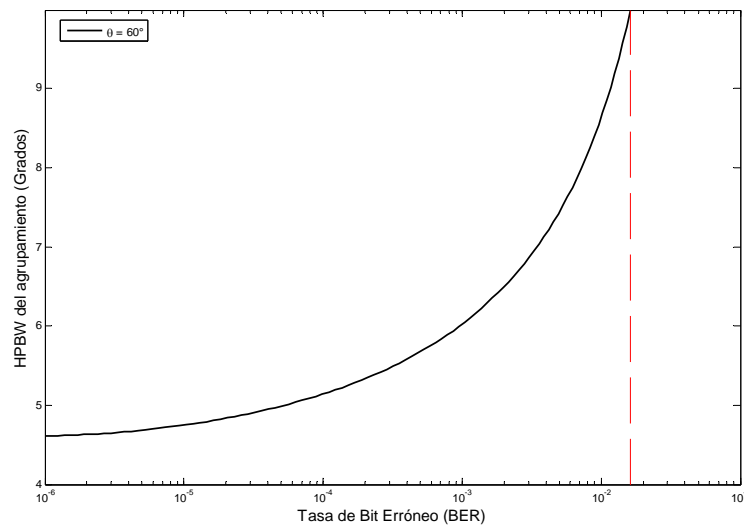


Figura 18. BER y HPBW de agrupamiento de  $22 \times 22$  elementos para un desplazamiento del haz principal de  $\pm 60^\circ$ , en una red satelital LEO con altura orbital de 780 km y  $\zeta_{min}$  de  $12.7^\circ$ .

Debido a que no se cumple la probabilidad de error para el peor de los casos, una manera de lograrlo, es aumentando el ángulo de elevación de la estación terrena ( $\xi_{min}$ ), con el objetivo de reducir el área de cobertura del satélite, con lo que el lóbulo principal no tendrá necesidad de tener desplazamientos cercanos a  $\pm 60^\circ$ , como muestran las Tablas V y VI.

**TABLA V. Parámetros de diseño para una constelación de satélites LEO con altura orbital de 780 km y  $\xi_{min}$  de 30.8°.**

Altura orbital [km]	$T_{visibilidad}$ [min]	Número planos	Sat./plano orbital	Total de satélites	$\xi_{min}$ [°]	Apertura sat. [°]
780	5.1681	10	20	200	30.8	99.878

**TABLA VI. Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y  $R_b$  de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 780 km y  $\xi_{min}$  de 30.8°.**

$P_{sat}$ [w]	Número de elementos	Distancia ET-Sat [km]	$PIRE_{sat}$ [dBW]	$G_{sat}$ [dB]	$G_{agrup}$ [dB]	$C/N_{tot}$ [dB]	$C/N_{desc}$ [dB]	BER	$\theta_0$ [°]
2.37	14x14	780	31.425	27.66	27.9	13.789	17.94	$10^{-6}$	0
7	7x7	1341.09	29.951	21.5	21.86	10.345	11.768	$10^{-3}$	49.86

De esta manera, un incremento en el ángulo de elevación de la ET de  $12.7^\circ$  a  $30.8^\circ$  implica que la ganancia requerida por el agrupamiento de antenas ( $G_{agrup}$ ), así como el número de elementos a bordo del satélite, sean menores en comparación con la Tabla IV. Al incrementarse el ángulo  $\xi_{min}$  trae como consecuencia una reducción de la distancia máxima entre el satélite y la ET, minimizando con ello las pérdidas por espacio libre.

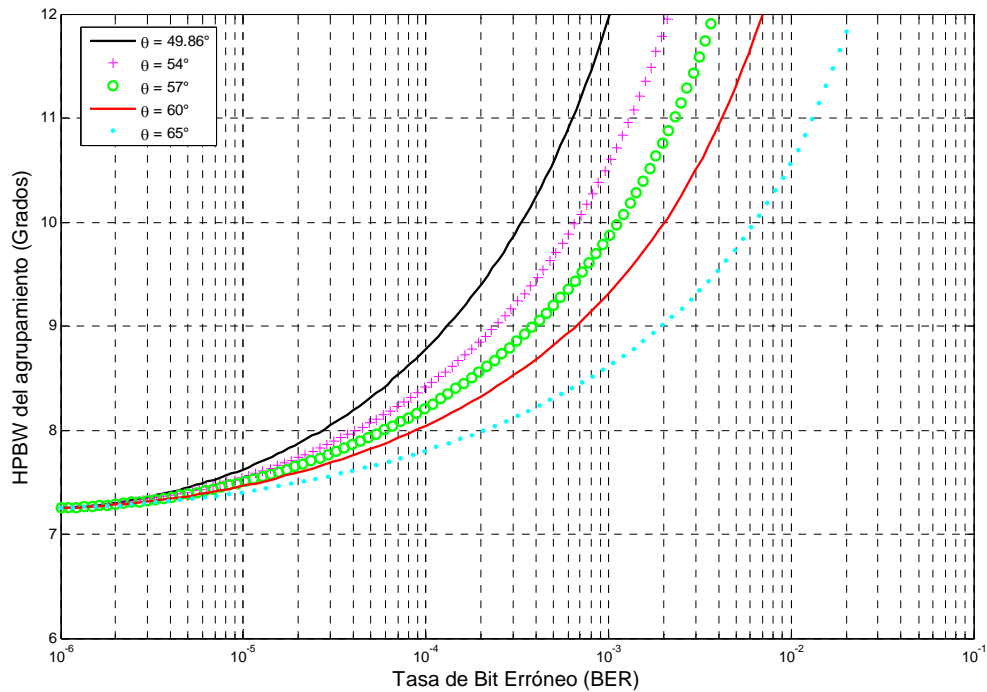
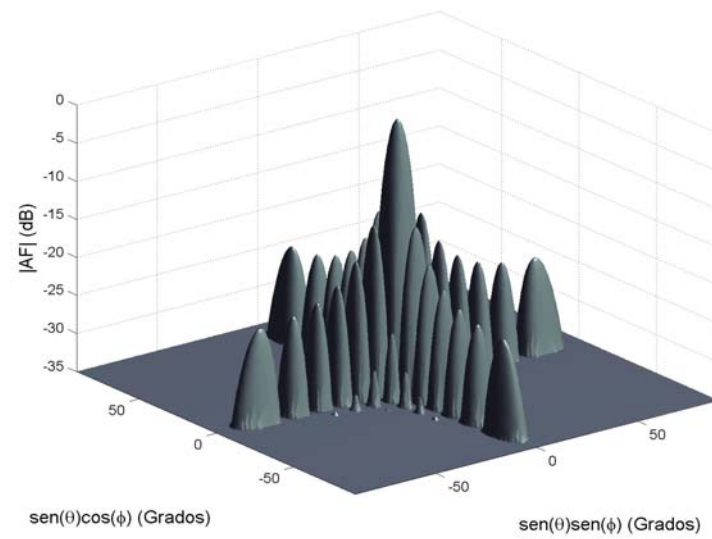
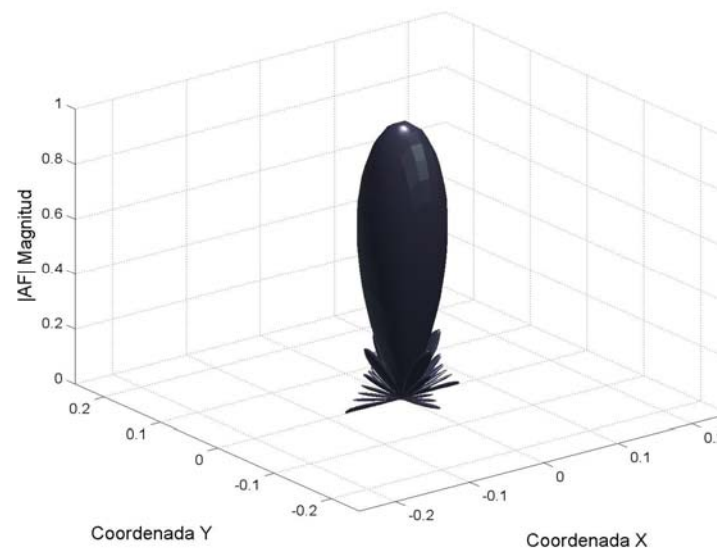


Figura 19. BER y HPBW de un agrupamiento de  $14 \times 14$  elementos para diferentes desplazamientos del haz principal, en una red satelital LEO con altura orbital de 780 km y  $\zeta_{min}$  de  $30.8^\circ$ .

En la Figura 19 se comprueba que el desplazamiento máximo permitido de un agrupamiento de  $14 \times 14$  elementos para una constelación LEO de 780 km y  $\zeta_{min}$  de  $30.8^\circ$ , debe ser  $\pm 49.86^\circ$  para mantener la calidad de servicio. De esta manera se tiene que el lóbulo principal podrá desplazarse en su totalidad dentro de la apertura del satélite de  $99.8^\circ$ . No obstante, el incremento de este ángulo de elevación de la ET se ve reflejado en la complejidad de la red satelital, la cual aumenta de 66 a 200 satélites, como se presentó en la Tabla III y V.



a)



b)

Figura 20. Respuesta natural del diagrama de radiación de un agrupamiento de 14x14 elementos de antenas: a) en el espacio, b) coordenadas esféricas.

La Figura 20 muestra el diagrama de radiación en el modo transversal del agrupamiento de antenas utilizado en la constelación de 780 km con un ángulo mínimo de elevación de la estación terrena de  $30.8^\circ$ . Este diagrama representa la respuesta natural del factor de agrupamiento planar, obteniéndose un nivel de lóbulos laterales de 13.15 dB y un HPBW de  $6.7^\circ$ . Es importante mencionar que para los distintos escenarios de simulación se utilizó un espaciamiento uniforme entre elementos de  $0.5\lambda$ .

Por otro lado, la Figura 21 muestra una serie de curvas que representan la ganancia, potencia y PIRE en función del número de elementos de antena, que son requeridos en el presupuesto de enlace para una constelación LEO de 780 km. Los resultados mostrados en la Tabla VI con respecto al número de elementos de antenas necesario para cumplir con cierta ganancia y potencia de antena a partir de un PIRE especificado, son obtenidos a partir de esta Figura en discusión.

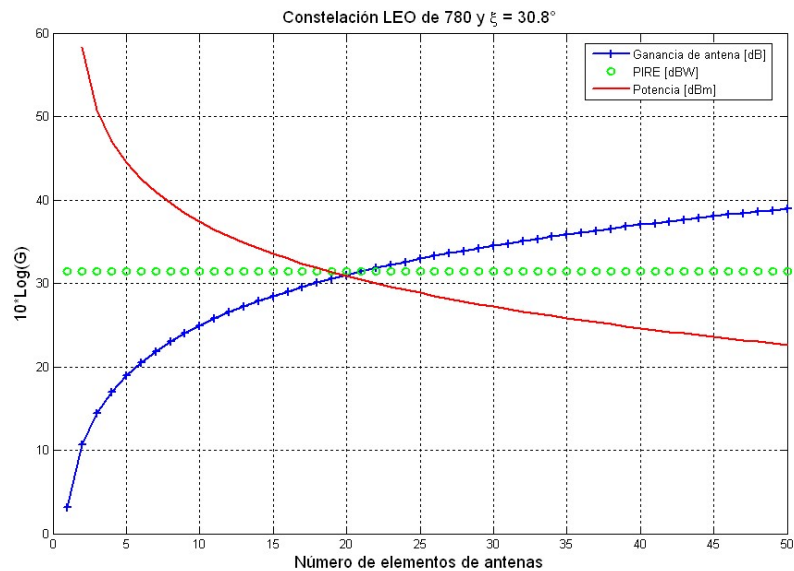


Figura 21. Ganancia, potencia y PIRE requeridos en el presupuesto de enlace en función del número de elementos de antenas para una constelación LEO de 780 km.

Por lo tanto, de acuerdo con la Figura 21 la ganancia de antena requerida de 27.6 dB en el presupuesto de enlace (Tabla VI) la proporciona un agrupamiento de 14x14 elementos. De esta forma para mantener un PIRE de 31.42 dBW es necesario mantener en este punto una potencia de antena de aproximadamente 34 dBm, para proporcionar una probabilidad de error de  $10^{-6}$ , y una potencia de antena de 38.4 dBm para un probabilidad de error de  $10^{-3}$ . Sin embargo se puede apreciar en la Figura que el valor en el número de elementos de antena puede variar, ocasionando de igual manera una variación en la potencia requerida en el agrupamiento de antenas para mantener la calidad de servicio. De ahí la importancia de establecer un curva compromiso en relación a estos parámetros.

#### IV.4.2 Tecnología de antenas inteligentes para una red satelital con altura orbital de 1400 km.

En el apartado anterior se pudo apreciar que el utilizar agrupamientos de antenas para una constelación de 780 km de altura, implica un número elevado de satélites para mantener la calidad de servicio. En base a esto, se propone el diseño de una constelación de satélites LEO con altura orbital de 1400 km con el fin de reducir el número de satélites en dicha constelación, cuyos parámetros de diseño se presentan en la Tabla VII.

**TABLA VII. Parámetros de diseño para una constelación de satélites LEO con altura orbital de 1400 km y  $\xi_{\min}$  de 19.287°.**

Altura orbital [km]	$T_{\text{visibilidad}}$ [min]	Número planos	Sat./plano orbital	Total de satélites	$\xi_{\min}$ [°]	Apertura sat. [°]
1400	12.642	5	9	45	19.287	101.4252

Los resultados obtenidos en el presupuesto de enlace para esta constelación en particular se muestran en la Tabla VIII.

**TABLA VIII. Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y Rb de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 1400 km y  $\xi_{\min}$  de 19.287°.**

$P_{\text{sat}}$ [w]	Número de elementos	Distancia ET-Sat [km]	$\text{PIRE}_{\text{sat}}$ [dBW]	$G_{\text{sat}}$ [dB]	$G_{\text{agrup}}$ [dB]	$C/N_{\text{tot}}$ [dB]	$C/N_{\text{desc}}$ [dB]	BER	$\theta_0$ [°]
1.727	29x29	1400	36.503	34.14	34.22	13.789	17.94	$10^{-6}$	0
7	15x15	2818.36	36.41	27.95	28.5	10.345	11.768	$10^{-3}$	50.7

En este caso, para esta altura orbital la ganancia de antena requerida en el presupuesto de enlace es mayor que para una altura orbital de 780 km. En el análisis para el mejor de los casos la ganancia máxima requerida fue de 34.14 dB, mientras que para el peor de los casos la ganancia mínima fue de 27.95 dB.

Además, al igual que en el análisis anterior (altura orbital de 780 km), el número de elementos de antenas obtenido para la ganancia mínima requerida en el presupuesto de enlace, solo satisface la calidad de servicio para un BER de  $10^{-3}$ . Por lo tanto, la ganancia máxima calculada a partir del agrupamiento de 29x29 elementos ofrecerá la calidad de servicio para una probabilidad de error entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ . De acuerdo a este análisis, se obtuvo que el desplazamiento máximo del haz principal del agrupamiento de antenas es  $\pm 50.7^\circ$ , teniendo la capacidad para moverse dentro del área de cobertura del satélite, garantizando la comunicación del enlace sin interrupciones y cumpliendo la calidad de servicio, tal como se muestra en la Figura 22.

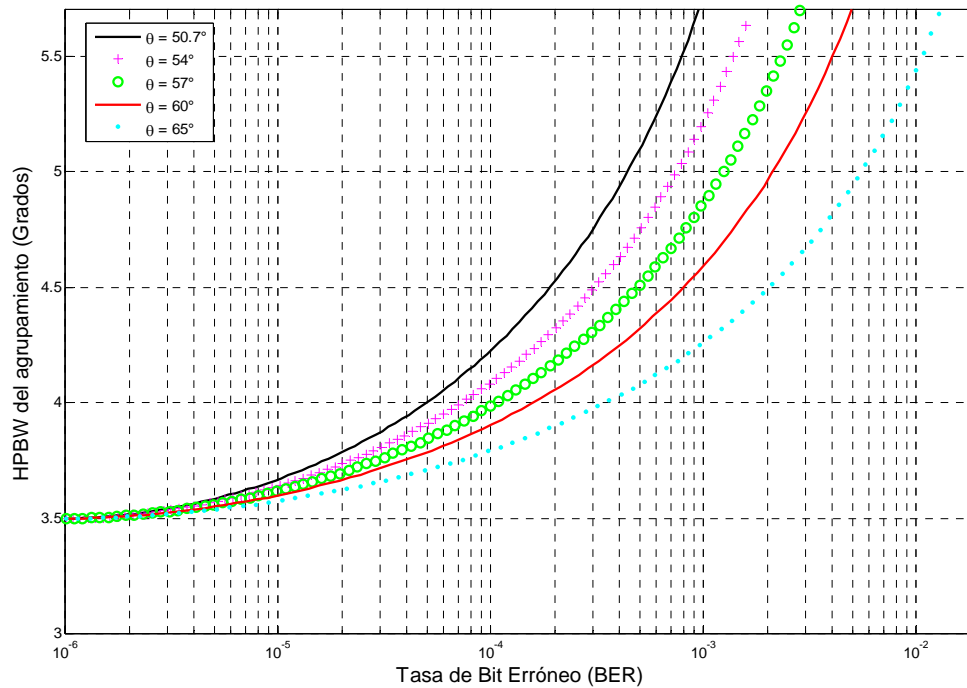
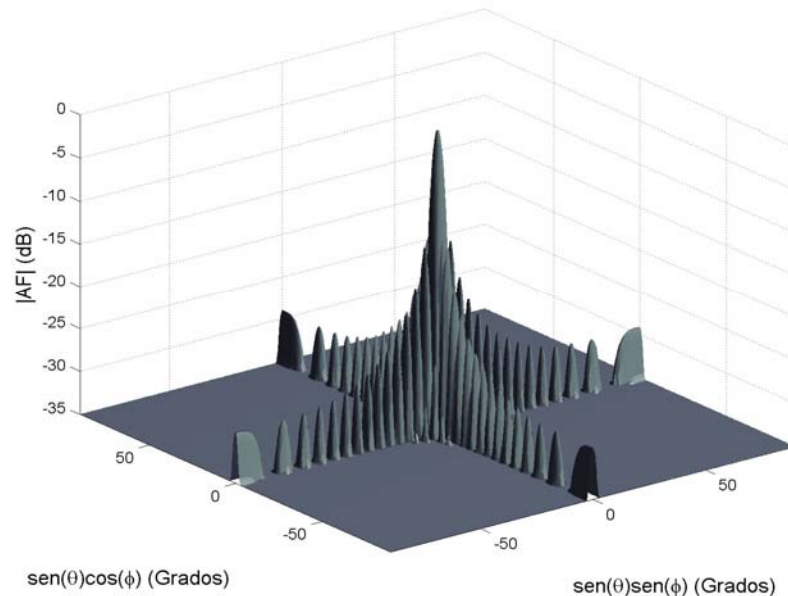


Figura 22. BER y HPBW de un agrupamiento de 29x29 elementos para diferentes desplazamientos del haz principal, en una red satelital LEO con altura orbital de 1400 km y  $\zeta_{min}$  de 19.28°.

En la Figura 22 se observa que el desplazamiento máximo permitido de un agrupamiento de 29x29 elementos para una constelación LEO de 1400 km y  $\zeta_{min}$  de 19.28°, debe ser  $\pm 50.7^\circ$  para mantener la calidad de servicio. Sin embargo, un desplazamiento mayor a  $\pm 50.7^\circ$  del lóbulo principal provocará que ya no se cumpla la calidad de servicio para un BER de  $10^{-3}$ . Por otra parte se tiene que el ancho de haz es más estrecho conforme se desplaza dentro del área de cobertura del satélite de  $101.4^\circ$ , variando de  $3.5^\circ$  a  $5.7^\circ$  aproximadamente, esto se debe a que se necesita un agrupamiento mucho mayor con respecto al análisis de la constelación anterior.





*Figura 23. Respuesta natural del diagrama de radiación de un agrupamiento de 29x29 elementos en el modo transversal, con espaciamiento uniforme de  $0.5\lambda$ .*

El diagrama de radiación resultante al utilizar un agrupamiento de 29x29 en este diseño de constelación, se muestra en la Figura 23, que a diferencia de la Figura 20, presenta un lóbulo principal más estrecho con un HPBW de  $3.5^\circ$  y un nivel de aislamiento de 13.15 dB.

La Figura 24 permite obtener el número de elementos de antenas necesario para cumplir con cierta ganancia y potencia de antena a partir de un PIRE especificado, para una constelación LEO de 1400 km. Por lo tanto, de acuerdo con la Figura 24 la ganancia de antena requerida de 34.14 dB (Tabla VIII) la proporciona un agrupamiento de 29x29 elementos. De esta manera para proporcionar un PIRE de 36.5 dBW es necesario mantener en este punto una potencia de antena de 32.4 dBm para proveer una probabilidad de error de  $10^{-6}$ .

---

Por otro lado, se puede apreciar en la Figura que el valor en el número de elementos de antena puede ser manipulado con el fin de obtener un decremento en la potencia de transmisión a bordo del satélite, sin embargo, esto traerá como consecuencia un incremento en la complejidad en el tamaño del agrupamiento de antenas.

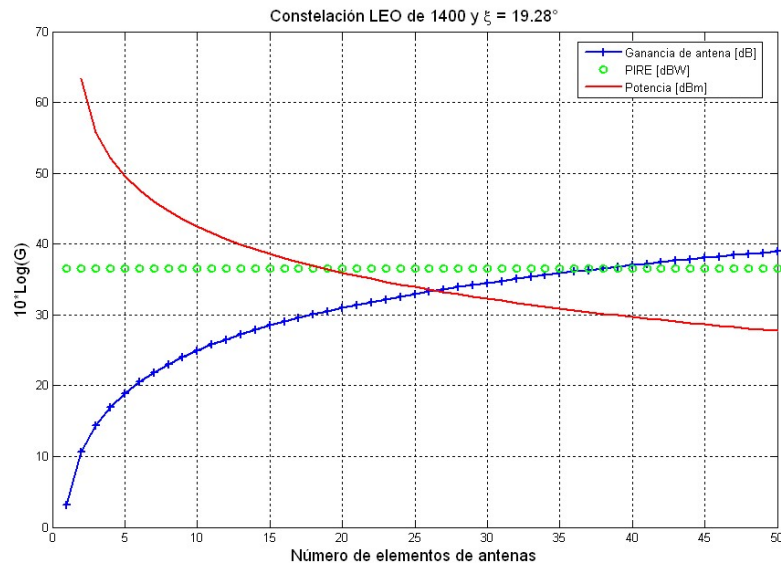


Figura 24. Ganancia, potencia y PIRE requeridos en el presupuesto de enlace en función del número de elementos de antenas para una constelación LEO de 1400 km.

En el siguiente apartado se presentan los resultados para el diseño de una constelación con altura orbital de 1700 km, con el fin de obtener estadísticas comparativas con los escenarios de simulación anteriores, y que permitan establecer las condiciones idóneas en cuanto al análisis del presupuesto de enlace, calidad de servicio, número de satélites que integran la constelación, así como el consumo de potencia del agrupamiento de antenas a bordo del satélite.

#### IV.4.3 Tecnología de antenas inteligentes para una red satelital con altura orbital de 1700 km.

A continuación se presenta el diseño de una red satelital para una altura orbital de 1700 km aplicando la tecnología de antenas inteligentes, para obtener las mismas estadísticas y compararlas con los escenarios anteriores. Con respecto al diseño de la constelación para esta altura orbital y al presupuesto de enlace, los parámetros calculados se pueden resumir en la Tabla IX y X respectivamente.

**TABLA IX. Parámetros de diseño para una constelación de satélites LEO con altura orbital de 1700 km y  $\xi_{\min}$  de 9.7°.**

Altura orbital [km]	$T_{\text{visibilidad}}$ [min]	N° planos	Sat./plano orbital	Total de satélites	$\xi_{\min}$ [°]	Apertura sat. [°]
1700	19.534	4	7	28	9.7	102.2038

**TABLA X. Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y  $R_b$  de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 1700 km y  $\xi_{\min}$  de 9.7°.**

$P_{\text{sat}}$ [w]	Número de elementos	Distancia ET-Sat [km]	$\text{PIRE}_{\text{sat}}$ [dBW]	$G_{\text{sat}}$ [dB]	$G_{\text{agrup}}$ [dB]	$C/N_{\text{tot}}$ [dB]	$C/N_{\text{desc}}$ [dB]	BER	$\theta_0$ [°]
1.282	41x41	1700	38.189	37.11	37.23	13.789	17.94	$10^{-6}$	0
7	20x20	3997.53	39.439	30.99	31.0	10.345	11.768	$10^{-3}$	51.1

En este escenario de simulación, el número de satélites para tener una cobertura global se ve reducido a 28 (Tabla IX), debido al incremento del área de cobertura del satélite. En la Tabla X se muestra que la ganancia máxima requerida de 37.11 dB da como resultado el empleo de un agrupamiento de 41x41 elementos de antena. Además, se tiene que el desplazamiento máximo permitido del lóbulo principal de este agrupamiento es de  $\pm 51.1^\circ$ , para mantener la calidad de servicio dentro de los límites establecidos. La Figura 25 muestra este desplazamiento máximo del haz principal para una constelación LEO de 1700 km y un ángulo mínimo de elevación de la ET de  $9.7^\circ$ . Por otra parte se tiene que el ancho de haz varía de  $2.4^\circ$  a  $4^\circ$  conforme se desplaza dentro del área de cobertura del satélite de  $102.2^\circ$ .

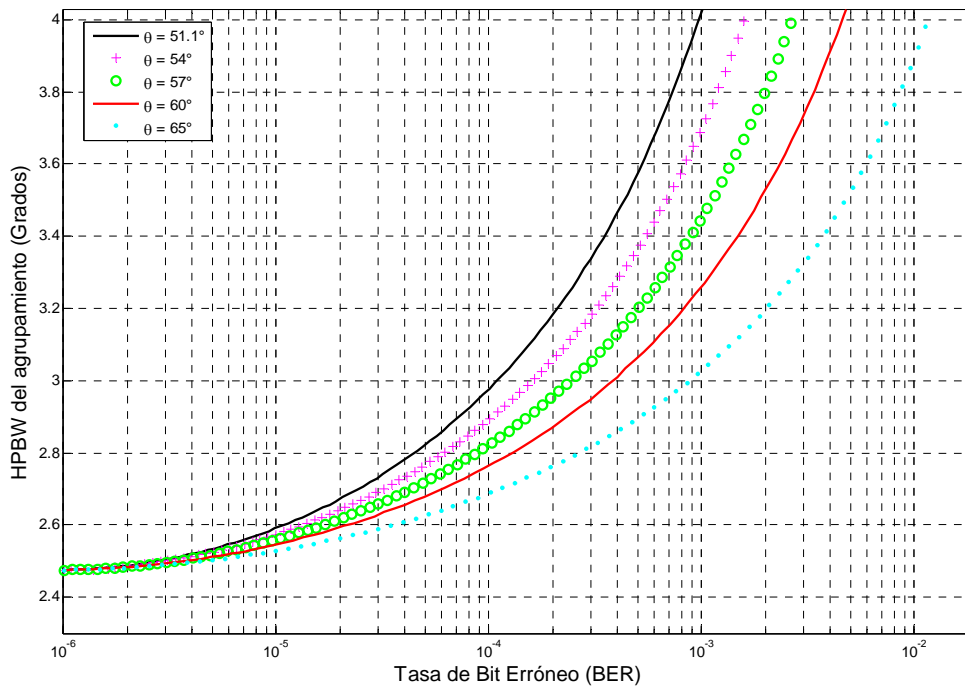
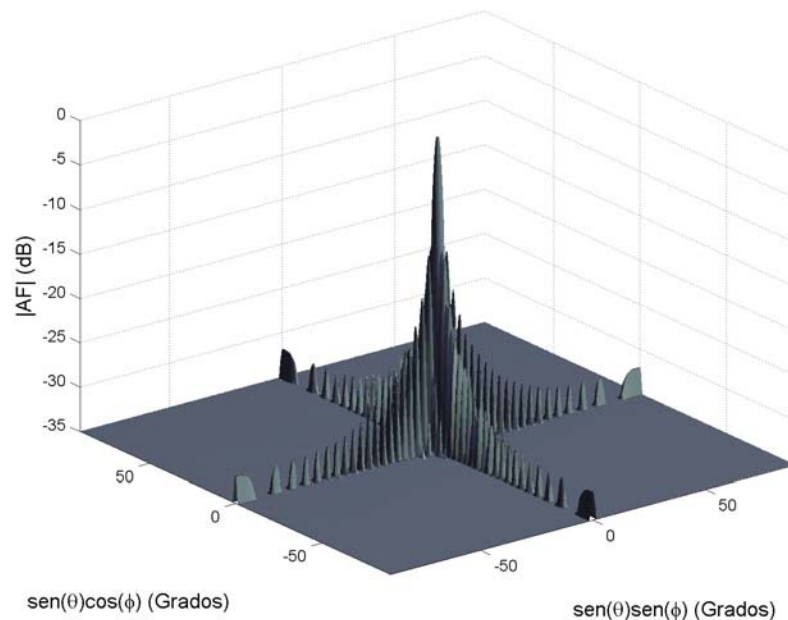


Figura 25. BER y HPBW de un agrupamiento de 41x41 elementos para diferentes desplazamientos del haz principal, en una red satelital LEO con altura orbital de 1700 km y  $\zeta_{min}$  de  $9.7^\circ$ .

Para este caso, al emplear un agrupamiento de  $41 \times 41$  elementos se reduce aun más el ancho de haz del lóbulo principal, tal como se puede apreciar en la Figura 25. Sin embargo, el incremento de potencia del agrupamiento de antenas para mantener la calidad de servicio a bordo del satélite ( $P_{\text{sat}}$ ) durante su período de visibilidad es más amplio (Tabla X), variando de 1.282 a 7 Watts (5.718 Watts), en comparación con los escenarios anteriores: de 1.7271 a 7 Watts (5.27 Watts) para 1400 km (Tabla VIII), y de 2.347 a 7 Watts (4.65 Watts) para 780 km (Tabla VI).

Finalmente, la Figura 26 representa el diagrama de radiación del agrupamiento planar de antenas utilizado en el diseño de constelación con una altura orbital de 1700 km, dando como resultado un HPBW de  $2.5^\circ$  para una probabilidad de error de  $10^{-6}$  en el mejor de los casos.



*Figura 26. Respuesta natural del diagrama de radiación en el modo transversal de un agrupamiento de  $41 \times 41$  elementos, con espaciamiento uniforme de  $0.5\lambda$ .*

Al igual que los escenarios de simulación anteriores, la Figura 27 permite obtener el número de elementos de antenas necesario para cumplir con cierta ganancia y potencia de antena a partir de un PIRE especificado, ahora en este caso para una constelación LEO de 1700 km de altura. Por lo tanto, de acuerdo con la Figura 27 la ganancia de antena requerida de 37.11 dB (Tabla X) la proporciona un agrupamiento de 41x41 elementos. De esta forma para mantener un PIRE de 38.19 dBW es necesario una potencia de antena de 31 dBm, para proporcionar en este punto una probabilidad de error de  $10^{-6}$ .

Asimismo, se puede apreciar que el valor en el número de elementos de antena puede ser manipulado con el fin de obtener un decremento en la potencia de transmisión a bordo del satélite, sin embargo de la misma manera que en los casos anteriores, esto traerá como consecuencia un incremento en la complejidad en el tamaño del agrupamiento de antenas.

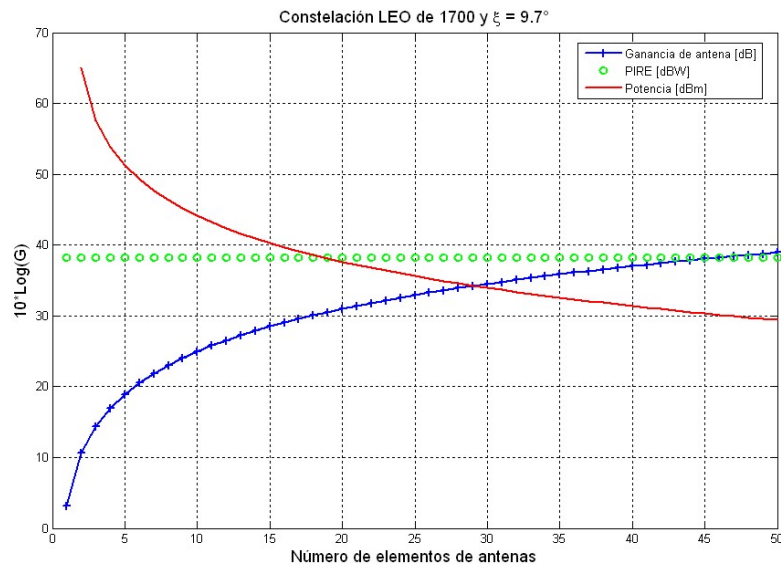


Figura 27. Ganancia, potencia y PIRE requeridos en el presupuesto de enlace en función del número de elementos de antenas para una constelación LEO de 1700 km.

De los escenarios de simulación anteriores se tiene que mientras mayor sea la altura orbital de la constelación de satélites LEO, mayor será la ganancia requerida en el presupuesto de enlace, así como también mayor será el incremento de potencia del agrupamiento de antenas a bordo del satélite para mantener la calidad de servicio en los límites establecidos. Por lo tanto, es necesario aplicar técnicas de optimización para mejorar aun más el consumo de potencia en el agrupamiento de antenas, y que permitan mantener en el presupuesto de enlace la relación portadora ruido en el nivel deseado (16.5 dB).

#### **IV.4.4 Técnica de optimización Tchebyscheff.**

La síntesis de Tchebyscheff permite obtener un compromiso óptimo entre el ancho del haz y el nivel de lóbulo laterales, ya que el ancho de haz es mínimo para un espaciamiento entre elementos y nivel de aislamiento especificados.

Para conseguir que todos los lóbulos secundarios sean uniformes, se sintetiza el factor del agrupamiento mediante los polinomios de Tchebyscheff (el cual se explica con más detalle en el apéndice A), cuyas oscilaciones tienen amplitud constante y pueden asociarse a los lóbulos secundarios. En esta sección del capítulo se analizará la calidad de servicio del enlace en satélites LEO, mediante la incorporación de un agrupamiento de antenas en el plano, aplicando síntesis de Tchebyscheff para los escenarios de simulación con alturas orbitales de 780 y 1400 km. Estas fueron presentadas previamente utilizando un agrupamiento en su respuesta natural del diagrama de radiación.

---

---

#### IV.4.4.1 Red satelital con altura orbital de 780 km utilizando Tchebyscheff.

De acuerdo con las expresiones presentadas en el apéndice A, fue posible obtener la síntesis del diagrama de radiación de un agrupamiento planar de antenas. En base a ello, los resultados obtenidos para esta altura orbital en el presupuesto de enlace, se presentan en la Tabla XI.

**TABLA XI. Presupuesto de enlace en banda Ku con una modulación QPSK y  $R_b$  de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 780 km aplicando síntesis de Tchebyscheff.**

$P_{sat}$ [w]	Número de elementos	Distancia ET-Sat [km]	$PIRE_{sat}$ [dBW]	$G_{sat}$ [dB]	$G_{agrup}$ [dB]	$C/N_{tot}$ [dB]	$C/N_{desc}$ [dB]	BER	$\theta_0$ [°]
1.947	14x14	780	31.425	28.53	28.5	13.789	17.94	$10^{-6}$	0
5.753	7x7	1341.09	29.951	22.35	22.32	10.345	11.768	$10^{-3}$	50.95

Haciendo una comparación de esta técnica de síntesis del diagrama de radiación con la Tabla VI (respuesta natural), se obtiene una mejora en la ganancia máxima del agrupamiento de antenas de 27.66 dB a 28.53 dB, así como un incremento de 21.5 dB a 22.35 dB en la ganancia mínima requerida en el análisis para el peor de los casos. Esto implica una reducción en el consumo de potencia a bordo del satélite de 1.25 W (de 7 a 5.753 W) en el peor de los casos y 0.43 W (de 2.37 a 1.947 W) en el mejor de los casos, lo que a su vez genera anchos de haz más estrechos tal como se puede apreciar en la Figura 28.



Ahora se puede observar que en la Figura 28, el desplazamiento máximo del haz principal de  $\pm 50.95^\circ$  de un agrupamiento de  $14 \times 14$  elementos para una constelación LEO de 780 km y  $\zeta_{min}$  de  $30.8^\circ$ , permite mantener la calidad de servicio en una probabilidad de error entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ . No obstante, para desplazamientos mayores a  $\pm 50.95^\circ$  provocará que ya no se cumpla la calidad de servicio en el análisis para el peor de los casos. Por otra parte, se tiene que el ancho de haz es más estrecho aplicando síntesis de Tchebyscheff conforme este se desplaza dentro del área de cobertura del satélite variando de  $6.74^\circ$  a  $10.5^\circ$ , en comparación con la respuesta natural del mismo agrupamiento de antenas cuyo ancho de haz varía de  $7.25^\circ$  a  $12.26^\circ$  (Figura 19).

Mientras tanto en la Figura 29, se ilustra el diagrama de radiación del agrupamiento planar empleado para esta constelación aplicando síntesis de Tchebyscheff, en el cual dicha estadística es generada utilizando las ecuaciones que se presentan en el apéndice A de esta tesis. Ahora el nivel de lóbulos laterales es de 16.5 dB debido a que este valor, es el calculado para la relación portadora ruido (C/I) en el presupuesto de enlace, para mantener la calidad de servicio.

Debido a la reducción que presenta el ancho de haz en el agrupamiento de antenas aplicando síntesis Tchebyscheff para esta constelación, se procederá a utilizar esta técnica de optimización para una constelación de 1400 km con el fin de obtener estadísticas y compararlas con su respuesta natural.

---

---

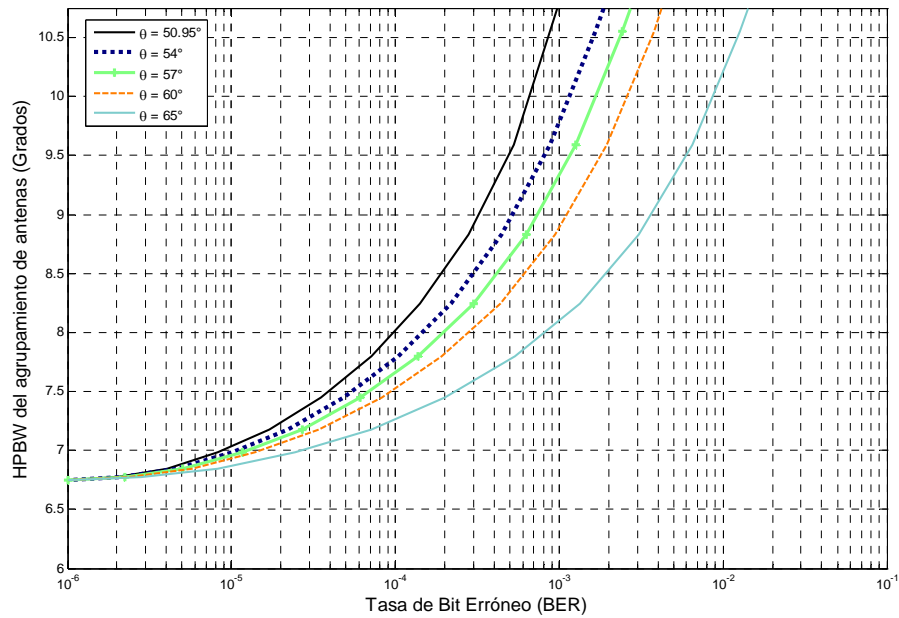


Figura 28. BER y HPBW de un agrupamiento de  $14 \times 14$  elementos aplicando síntesis de Tchebyscheff, en una red satelital LEO con altura orbital de 780 km y  $\zeta_{min}$  de  $30.8^\circ$ .

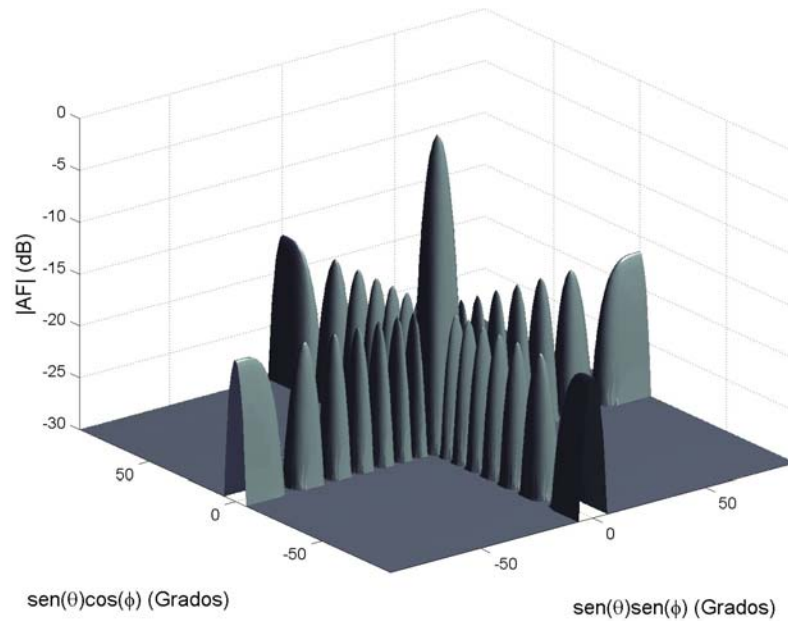


Figura 29. Diagrama de radiación en el modo transversal de un agrupamiento de  $14 \times 14$  elementos, aplicando síntesis de Tchebyscheff con espaciamiento uniforme de  $0.5\lambda$ .

#### IV.4.4.2 Red satelital con altura orbital de 1400 km utilizando Tchebyscheff.

De igual forma para esta altura orbital se aplicó la síntesis del diagrama de radiación mediante técnicas Tchebyscheff, obteniéndose como resultado la Tabla XII:

**TABLA XII. Presupuesto de enlace en banda Ku con modulación QPSK y Rb de 128 kbps, para una constelación con altura orbital de 1400 km aplicando síntesis de Tchebyscheff.**

$P_{\text{sat}}$ [w]	Número de elementos	Distancia ET-Sat [km]	$PIRE_{\text{sat}}$ [dBW]	$G_{\text{sat}}$ [dB]	$G_{\text{agrup}}$ [dB]	$C/N_{\text{tot}}$ [dB]	$C/N_{\text{desc}}$ [dB]	BER	$\theta_0$ [°]
1.473	29x29	1400	36.503	34.82	34.82	13.789	17.94	$10^{-6}$	0
5.971	15x15	2818.36	36.41	28.64	28.64	10.345	11.768	$10^{-3}$	51.2

En la Tabla XII se presentan los resultados obtenidos en el presupuesto de enlace haciendo uso de técnicas de optimización. Siguiendo la misma filosofía que en el apartado anterior, al hacer una comparación con los resultados de la Tabla VIII se tiene un aumento en la ganancia máxima del agrupamiento de antenas de 34.14 a 34.82 dB. Por otro lado, la potencia requerida a bordo del satélite se reduce 0.25 W (de 1.727 a 1.473 W) para una probabilidad de error de  $10^{-6}$ , y 1.03 W (de 7 a 5.971 W) para una probabilidad de error de  $10^{-3}$ . La Figura 30 muestra la variación de la probabilidad de error en función del HPBW del agrupamiento para desplazamientos del lóbulo principal de  $\pm 51.4^\circ$ ,  $\pm 54^\circ$ ,  $\pm 57^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  y  $\pm 65^\circ$ , en el cual solamente el desplazamiento de  $\pm 51.4^\circ$  satisface la calidad de servicio con un ancho de haz que varía de  $3.27$  a  $5.17^\circ$  durante el período de visibilidad del satélite.

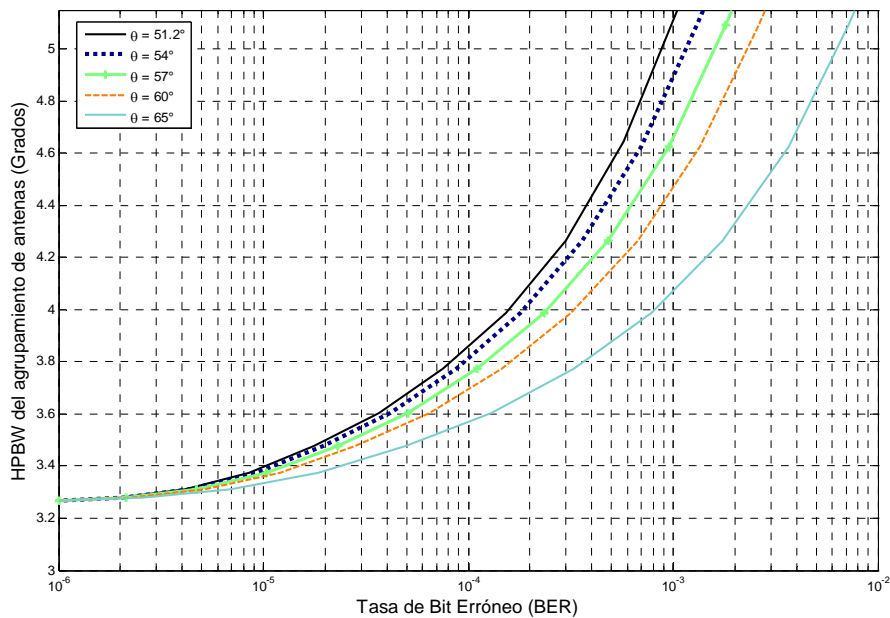


Figura 30. BER y HPBW de un agrupamiento de  $29 \times 29$  elementos aplicando síntesis de Tchebyscheff, en una red satelital LEO con altura orbital de 1400 km y  $\zeta_{min}$  de  $19.287^\circ$ .

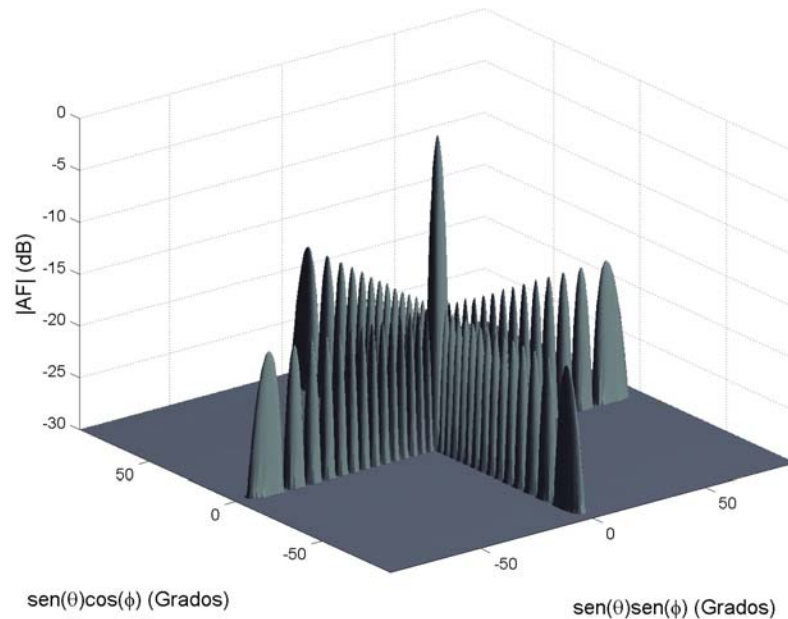


Figura 31. Diagrama de radiación en el modo transversal de un agrupamiento de  $29 \times 29$  elementos, aplicando síntesis de Tchebyscheff con espaciamiento uniforme de  $0.5\lambda$ .

La Figura 31 expone el diagrama de radiación de un agrupamiento de  $29 \times 29$  elementos utilizado en el diseño de esta constelación empleando la síntesis de Tchebyscheff, en el cual de igual forma que el análisis anterior nivel de aislamiento fue de 16.5 dB.

Se ha implementado el uso de agrupamientos de antenas para distintas alturas orbitales en el diseño de constelaciones de LEOS, obteniéndose estadísticas para dichos escenarios tanto en la respuesta natural del factor de agrupamiento como utilizando síntesis de Tchebyscheff, lo que permitió este último mejorar las prestaciones del sistema, obteniéndose anchos de haz más estrechos y una reducción en el consumo de potencia en las antenas a bordo del satélite. Lo que sigue a continuación es obtener nuevas estadísticas y hacer una comparación entre la respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff de un agrupamiento para constelaciones de 780 km y 1400 km.

---

---

## **IV.5 Análisis de resultados**

Una vez establecidas las consideraciones de simulación, el presente apartado tendrá como finalidad realizar un análisis numérico, utilizando la tecnología de antenas inteligentes, comparando tanto la respuesta natural del diagrama de radiación de un agrupamiento planar contra la síntesis de Tchebyscheff. Se consideran constelaciones con alturas orbitales de 780 y 1400 km en términos del ancho de haz del agrupamiento, período de visibilidad del satélite, radio de cobertura sobre la Tierra y ganancia de antena.

### **IV.5.1 Desplazamiento del haz principal y ganancia de antena.**

La Figura 32 muestra la curva de inclinación del haz principal de un agrupamiento de 14x14 elementos de antena en su respuesta natural (línea punteada) y aplicando síntesis de Tchebyscheff (línea sólida). Este direccionamiento comprende valores de  $\theta_0$  entre -60 y 60, ya que corresponde el margen visible del agrupamiento, pues al desplazar el lóbulo principal lo que se quiere es evitar la aparición de lóbulos tipo rejilla, que son lóbulos laterales del mismo tamaño que el lóbulo principal. De acuerdo con el desplazamiento máximo permitido (Tablas VI y XI), no se presentan los problemas que se generan con los lóbulos secundarios al tenerse desplazamientos de  $\pm 60^\circ$ . También se puede apreciar como se reduce el ancho de haz del lóbulo principal aplicando esta síntesis, ya que al analizar el punto de máxima radiación (cero grados), se tiene que para la respuesta natural de HPBW es de  $7.25^\circ$ , mientras que para la síntesis de Tchebyscheff es de  $6.74^\circ$ , obteniéndose una reducción de aproximadamente  $0.51^\circ$ .

---

---

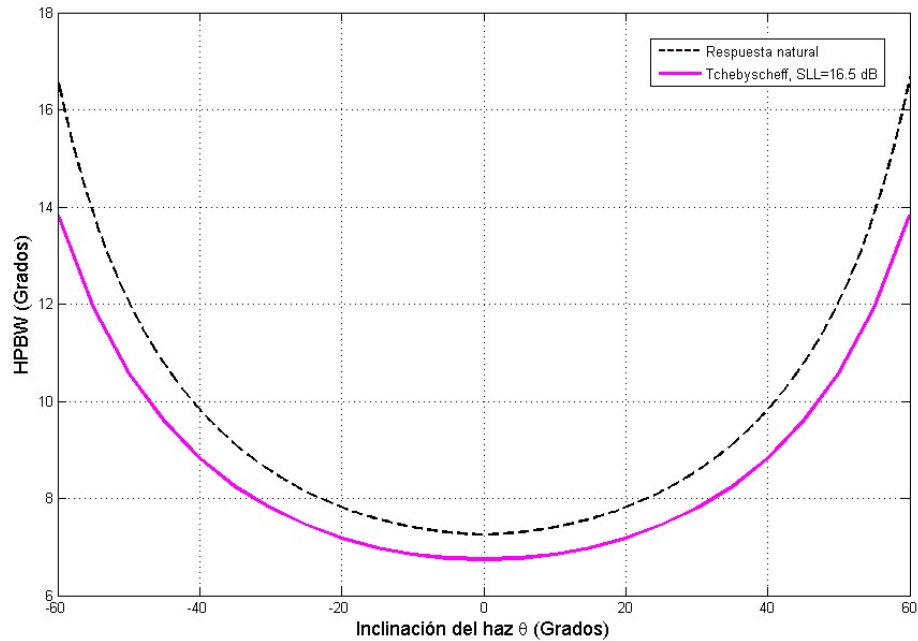


Figura 32. Desplazamiento en elevación del haz principal de un agrupamiento de 14x14 elementos en respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff.

Por otro lado, la Figura 33 presenta la variación de la ganancia de antena en función del desplazamiento del haz principal para los agrupamientos utilizados en las constelaciones de 780 y 1400 km. En la gráfica que representa el agrupamiento de 14x14 elementos se observa que en la respuesta natural (línea punteada), el desplazamiento máximo del haz es de  $\pm 49.86^\circ$  limitado por las ganancias máximas y mínimas del presupuesto de enlace (Tabla VI). En cambio, mediante la técnica de optimización (línea sólida), es posible aumentar la ganancia mínima de antena de 21.5 dB a 22.35 dB y la ganancia máxima de 27.9 dB a 28.5 dB, dando como resultado un desplazamiento máximo de haz de  $\pm 50.95^\circ$ .

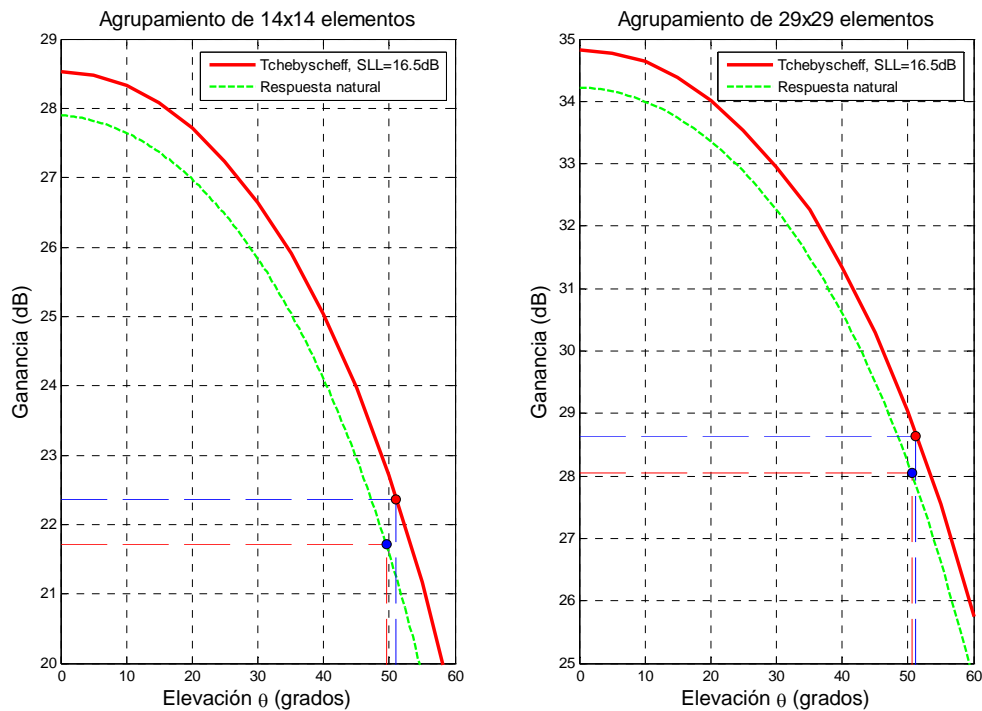


Figura 33. Ganancias de los agrupamientos de antenas de 14x14 y 29x29 elementos, en función del desplazamiento del haz principal en su respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff.

Haciendo la misma analogía para las curvas que representan las ganancias de un agrupamiento de 29x29 elementos (Tablas VIII y XII), se aprecia que el desplazamiento máximo del lóbulo principal en la síntesis de Tchebyscheff es  $0.5^\circ$  mayor que en la respuesta natural del sistema ( $51.2^\circ$  con respecto a los  $50.7^\circ$ ).

#### IV.5.2 Tiempo de visibilidad y radio de cobertura.

En cuanto al tiempo de visibilidad, la Figura 34 presenta una comparación entre la respuesta natural del factor de agrupamiento y la síntesis de Tchebyscheff, mostrando como varía el HPBW del agrupamiento conforme el satélite viaja a través del período de visibilidad.



Además, en la Figura 34 también se ilustra como repercute la disminución del ancho de haz aplicando dicha técnica de optimización con su radio de cobertura sobre la Tierra, empleando un agrupamiento de 14x14 elementos, así como también utilizando un agrupamiento de 29x29 elementos en la Figura 35.

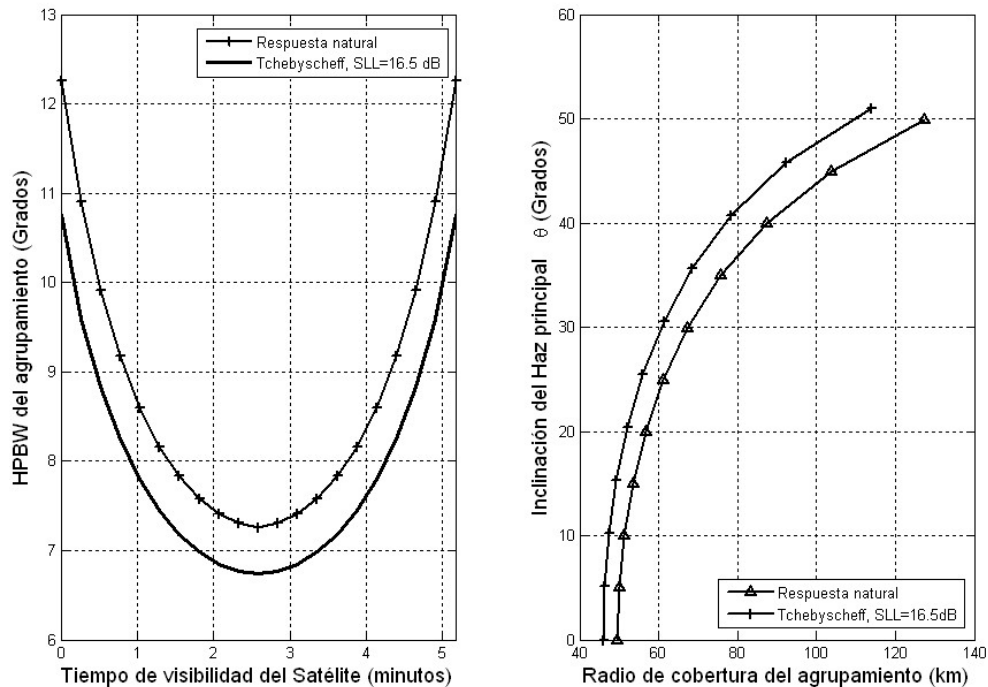


Figura 34. Tiempo de visibilidad del satélite y radio de cobertura del haz principal sobre la Tierra, para un agrupamiento de 14x14 elementos en su respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff.

Lo mostrado en la Figura 34 se puede resumir en las Tablas XIII y XIV, las cuales presentan resultados del radio de cobertura y ancho de haz para la respuesta natural del agrupamiento y aplicando síntesis de Tchebyscheff.

**TABLA XIII. Tiempo de visibilidad y radio de cobertura del haz principal de un agrupamiento de 14x14 elementos en su respuesta natural.**

Agrupamiento	$\theta_0$ [°]	Tvisibilidad [min]	HPBW [°]	Radio de cobertura [km]
14x14	49.86	0	12.26	127.4
14x14	0	2.584	7.253	49.94
14x14	49.86	5.168	12.26	127.4

**TABLA XIV. Tiempo de visibilidad y radio de cobertura del haz principal de un agrupamiento de 14x14 elementos aplicando síntesis de Tchebyscheff.**

Agrupamiento	$\theta_0$ [°]	Tvisibilidad [min]	HPBW [°]	Radio de cobertura [km]
14x14	50.95	0	10.57	111.9
14x14	0	2.584	6.745	45.96
14x14	50.95	5.168	10.57	111.9

En la Figura 34 se puede apreciar que hay una reducción de  $1.69^\circ$  (13.78%) y  $0.8^\circ$  (7%) en el ancho de haz del agrupamiento de 14x14 elementos, cuando el satélite se encuentra en la mitad y en los extremos de su período de visibilidad respectivamente. Asimismo se tiene una disminución del radio de cobertura del haz principal sobre la Tierra de 3.98 km en la dirección de máxima radiación, y una disminución 15.5 km cuando se tiene el máximo desplazamiento del haz.

Por otra parte, dado que trabajar a una altura orbital de 1400 km, tiene como resultado utilizar un agrupamiento de 29x29 elementos, la Figura 35 expone las variaciones del HPBW y el radio de cobertura sobre la Tierra del lóbulo principal para este agrupamiento de antenas, cuando reconfigura su diagrama de radiación durante el período de visibilidad del satélite.

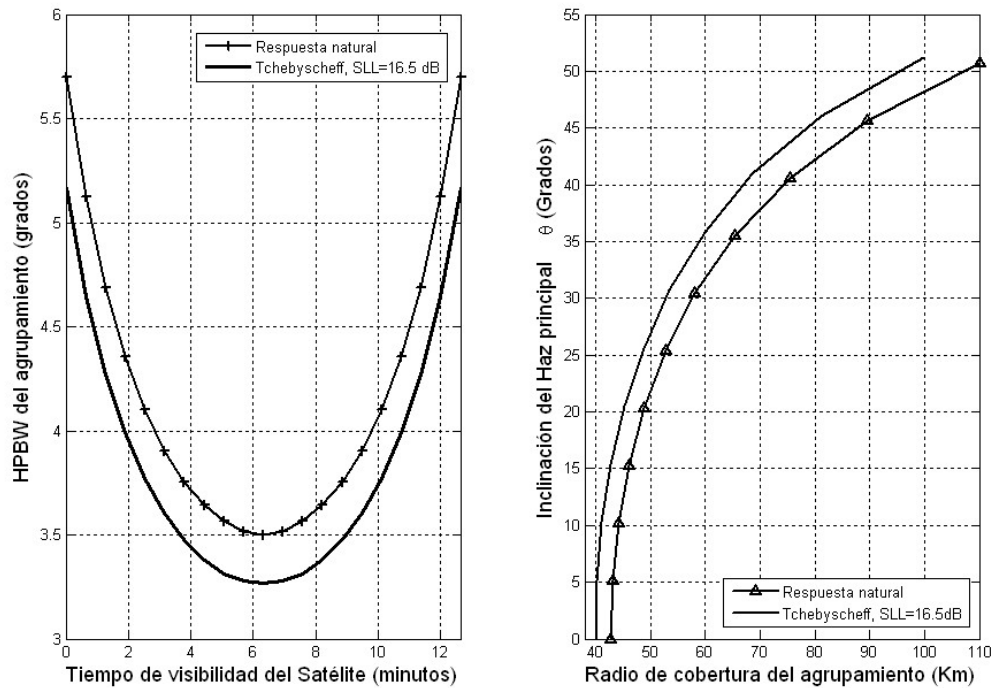


Figura 35. Tiempo de visibilidad del satélite y radio de cobertura del haz principal sobre la Tierra, para un agrupamiento de 29x29 elementos en su respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff.

De igual forma que en el agrupamiento de 14x14 elementos, las Tablas XV y XVI presentan un resumen de lo mostrado en la Figura 35, pero ahora empleando un agrupamiento de 29 x29 elementos de antena.

**TABLA XV. Tiempo de visibilidad y radio de cobertura del haz principal de un agrupamiento de 29x29 elementos en su respuesta natural.**

Agrupamiento	$\theta_0$ [°]	Tvisibilidad [min]	HPBW [°]	Radio de cobertura [km]
29x29	50.7	0	5.69	109.9
29x29	0	6.32	3.5	42.77
29x29	50.7	12.64	5.69	109.9

**TABLA XVI. Tiempo de visibilidad y radio de cobertura del haz principal de un agrupamiento de 29x29 elementos aplicando síntesis de Tchebyscheff.**

<b>Agrupamiento</b>	<b><math>\theta_0</math> [°]</b>	<b>Tvisibilidad [min]</b>	<b>HPBW [°]</b>	<b>Radio de cobertura [km]</b>
29x29	51.2	0	5.17	99.71
29x29	0	6.32	3.27	39.95
29x29	51.2	12.64	5.17	99.71

Podemos comprobar en la Figura 35 que hay una reducción de  $0.23^\circ$  (6.57%) en el ancho de haz del agrupamiento de 29x29 elementos cuando el satélite se encuentra en la mitad de su período de visibilidad, y una reducción de  $0.52^\circ$  (9.13%) cuando el satélite se encuentra en los extremos de dicho período. Asimismo se tiene una disminución del radio de cobertura del haz principal sobre la Tierra de 2.82 km en la dirección de máxima radiación, y una disminución 10.19 km cuando se tiene el máximo desplazamiento del haz.

La Figura 36 presenta una serie de curvas de la tasa de bit erróneo en función del ángulo mínimo de elevación de la ET para una red satelital con altura orbital de 1400 km. Se puede observar que todos los ángulos de elevación satisfacen la probabilidad de error en el mejor de los casos, aunque para un BER de  $10^{-3}$ , solamente un  $\xi_{\min}$  igual a  $19.28^\circ$  satisface esta calidad de servicio. Si este ángulo se incrementa, se mejora el margen de error en el peor de los casos, aunque no cumple la calidad de servicio establecida para el BER máximo permitido ( $10^{-3}$ ), haciendo una red satelital más compleja. Lo anterior se puede ver en la Tabla XVII, donde se aprecia de una manera más clara como el incremento de este ángulo de la ET repercute en el número de satélites de la constelación.

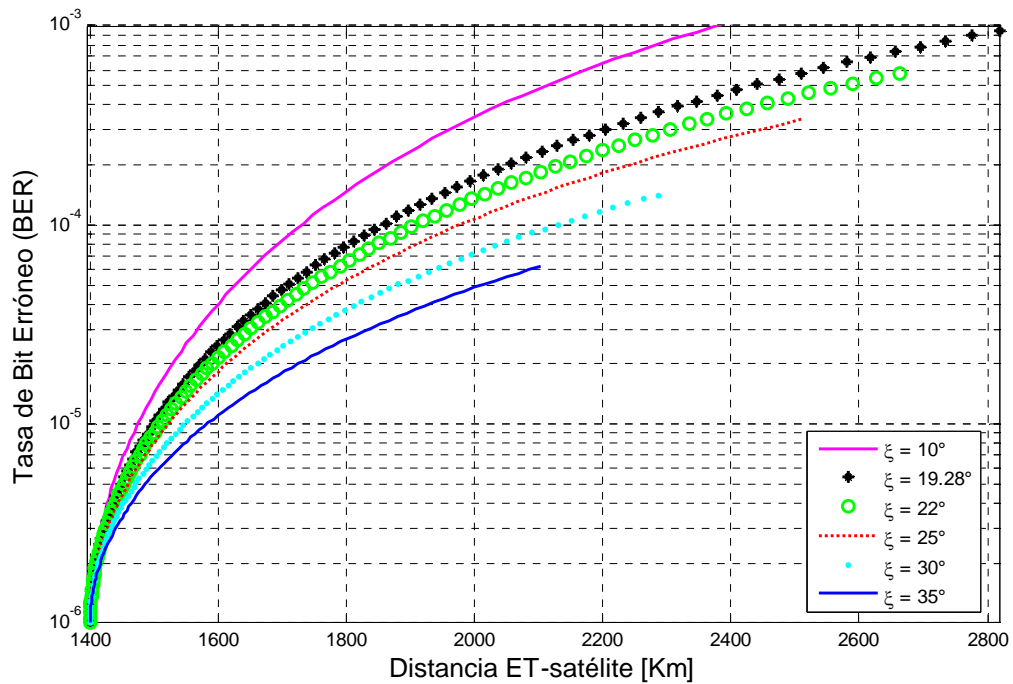


Figura 36. Probabilidad de error de una red satelital con altura orbital de 1400 km para ángulos mínimos de elevación de la ET de 10°, 19.28°, 22°, 25°, 30° y 35°.

Cabe señalar que las curvas presentadas en la Figura 36 son de gran importancia, ya que indican el ángulo mínimo de elevación de la ET requerido para proporcionar la calidad de servicio en un BER entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$  en el diseño de constelaciones de satélites LEO.

**TABLA XVII. Probabilidad de error en función del ángulo mínimo de elevación de la ET para una constelación de LEOS con altura orbital de 1400 km.**

$\xi_{\min}$ [°]	$D_{\max}$ ET-satélite [km]	Satélites por plano	Número de satélites	Total de satélites	Probabilidad de error máximo permitido
10	3479.95	7	4	28	$4.837 \times 10^{-3}$
19.28	2818.42	9	5	45	$9.948 \times 10^{-4}$
25	2508.76	11	6	66	$3.374 \times 10^{-4}$
35	2103.79	15	8	120	$6.21 \times 10^{-5}$

## IV.6 Análisis numérico y conclusiones.

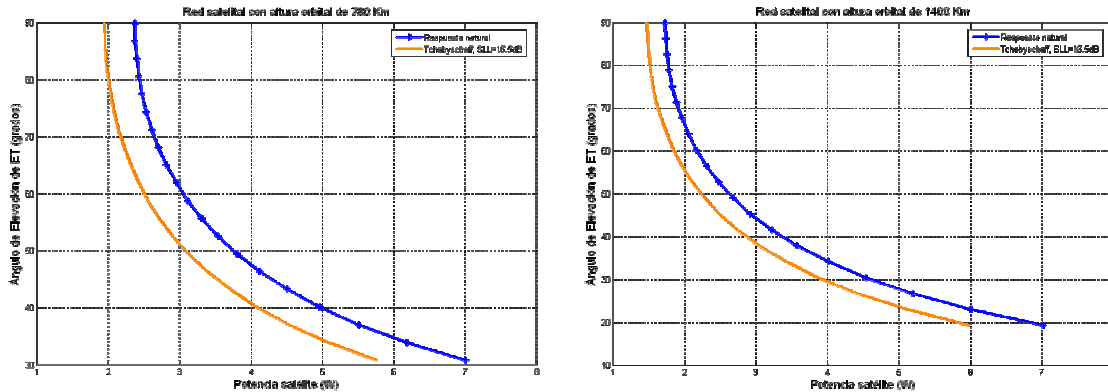


Figura 37. Consumo de potencia del agrupamiento de antenas en su respuesta natural y síntesis de Tchebyscheff para una constelación de 780 km y 1400 km

La Figura 37 muestra una serie de curvas, las cuales representan las variaciones en potencia del agrupamiento de antenas utilizado en las constelaciones de 780 km y 1400 km, en su respuesta natural y aplicando síntesis de Tchebyscheff como técnica de optimización. Puede observarse que dicha potencia se reduce 1.25 W y 0.43 W cuando el ángulo de elevación de la ET pasa de 30.8° a 90° respectivamente, para la constelación de 780 km. En cambio para la constelación de 1400 km, la potencia a bordo del satélite se reduce 1.03 W y 0.25 W cuando el ángulo de la estación terrena varía de 19.2° a 90°.

Estas gráficas al igual que la Figura 36 son de gran importancia, ya que permiten conocer la variación de potencia que debe tener el agrupamiento de antenas a bordo del satélite durante el período de visibilidad, para proporcionar la calidad de servicio. Lo que ayudará a definir que constelación de los distintos escenarios proporciona mejores beneficios.

En este capítulo se establecieron los escenarios de simulación para una red de satélites LEO, permitiendo conocer los resultados obtenidos en el proceso de simulación empleando la tecnología de antenas inteligentes. Se presentaron estadísticas en función del HPBW evaluando el comportamiento de la calidad de servicio para el peor y mejor de los casos, así como el desplazamiento máximo del haz principal del agrupamiento de antenas. Por otra parte, se realizó el análisis de resultados empleando técnicas de optimización Tchebyscheff para la síntesis del diagrama de radiación, en donde también se presentan estadísticas comprobando la reducción del haz principal del agrupamiento de antenas, lo que permitió reducir el consumo de potencia en las antenas a bordo del satélite.

Se puede concluir que los resultados del simulador permiten observar, que el empleo de la tecnología de antenas inteligentes en constelaciones de satélites LEO cercanas a la superficie de la Tierra, proporcionan la mejor optimización en el consumo de potencia del satélite. Sin embargo, esto trae como consecuencia que la red satelital se incremente considerablemente, repercutiendo en el costo de cada satélite. Por lo tanto, trabajar a una altura orbital media dentro del intervalo de los LEOS (500-2000km), tal es el caso de las simulaciones realizadas para la constelación de 1400 km, aunque no presenta la mejor optimización en el consumo de potencia aplicando síntesis de Tchebyscheff, la red satelital no es muy compleja en cuanto al número de satélites, de ahí la importancia de trabajar en esta constelación en particular.

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones y las aportaciones principales de este trabajo de tesis.

---

---

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo presenta las conclusiones y aportaciones de este trabajo de investigación. A continuación se describen las conclusiones así como las contribuciones y recomendaciones de trabajo futuro logradas durante el desarrollo de esta tesis.

### V.1 Conclusiones.

Se establecieron las consideraciones para los escenarios de simulación de sistemas de comunicación por satélite, tales como calidad de servicio (QoS), altura orbital, ángulo mínimo de elevación de la estación terrena, así como el número de elementos del agrupamiento de antenas a bordo del satélite de acuerdo a la ganancia requerida en el presupuesto de enlace.

Dichas simulaciones consideran una calidad de servicio para una probabilidad de error entre  $10^{-3}$  (peor de los casos) y  $10^{-6}$  (mejor de los casos). En base a las simulaciones realizadas se concluyen los siguientes aspectos:

---

---



- El presupuesto del enlace descendente debe encontrarse dentro del intervalo de 11.76-17.94 dB, a fin de mantener una calidad de servicio de un BER de  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$  respectivamente, con una relación portadora interferente (C/I) de 16.5 dB.
  - El ángulo mínimo de elevación de la estación terrena es sensible a la tasa de bit erróneo, de donde se pueden establecer dos vertientes:
    - a) Un decremento en el ángulo mínimo de elevación de la estación terrena trae consigo un deterioro en la probabilidad de error por arriba de  $10^{-3}$  en el peor de los casos.
    - b) Un aumento en el ángulo mínimo de elevación de la estación terrena mejora la probabilidad de error por debajo de  $10^{-3}$ , aunque aumenta la complejidad de la red satelital al no cumplir los requisitos de calidad de servicio de BER entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ .
  - Se observó que para mantener la calidad de servicio, la ganancia del agrupamiento planar de antenas se debe degradar 6.178 dB de su ganancia máxima a partir de la probabilidad de error en el mejor de los casos.
  - Se observó un desplazamiento máximo en elevación del haz principal del agrupamiento de antenas, dado que depende de su ganancia y del número de elementos. Para agrupamientos con número de antenas pequeño, el desplazamiento fue mínimo. Al incrementar el número de elementos se obtuvo un desplazamiento mayor.
- 
-

- El desplazamiento en la elevación del haz principal también depende de la apertura del satélite y del ángulo mínimo de elevación de la estación terrena. Uno de los problemas en el desarrollo de las simulaciones fue que al considerar alturas orbitales cercanas a la superficie de la Tierra y  $\xi_{\min}$  pequeños, se tenían aperturas de satélite mayores a fin de mantener una red satelital poco compleja con respecto al número de satélites. Esto representa un incremento del ancho de haz de lóbulo principal, pues obliga a tener desplazamientos en elevación muy altos, con la aparición de lóbulos laterales tipo rejilla en el diagrama de radiación como consecuencia.
  - Para alturas orbitales pequeñas, tal como IRIDIUM a 780 km, fue necesario aumentar el ángulo mínimo de elevación de la estación terrena para reducir la apertura del satélite, disminuyendo el ancho de haz del desplazamiento máximo del lóbulo principal. Sin embargo, se obtuvo un resultado adverso con el incremento de tamaño de la red satelital, ya que la flota satelital pasó de 66 a 200 satélites para proporcionar una cobertura global y la calidad de servicio establecida. Esto incrementa el costo del sistema del satélite, por lo que no sería costeable económicamente.
  - Para el desarrollo de la técnica de optimización Tchebyscheff fue necesario un nivel de lóbulos laterales de 16.5 dB para mantener la calidad de servicio. La aplicación de esta técnica de optimización en el direccionamiento del lóbulo principal en agrupamientos de antenas a bordo de LEOS permitió obtener haces más estrechos al reducir el ancho de haz del lóbulo principal y optimizar el consumo de potencia
- 
-

en las antenas a bordo del satélite. Esto permitió incrementar la ganancia en distintas combinaciones de agrupamientos de antenas.

- Se redujo el radio de cobertura del lóbulo principal sobre la superficie de la Tierra debido al uso de agrupamientos de antenas con haces más estrechos, que mantengan los valores de calidad de servicio deseada.
- Fue posible dirigir satisfactoriamente el ancho de haz del lóbulo principal dentro de la apertura del satélite, manteniendo un nivel constante de lóbulos laterales durante todo el período de visibilidad.
- El uso de agrupamientos de antenas a bordo del satélite reduce la potencia radiada al lograr haces más estrechos. En alturas orbitales cercanas a la superficie de la Tierra se obtiene una mejor optimización en el consumo de potencia de la antena, sin embargo, el consumo de potencia es máximo cuando el ángulo de elevación de la estación terrena es el mínimo.

De acuerdo a las conclusiones arriba descritas, se considera que este trabajo ha cumplido satisfactoriamente los objetivos planteados al inicio, generando aportaciones importantes que ayudarán con el estudio para trabajo futuro.

---

---

## V.2 Recomendaciones.

Tomando en cuenta los distintos escenarios de simulación en la obtención de estadísticas, y de acuerdo a las conclusiones obtenidas, se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda emplear una relación portadora ruido de  $(C/N)$  de 24.76dB en el enlace ascendente, ya que a partir de este parámetro se mantiene la relación portadora a interferente en el nivel deseado. Esto implica utilizar una Figura de mérito  $G/T|_{ET} = -19\text{dBK}^{-1}$  en la estación terrena y  $G/T|_{\text{sat}} = -10.5\text{dBK}^{-1}$  a bordo del satélite en el presupuesto de enlace.
  - Haciendo una comparación con los distintos escenarios de simulación, se recomienda utilizar un agrupamiento de antenas en constelaciones de LEOS con alturas orbitales medias, dentro del intervalo que rigen a los satélites de órbita baja (500- 2000 km), con el fin de reducir la apertura angular de las antenas del satélite y la complejidad de la red, ya que alturas más cercanas a la Tierra requieren del aumento del número de satélites para mantener la calidad de servicio. Una constelación con altura orbital alrededor de 1400 km presenta los siguientes beneficios:
    - a) Una constelación de satélites más pequeña (45 satélites para un ángulo mínimo de elevación de  $19.28^\circ$  en la estación terrena).
- 
-

- b) Un desplazamiento máximo del haz principal de  $\pm 50.7^\circ$  en su respuesta natural y  $\pm 51.2^\circ$  aplicando síntesis de Tchebyscheff, con una calidad de servicio de un BER entre  $10^{-6}$  y  $10^{-3}$ .
- c) Uso de un agrupamiento sencillo de antenas ( $29 \times 29$  elementos), generando haces durante el tiempo de visibilidad del satélite entre  $3.5^\circ$  a  $5.7^\circ$  en su respuesta natural, y entre  $3.27^\circ$  a  $5.17^\circ$  usando técnicas Tchebyscheff.

### **V.3. Aportaciones.**

Debido al problema en la generación de haces más estrechos en los sistemas de comunicación por satélite (traspasos en el área de cobertura debido a la sectorización de haces), se tiene el empleo de las antenas inteligentes en los sistemas de comunicación por satélite que han revolucionado las comunicaciones inalámbricas, obteniéndose las siguientes aportaciones:

- Se determinaron las condiciones y las dimensiones del sistema para la utilización de un agrupamiento planar de antenas a bordo de LEOS.
  - Manipulación de haces dinámicos dentro de los ángulos de apertura del satélite, considerando distintas alturas orbitales para los escenarios de simulación.
  - Uso de técnicas Tchebyscheff en agrupamientos de antenas para la optimización de la potencia radiada a bordo de satélites de órbita baja.
- 
-

- Determinación de los ángulos mínimos de elevación de la estación terrena dentro de los límites de calidad de servicio.
- Obtención de estadísticas en el desplazamiento máximo permitido del haz principal del agrupamiento de antenas y ángulos de la estación terrena dentro de los límites de calidad de servicio.

El estudio de agrupamientos de antenas en las comunicaciones satelitales es de gran importancia e interés, pues involucra no solo un campo de estudio, sino que implica la incorporación de dos tecnologías, lo cual representa el estado del arte en este trabajo.

#### **V.4 Trabajo futuro.**

Como recomendaciones para futuras líneas de investigación basadas en el problemática que abordó este trabajo de investigación, se pueden mencionar los siguientes puntos:

- Investigar el uso de antenas inteligentes en una estación terrena con un agrupamiento fijo de elementos capaz de dirigir haces dinámicos de alta ganancia hacia el satélite sobre toda su área de cobertura, siguiendo al satélite LEO en su trayectoria orbital y capaz de atender a dos satélites continuos de manera simultánea para efectuar un traspaso de llamada sin interrupción del servicio.
- 
-

- Generación de haces dinámicos a través de un agrupamiento de antenas inteligentes en ambos extremos del enlace: a bordo del satélite y en la estación terrena, buscando alinear de manera precisa el haz principal del diagrama de radiación de cada uno de los agrupamientos, evitando interrumpir el enlace dinámico entre ambas antenas al lograr una mayor precisión en el enlace de comunicaciones.
  - Emplear diferentes tasas de BER, velocidades de transmisión, así como esquemas de modulación y codificación de canal en el análisis del presupuesto de enlace para satélites de órbita baja.
  - Manejar haces dinámicos dentro de cada célula de una antena sectorial a bordo del satélite y estación terrena.
  - Implementar la tecnología de antenas inteligentes de manera práctica desarrollando software de visualización para la generación de haces dinámicos en LEOS, MEOS, GEOS, considerando enlaces intersatelitales/inter-orbitales.
  - Generar diagramas de radiación adaptativos considerando otras geometrías de antenas, así como también nuevas técnicas de optimización que permitan mejorar aun más las prestaciones del sistema.
- 
-

# REFERENCIAS

- Balanis, C.A. 2005. *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 3rd Ed., New Jersey, 999 pp.
  - Bhattacharyya, A.K. 2004. *Optimum design considerations for multiple spot beam array antennas*. 22nd International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit. 9-12 mayo. Monterrey, California.
  - Cardama A., Jofre L., Rius J., Bataller M., 2002. *Antenas*, Ediciones UPC. Segunda Edición, Barcelona. 468 pp.
  - Conte R, Cabanillas J.C. 2003. *Tecnología de Satélites con Procesamiento a Bordo y su Aplicación en Redes de Banda Ancha*. Decimacuarta Reunión de Otoño de Comunicaciones, Computación, Electrónica y Exposición Industrial, IEEE ROC&C. Acapulco, Gro., México. 26-30 de noviembre.
  - Conte Galván R. 2006. *Uso de Antenas Inteligentes a Bordo de Satélites de Comunicaciones de Órbita Baja*. Primer Simposium Internacional de Electrónica y Tecnologías de la Información SIETI-06, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Reynosa, Tamaulipas, México. 27-29 de septiembre.
  - Covarrubias, D. 2006. *Agrupamiento de Antenas en comunicaciones Móviles Celulares: Parte I*. Apuntes de la Asignatura Antenas Inteligentes, Grupo de Comunicaciones Inalámbricas, CICESE, Mayo.
- 
-



- Del Valle, J. 2006. *Análisis de voz sobre IP por Satélite y el impacto de distintas Órbitas GEO y LEO en la Calidad de Servicio y Desempeño*. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B.C., 112 pp.
  - International Telecommunication Union (ITU). 2002. *Handbook on Satellite Communications*, John Wiley. 3rd Ed, 1076 pp.
  - Hornillo Mellado S., *Comunicaciones por Satélite*. Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Escuela Superior de Ingenieros. <http://www.pauta.us.es/-pautadatos/publico/asignaturas/31783/14122/Tema7.pdf>. [Consulta: Junio/2007].
  - Jamalipour, A.1998. *Low Earth Orbital Satellites for Personal Communications Network*. Artech House. 1st Ed. Boston. 273 pp.
  - Kraqus, J.D., Marhefka, R.J. *Antennas for All Applications*. 2003. McGraw Hill. 3rd Ed., New Delhi. 960 pp.
  - Jin, L. K. 1997. *Adaptive Antenna Arrays for Satellite Personal Communications Systems*. Tesis de Maestría en Ciencias. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 103 pp.
  - Karim, Y.K., Ali, El-Haiji. 2002. *Modified Tchebyscheff planar arrays*, Radio Science, 37(5):1-9.
  - Kochali, B. 2005. *Mutual coupling effects on the directivity of phased arrays for mobile satellite reception*. Tesis de Maestría, The Department of Signals, Sensors and Systems Royal Institute of Technology. Estocolmo, Suecia. 54 pp.
- 
-

- Langley J., Ingramm M., Romsnofsky R., Lee R. 2004. *Optimizing Satellite Communication with Adaptive and Phased Array Antennas*. Georgia Institute of Technology, Smart Antenna Research Laboratory, 1-16.
  - Langley J., Ingramm M., Romsnofsky R., Lee R. 2005. *Adaptive Ground Antenna Array for Low Earth Orbiting Satellites*. Georgia Institute of Technology, Smart Antenna Research Laboratory, 1-12.
  - Li Winston, H. Leung, X. Huang. 2004. *Performance Evaluation of Digital Beamforming Strategies for Satellite Communications*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 40(1):12-26.
  - Lin, H.P., Jeng, S.S., Xu, G. y Vogel, W.J. 1997. *Experimental Studies of Using Smart Antenna Systems in Low-Earth Orbit Satellite Communications*. IEEE Vehicular Technology Conference. 1: 242-245.
  - Litva, J. y Lo, T.K. 1996. *Digital Beamforming in Wireless Communications*, Artech House.1st Ed. Norwood, 301 pp.
  - Muñoz, M.A. 2002. *Modelado y Simulación de Arreglos de Antenas en Antenas Inteligentes*. Tesis de Maestría en Ciencias, Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B.C., 149 pp.
  - Pratt, T. y Bostian, C.W. 1986. *Satellite Communications*. John Wiley and Sons, New York. 472 pp.
- 
-

- Rocha C.R. 2006. *Síntesis del Diagrama de Radiación de Agrupamientos de Antena mediante Técnicas de Cómputo Evolutivo*. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada B.C., 106 pp.
  - Roddy, D. 2001. *Satellite Communications*. McGraw-Hill. 3rd Ed. New York. 552 pp.
  - Stutzman, W.L. y Thiele, G.A. 1998. *Antena Theory and Design*. John Wiley and Sons, Inc. 2nd Ed. New York, 634 pp.
  - Tseng, F.I. y Cheng, D.K. 1968. *Optimum scannable planar arrays with an invariant sidelobe level*, Proc. IEEE, 56(11):1771–1778.
  - Velázquez, A. 2002. *Modelado y Simulación del Conformador Digital de Haz en Antenas Inteligentes*. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada B.C., 223 pp.
  - Zamora, A. 2002. *Modelado y Simulación de Técnicas de Conformación de Haz para Antenas Inteligentes*. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada B.C., 298 pp.
  - Zamora, R. 2005. *Análisis de Transmisión de voz sobre IP en tiempo real en Redes de Satélites de Órbita Baja con Procesamiento a Bordo*. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B.C., 116 pp.
- 
-

# APÉNDICE A. AGRUPAMIENTOS PLANARES TCHEBYSCHEFF

## A.1 Propiedades de los polinomios de Tchebyscheff.

Dado que esta síntesis del diagrama de radiación hace uso de los polinomios Tchebyscheff, es de gran importancia definirlos a través de la expresión (55), en el cual  $n$  representa el grado de dicho polinomio:

$$T_n \begin{cases} \cos(nt) & x = \cos(t) \quad |x| \leq 1 \\ \cosh(nt) & x = \cosh(t) \quad |x| > 1 \end{cases} \quad (55)$$

Desarrollando  $\cos(nt)$  y  $\cosh(nt)$  en potencias de  $\cos(t)$  y  $\cosh(t)$  respectivamente, se obtiene  $T_n(x)$  expresado en potencias de  $x$ , por lo tanto, cumplen la siguiente ecuación de recurrencia [Cardama, 2002]:

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x) \quad (56)$$

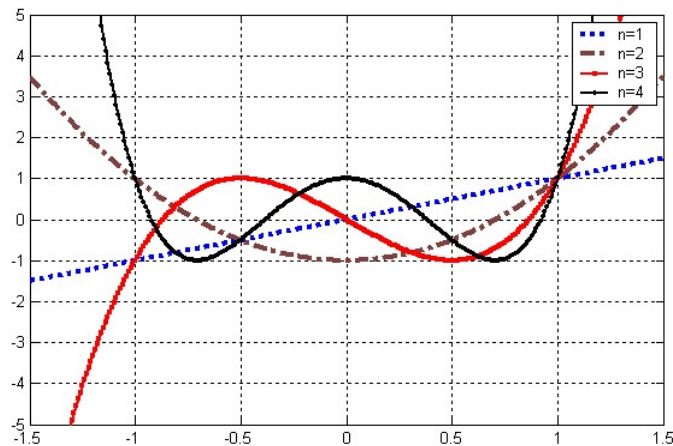


Figura 38. Polinomios de Tchebyscheff de grado  $n$  [Cardama, 2002].

Como se observa en la Figura 38, se presentan los polinomios de grados comprendidos entre 1 y 4, por lo que se deduce que los dos primeros polinomios son  $T_0(x)=1$  y  $T_1(x)=x$ . Por otro lado, también se aprecia que todas las oscilaciones de los polinomios tienen igual amplitud y se producen en el intervalo  $[-1,1]$ , por lo tanto, los valores máximo y mínimo en este intervalo son 1 y -1 respectivamente.

El método de síntesis de Tchebyscheff se basan en transformar el intervalo  $[-1, 1]$  de la variable  $x$  en la zona de lóbulos secundarios del margen visible. De esta forma se consigue el máximo número de lóbulos secundarios en el diagrama de radiación, todos con igual amplitud, lo cual implica que el ancho del haz sea mínimo. Para ello se utilizan las siguientes transformaciones de la variable  $x$  al ángulo eléctrico  $\psi$ , que asocian un sector del polinomio de Tchebyscheff al intervalo  $[0, 2\pi]$  de  $\psi$ .

## A.2 Agrupamientos planares Tchebyscheff.

Los agrupamientos planares Tchebyscheff tienen una propiedad importante de ofrecer lóbulos laterales de igual magnitud en todas las direcciones de su diagrama de radiación. Son óptimos en el sentido de que para un nivel de lóbulos laterales especificado tienen el ancho de haz el más estrecho posible, y para un ancho de haz específico producen el menor nivel de lóbulos laterales. Sin embargo, cuando el número de elementos llega a ser grande sufren una saturación en la directividad [Tseng and Cheng, 1968].

De acuerdo con [Kabalan, 2002], el factor de agrupamiento de un agrupamiento planar de  $L \times L$  elementos idénticos, está dado por las siguientes expresiones:

$$F(u, v) = 4 \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N I_{mn} \cos(2m-1) \cdot u \cdot \cos(2n-1) \cdot v \quad L = 2N \quad (57)$$

$$F(u, v) = \sum_{m=1}^{N+1} \sum_{n=1}^{N+1} \varepsilon_m \varepsilon_n I_{mn} \cos(2m-1) \cdot u \cdot \cos(2n-1) \cdot v \quad L = 2N + 1 \quad (58)$$

donde  $I_{mn}$ ,  $\varepsilon_{mn}$  representan las excitaciones y las perturbaciones de los elementos respectivamente.

$$u = \frac{\pi d}{\lambda} (\text{sen } \theta \cos \phi - \text{sen } \theta_0 \cos \phi_0) \quad (59)$$

$$v = \frac{\pi d}{\lambda} (\text{sen } \theta \text{ sen } \phi - \text{sen } \theta_0 \cos \phi_0) \quad (60)$$

Para el diseño de agrupamientos planares Tchebyscheff en (58) se obtiene el factor de agrupamiento como un producto de dos polinomios Tchebyscheff de grado  $L-1$ , el cual se muestra a continuación [Kabalan, 2002]:

$$F(u, v) = \frac{1}{R} T_{L-1}(w_0 \cos u) T_{L-1}(w_0 \cos v) \quad (61)$$

La expresión anterior reduce la síntesis de un agrupamiento planar en dos agrupamientos lineales Tchebyscheff. En orden de obtener un diagrama de radiación Tchebyscheff en cualquier dirección, la expresión (61) puede ser reemplazada por un solo polinomio [Tseng and Cheng, 1968]:

$$F(u, v) = \frac{1}{R} T_{L-1}(w_0 \cos u \cos v) \quad (62)$$


---

Ahora para este caso haciendo uso de la expresión (55), los polinomios de Tchebyscheff en función de un agrupamiento planar se encuentran relacionados de la siguiente forma:

$$T_{L-1}(w) = \begin{cases} \cosh[(L-1)\cosh^{-1} w] & w > 1 \\ \cos[(L-1)\cos^{-1} w] & w \leq 1 \end{cases} \quad (63)$$

donde

$$w = w_0 \cos u \cos v \quad (64)$$

$R$  es la razón del lóbulo principal al nivel de lóbulos laterales,  $w_0$  representa el parámetro de control del nivel de lóbulos laterales deseado, por lo tanto, es obtenido por medio de la ecuación (65):

$$w_0 = \cosh\left[\frac{1}{L-1} \cosh^{-1}(R)\right] \quad (65)$$