

2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN DE CÁLCULOS Y COSTOS DE ENLACES SATELITALES CON ESTACIONES VSAT EN LAS BANDAS Ku Y Ka

T E S I S

Que para obtener el Título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P r e s e n t a n

VICTOR ALTAMIRANO GUERRERO

ALFONSO MALPICA MAURY

CÉSAR LEONARDO ORDÓÑEZ ROMERO

DIRECTOR DE TESIS: DR. RODOLFO NERI VELA

Noviembre del 2001



14/11/01



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**COMPARACIÓN DE CÁLCULOS
Y COSTOS DE ENLACES
SATELITALES CON
ESTACIONES VSAT EN LAS
BANDAS Ku Y Ka**

Dedicatorias

A mi padre, por todo el amor y el apoyo brindado durante todo el camino para alcanzar una de las más grandes metas de mi vida, la cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir; por todos los buenos consejos, ya que sin ellos no hubiera sido posible construir las bases que permitieron que esto fuera posible; por el ánimo que me inculcaste a superarme cada día y por el excelente ejemplo que siempre nos diste a mí y a mis hermanos. Creo que sabes lo importante que eres para mí, y tal vez no existen palabras para agradecerte todo lo que me has dado, sólo puedo decirte: Muchísimas Gracias Papá.

A mi madre, por haberme brindado desde pequeño el camino a seguir para poder lograr esto, por los regaños a tiempo, ya que me sirvieron de ejemplo y seguir por la línea correcta. Gracias Mamá.

A mis hermanos, Javier gracias por todos los momentos que pasamos juntos, ya que fueron etapas muy importantes en mi vida; Arianna gracias por ser tan sincera y decirme las cosas tal como son, ya que siempre han sido importantes; Gaby gracias por ser como eres, a pesar de que eres la más pequeña eres digna de admiración. Gracias a todos por confiar en mí, ya que eso siempre fue un aliciente.

A Eunise, por haberte encontrado en el camino, por haber luchado siempre por nuestro amor, y sobretodo porque en los momentos difíciles nunca doblaste las manos, confiaste en mí y no permitiste que esto se acabará. Además, por enseñarme a que no todo es trabajo y escuela, por quererme y amarme tanto, por ser parte de mí, y principalmente por darme la oportunidad de que formemos una familia, vamos a tener un bebé, y aunque todavía no está con nosotros es muy importante para los dos, es un gran aliento por luchar y luchar. Muchísimas Gracias Amor y a ti también bebetin.

A mi abuelita Jovita, gracias por haberme dado todos tus consejos, por cuidarme, por preocuparte y sobretodo por darme tu apoyo.

A mis tíos, tías, primos, primas y a toda la familia porque siempre de alguna forma me brindaron su apoyo.

A todos mis amigos, por su apoyo y compañía, siempre estuvieron presentes. Por sus consejos, pero sobre todo por todos los momentos buenos y malos que pasamos juntos, ya que los verdaderos amigos están en todo momento.

A Alfonso y a César por su dedicación y el empeño mostrado, pero sobretodo por su amistad, por su paciencia y por todos los momentos que pasamos juntos, por formar un excelente equipo de trabajo. Además, espero logremos las metas que cada uno se ha propuesto para así alcanzar el éxito.

A la máxima casa de estudios "Universidad Nacional Autónoma de México", por haberme brindado la oportunidad de formarme en sus aulas, ya que esta educación de excelencia me abrirá las puertas para crecer profesionalmente. Muchísimas Gracias.

Victor Altamirano Guerrero

Dedicatorias

A quienes estuvieron conmigo desde el principio, de manera incondicional y brindándome todo lo que tuvieron. A ti Papá, a ti Mamá, que me enseñaron todo lo que sé, que me dieron los conocimientos más valiosos de mi vida, que me brindaron todo su apoyo, que me impulsaron mas no empujaron, que me enseñaron a detectar mis errores y ayudarme de ellos para superarme. Pero, más que nada gracias por su amor y ejemplo, pues eso siempre perdurará en nosotros sus hijos, quienes intentaremos llevarlo a sus nietos y demás generaciones.

A ustedes hermanos, que siempre estuvieron a mi lado para poder apoyarme en ustedes, por brindarme su ejemplo y experiencias. Gracias por lo que me dieron, me dan y me seguirán dando.

A mis tías Quica y Oli, que aunque no estuvieron a mi lado físicamente sé que sus espíritus siempre me acompañaron; además, sé que desde allá arriba me ven y me cuidan. Su imagen siempre estará conmigo y mi amor por ustedes será eterno.

A mi madrina por su sabiduría compartida y por la gran confianza que siempre me ha tenido.

A mi tía Bertha por sus consejos y por ayudarme a mantener vivo el recuerdo de los que ya no están con nosotros junto con las grandes aportaciones que han hecho en mi vida.

A todos mis tíos y tías que de alguna manera me han ayudado a encontrar mi camino y seguirlo con disposición y confianza.

A Nydía, por creer en mi, en mi amor y en cada uno de mis sentimientos, pero más que nada por sentir lo mismo hacia mí. Tal vez no sientas tu aportación en todo esto, pero tu eres mi inspiración y por lo tanto en cada una de las cosas que hago estás tú, con tu amor, comprensión, fidelidad, belleza, confianza, sencillez, complicidad, gracia, ternura, fortaleza, inteligencia, apoyo y con todo lo que te hace tan única; que me han ayudado a conocer mi propósito en la vida y que los sueños se pueden hacer realidad. Gracias por existir, pero sobretodo gracias por existir junto conmigo.

A todos mis amigos, pues sin su apoyo y sin su compañía esto no sólo hubiera sido difícil sino pesado. Gracias por su incondicional amistad, por estar conmigo en las buenas y en las malas, pues con ello vivirán en mi corazón y memoria eternamente.

A César y a Víctor por su amistad, compañerismo y complicidad en cada una de las cosas que hicimos juntos, y les agradezco de una vez por todo lo que nos falta por hacer.

A mi segunda casa, la U.N.A.M., que me formó, además de que me ayudó a ver lo valiosa que es la educación universitaria. Siempre le estaré agradecido.

Alfonso Malpica Maury

Dedicatorias

A Dios, por haberme dado la oportunidad de nacer en esta familia y en este país.

A mi hermano Miguelin por su compañía, amor y apoyo que me ha brindado toda la vida.

A mis abuelos Lucila Cruz Herrero (Abuelita Lucy), Lauro Romero Lechuga (Abuelito Salvo), Samuel Ordóñez Estrada (Abuelito Shamuel), a su memoria y por que seguramente están muy orgullosos de mí, y a mi abuela Betty por todos sus rezos.

A mis padres que siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas, gracias Papa, gracias Mama los quiero muchísimo, son lo máximo.

A mis tíos por su ejemplo, especialmente a mis tías Anita y Ely por todo su cariño, a mi tío Nacho por su apoyo, y a mi tío Héctor, a quien siempre he considerado como mi segundo padre, gracias.

A mis padrinos por todo su cariño.

A mis todos mis primos, y en especial a Lety por su cariño, a Tomy por su compañía, Lucero por los estímulos recibidos, a Julio, Raul y Toño , por nuestras interesantes platicas, a Primi, Ramon,y Candy por su afecto, gracias a todos por su cariño e inspiración.

A mis amigos por su amistad y apoyo, gracias Sergio, Beto (Chup), Gaby, Alex, Cris, Fabi, Bruno, Roberto, Mauricio, Canek , Ely (Ivich), Marisela, Alex Ayestaran y a todos con los que he pasado momentos agradables.

A mis compañeros de tesis, Alfonso y Víctor, por fin terminamos amigos.

A mis profesores por todas sus enseñanzas y por su amistad, en especial al Dr. Rodolfo Neri Vela, al Ing. Marco Aurelio Torres H, al Dr. Oleksander Martynyuk, al Ing. Rolando Peralta y al Ing. Erick Castañeda de Isla Puga y a toda la gente que me ayudo a culminar mi carrera universitaria, gracias.

Y muy especialmente a mi universidad por haberme dado todo sin esperar nada a cambio, por darme la oportunidad de recibir la mejor educación del país, por hacerme sentir una inmensa alegría de pertenecer a ella y sobre todo por darme una conciencia critica que me acompañara por el resto de mis días. "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU", Gracias UNAM.

César Leonardo Ordóñez Romero.

AGRADECIMIENTOS

Gracias...

A Dios por regalarnos la vida, pues sin ella no habiéramos gozado esta experiencia y tampoco podríamos continuar con nuestro camino.

A nuestra universidad por abrirnos sus puertas. Pero principalmente por permitirnos permanecer en ella y por brindarnos todos los conocimientos que ahora tenemos. Le debemos gran parte de lo que somos y de lo que seremos.

Dr. Rodolfo Neri por la fe que tuvo en nosotros, por brindarnos sus conocimientos, por su paciencia, por su esfuerzo, por sus consejos, por su comprensión, por su confianza, pero sobretodo por darnos la oportunidad de trabajar a su lado.

Dr. Salvador Landeros por sus conocimientos compartidos, por la paciencia y por dedicarnos tiempo cada vez que necesitamos de sus consejos.

Ing. Delfina Reyes por darnos su apoyo, por su confianza y por abrirnos las puertas de Satmex.

Dr. Miguel Moctezuma por su amistad, por sus consejos y apoyo durante toda la carrera.

Dr. Oleksander Martynyuk por ayudarnos a aclarar lo difícil, por prestarnos su tiempo y por regalarnos un poco de su gran sabiduría.

Ing. Rolando Peralta por ser nuestro profesor, pero antes nuestro amigo, por abrirnos los ojos ante el mundo y por enseñarnos lo que la Ingeniería significa.

Ing. Erick Castañeda por su amistad, por su trato amable y sincero desde tempranos semestre en la carrera.

Ing. Mario Ibarra por sus pláticas y anécdotas, por su ayuda en los asuntos complicados y por siempre regalarnos una sonrisa o una broma al encontrarlo.

División de Educación Continua por abrirnos sus puertas en el Diplomado Internacional en Telecomunicaciones que fue de gran ayuda para construir esta tesis.

Mireya Fernández por siempre aclarar nuestras dudas y trámites, pero sobretodo por ser tan amable y sencilla con nosotros.

Ing. Jesús Reyes por siempre estar cuando lo necesitamos, pero antes que nada por su paciencia a lo largo de los semestres.

Ing. Marco A. Torres H. por compartirnos su visión tan amplia y vasta de la vida, que nos ayudó a descubrir la realidad y no espantarnos por ella, sino hacerle frente.

Beatriz Delgado y María del Rocío Muñiz por ayudarnos en todo lo que necesitábamos, por sus amigables sonrisas que siempre nos hacían volver para pedirles más ayuda.

Ing. Rodolfo Arias por su amistad y consejos, pues siempre estuvo a nuestro lado, en situaciones serias y las que no lo eran tanto.

Ing. Eduardo Carrasco por su amistad y compañerismo, durante y después de la carrera.

Sra. Rosario por sus amenas pláticas durante nuestras esperas y por ayudarnos en lo que estaba en sus manos.

A cada uno de los profesores de la Facultad por sus conocimientos y por ayudarnos a convertirnos en lo que ahora somos.

A nuestros compañeros, que se convirtieron en nuestros amigos, pues a su lado conocimos lo maravillosa que es la vida universitaria.

ÍNDICE

PRÓLOGO.....	1
CAPÍTULO 1	
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESTACIONES VSAT.....	3
1.1 DEFINICIÓN DE VSAT.....	3
1.2 TIPOS DE REDES VSAT.....	3
1.2.1 Estrella.....	3
1.2.2 Malla.....	4
1.2.3 Modalidades de operación en las redes.....	5
SCPC.....	5
MCPC.....	5
1.3 USAT (ULTRA SMALL APERTURE TERMINAL).....	6
1.4 ELEMENTOS DE UNA VSAT.....	6
1.4.1 Unidad Exterior.....	6
1.4.2 Unidad Interior.....	7
1.5 TIPOS DE ACCESO MÚLTIPLE.....	7
1.5.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA).....	7
1.5.2 Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA).....	8
1.5.3 Acceso Múltiple por División de Código (CDMA).....	10
1.5.4 Métodos de Acceso Múltiple Aleatorio por División de Tiempo (ALOHA).....	13
1.5.5 Asignación Fija (FA) y Asignación por Demanda (DA).....	15
Asignación Fija.....	15
Asignación por Demanda.....	16
1.6 CODIFICACIÓN Y DECODIFICACIÓN.....	18
1.6.1 Petición Automática de repetición (ARQ).....	18
1.6.2 Corrección de errores sin canal de retorno (FEC).....	18
1.7 TIPOS DE MODULACIÓN.....	19
1.7.1 Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK).....	20
1.7.2 Demodulación BPSK.....	21
1.7.3 Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK).....	22
1.7.4 Demodulación QPSK.....	22
1.7.5 Ancho de banda en las señales BPSK y QPSK.....	23
1.7.6 BER en modulación PSK.....	23
1.7.7 Modulación Delta.....	25
Modulación Delta Lineal.....	25
Modulación Delta Adaptiva.....	26
1.8 BANDAS UTILIZADAS.....	27
1.9 TASA DE TRANSMISIÓN Y BER'S TÍPICOS.....	30
1.10 INTERFERENCIAS.....	30
1.10.1 Interferencia Propia del sistema.....	31
Interferencia co-canal (CCI).....	31
Interferencia por canal adyacente (ACI).....	32
1.10.2 Interferencia Externa al sistema.....	33
Interferencia de un sistema satelital adyacente.....	33
Interferencia de Enlace Ascendente.....	34

Estaciones maestras	62
Estaciones esclavas	62
3.2 HPA.....	63
3.2.1 Banda Ku.....	63
Estaciones maestras	63
Estaciones esclavas	64
3.2.2 Banda Ka.....	66
Estaciones maestras	66
Estaciones esclavas	66
3.3 LNA	67
3.3.1 Banda Ku.....	67
3.3.2 Banda Ka.....	68
3.4 DEMODULADORES.....	69
Nota.....	73
Referencias.....	74

CAPÍTULO 4

TRANSPONEDORES EN LAS BANDAS KU Y KA.....	75
4.1 HOTBIRD6.....	75
4.1.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku.....	76
4.1.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka.....	77
4.1.3 Huellas de PIRE y G/T del satélite en la banda Ku.....	78
4.1.4 Huellas de PIRE y G/T del satélite en la banda Ka.....	79
4.2 DFS3 KOPERNIKUS.....	79
4.2.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku.....	80
4.2.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka.....	81
4.2.3 Huella de PIRE en la banda Ku.....	81
4.3 ITALSAT2.....	82
4.3.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka.....	82
4.3.2 Huellas de PIRE del satélite en la banda Ka.....	82
4.4 SATMEX 5.....	83
4.4.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku.....	83
4.4.2 Huellas de PIRE del satélite en la banda Ku.....	85
4.5 ANIK F2.....	86
4.5.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku.....	86
4.5.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka.....	86
Transpondedores con linealizadores.....	87
4.5.3 Ubicación de los haces de cobertura de la banda Ka.....	88
4.6 KOREASAT 3.....	88
4.6.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku.....	88
4.6.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka.....	89
4.6.3 Huellas de PIRE en la banda Ku.....	89
4.7 SELECCIÓN DEL SATÉLITE.....	90
4.7.1 Huellas de PIRE y G/T del satélite en la banda Ku.....	91
4.7.2 Huellas de PIRE y G/T del satélite en la banda Ka.....	92
4.7.3 Características de los transpondedores utilizados.....	92
Referencias.....	94

Datos de la estación esclava.....	137
Parámetros para el cálculo de atenuación por lluvia.....	138
Datos del satélite.....	138
Datos del satélite.....	139
Graficas de las relaciones portadora a ruido.....	140
Tabla de resultados.....	141
Descripción del equipo seleccionado.....	141
7.5.2 Actualización del Programa.....	142
Actualización de Antenas.....	142
Actualización de HPA's.....	143
Actualización de LNA's.....	144
Actualización de MODEM's.....	144
7.5.3 Código Fuente del programa.....	145

CAPÍTULO 8

RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	147
8.1 RESULTADOS DEL PROBLEMA PROPUESTO.....	147
8.1.1 Gráficas de relación portadora a ruido.....	147
8.1.2 Equipo seleccionado.....	151
8.1.3 Características del equipo.....	152
8.1.4 Costo unitario por estación.....	155
8.2 EL COSTO EN BASE A DIFERENTES PARÁMETROS.....	156
8.3 CONCLUSIONES.....	157

APÉNDICE

CÓDIGO FUENTE.....	159
---------------------------	------------

Prólogo

La banda de frecuencias Ku se encuentra saturada, lo que exige la migración a otras bandas superiores de frecuencias. La banda más próxima a ésta es la Ka, por lo que conviene hacer un estudio de viabilidad para la implementación de ésta. En algunos países se han hecho proyectos experimentales que buscaban encontrar bases sólidas y confiables para empezar a utilizar comercialmente estas frecuencias en servicios satelitales.

Los resultados que arrojaron los proyectos tales como el ACTS y DFS3 Kopernikus, han tenido como consecuencia el nuevo desarrollo de satélites comerciales que utilizan la banda ka en sus transpondedores. Satélites como Italsat 1 y 2, Hotbird 6, Koreasat 3 y ANIK F2, por mencionar algunos. Además, el proyecto ANIK F2 tiene como propósito principal llevar la Internet y servicios de banda ancha (tales como: Comercio electrónico, videoconferencias, telemedicina, televisión directa al hogar, etc.) a localidades donde las redes terrestres no tienen acceso; lo cual define las aplicaciones principales que se buscan distribuir por medio de la banda Ka, pues con su gran ancho de banda es posible llevar esto a la realidad.

La tendencia actual es seguir buscando frecuencias más altas que se encuentren disponibles, para así prever la saturación que se pueda presentar en las bandas utilizadas hoy en día. Por ejemplo, el satélite ANIK F2 estará provisto de un sistema experimental que operará una señal de prueba en la banda V (40.390 GHz), para así estudiar la propagación de las señales en estas frecuencias, lo que significa hacer modelos de predicción sobre las anomalías que pudiera presentar ésta. Haciendo estas mediciones en diferentes lugares, se crearán herramientas efectivas para mitigar los efectos debidos a la lluvia en dicha banda, para tener una antesala de su empleo en sistemas satelitales de banda ancha.

Desafortunadamente, en nuestro país por el momento no se tiene prevista la implementación de la banda Ka, ya que el nuevo satélite Satmex 6 no la tiene contemplada. Esto posiblemente se debe a que es una tecnología poco estudiada, que apenas se está implementando en países de alto desarrollo tecnológico.

Por lo tanto, esta tesis busca en la medida de lo posible aclarar y justificar la viabilidad de implementar la banda Ka en México, basándonos en una simulación de enlaces satelitales en las bandas Ku y Ka para estaciones satelitales VSAT, y así después hacer una comparación de los enlaces y los costos con los resultados obtenidos para cada banda.

Esta comparación se realizará en base a los resultados obtenidos después de utilizar la variedad de equipos existentes en el mercado en ambas bandas, así como también, buscaremos utilizar un satélite virtual que cuente con transpondedores en ambas bandas y tenga cobertura en el territorio mexicano. Los cálculos se harán bajo las peores condiciones climatológicas que podamos encontrar en nuestro país, para con esto garantizar el funcionamiento del equipo propuesto en todo el territorio nacional.

CAPÍTULO 1

Características generales de las estaciones VSAT

1.1 Definición de VSAT

Una VSAT (**V**ery **S**mall **A**perture **T**erminal*) es una estación terrena de Servicio Fijo por Satélite (geoestacionario) que opera como terminal dentro de una red de información, la cual es utilizada para una gran variedad de aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones.

Las redes VSAT se definen como redes privadas bidireccionales de comunicación de datos vía satélite, para el intercambio punto-punto y punto-multipunto (broadcasting) de voz, video y datos.

1.2 Tipos de redes VSAT

1.2.1 Estrella

La Estrella es el tipo más común de red VSAT (Figura 1.1), la cual depende de la operación de una Estación Terrena Maestra (HUB) para la retransmisión de información. Las terminales dentro de este tipo de red VSAT no pueden establecer comunicación entre ellas, debido a que se comunican en forma exclusiva con el HUB, utilizando generalmente transmisiones "en ráfaga" y protocolos de contención para minimizar el ancho de banda necesario. El diámetro de la antena de la estación terrena VSAT en general oscila entre 0.9 m y 2.4 m, aunque este parámetro varía de acuerdo a la frecuencia de operación del sistema. [MARAL95]

* Terminal de Muy Pequeña Apertura

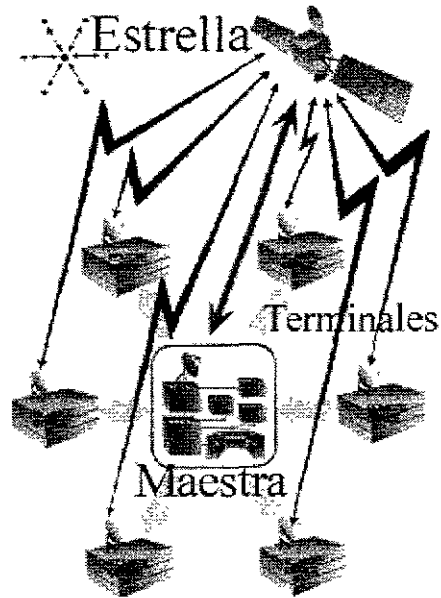


Figura 1.1 Configuración Estrella de una red VSAT.

1.2.2 Malla

La configuración malla (figura 1.2) es un tipo de red VSAT no tan popular, donde las terminales comparten el mismo grupo de frecuencias y pueden recibir directamente las transmisiones entre sí. Debido a los mayores requerimientos de potencia, generalmente se utilizan antenas parabólicas de mayor diámetro (de 2.4 m o más). [MARAL95]

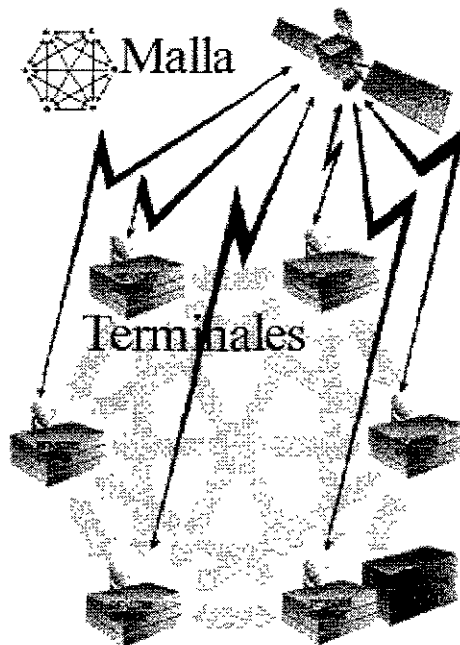


Figura 1.2 Configuración Malla de una red VSAT.

1.2.3 Modalidades de operación en las redes.

Existen dos modalidades de operación en las redes VSAT, las cuales son: SCPC* Y MCPC*. Estas son indiferentes al tipo de red (estrella o malla) en cuestión.

SCPC

El tipo de sistema SCPC, se caracteriza por contener un solo canal sobre una señal portadora; cuyo ancho de banda modulado es variable según el tipo de información y protección, y es transmitida continua o interrumpidamente. (*asignación de frecuencia exclusiva, fija o por demanda*) (figura 1.3).

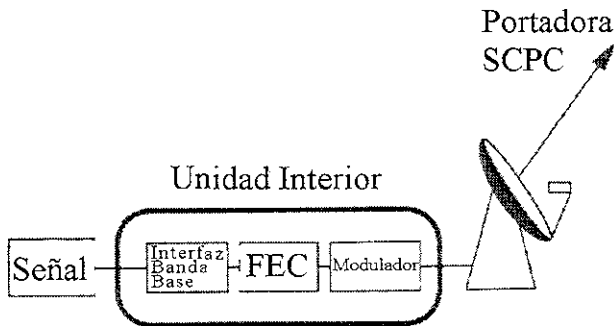


Figura 1.3 Canal Único Por Portadora

MCPC

Este sistema se caracteriza por la utilización de una misma portadora para diferentes canales. Cada canal es multiplexado en el tiempo antes de ser transmitido por la estación terrena. Es necesario señalar que los canales son independientes entre sí (figura 1.4).

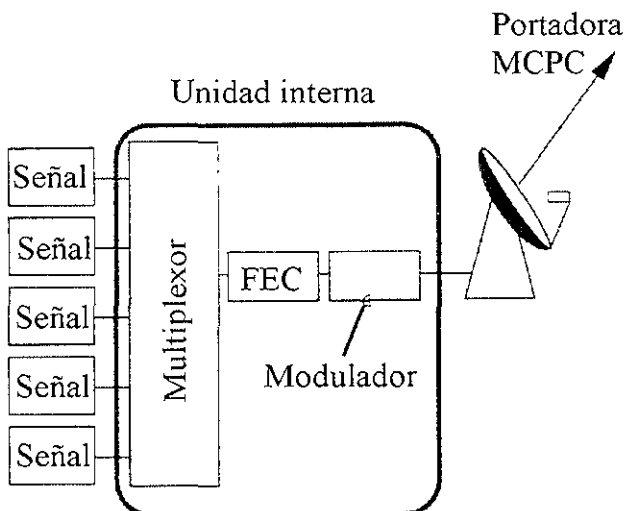


Figura 1.4 Múltiple Canal Por Portadora.

* Single Channel Per Carrier

* Multiple Channel Per Carrier

1.3 USAT* (Ultra Small Aperture Terminal)

Es el tipo de terminal VSAT más reciente. Utiliza antenas más pequeñas (de menos de 1 m de diámetro) tecnología altamente integrada para permitir el acceso a bajo costo a la red. Las USAT operan en red de configuración en estrella y requieren una Estación Terrena Maestra (HUB). Generalmente se usa la técnica de *espectro expandido*† aún dentro de las bandas Ku y Ka para reducir la interferencia. [ROS99]

1.4 Elementos de una VSAT

Una estación VSAT está compuesta por dos bloques principales (figura 1.5):

- Unidad Exterior (*Outdoor Unit*), que es la interfaz entre el satélite y la VSAT.
- Unidad Interior (*Indoor Unit*), que es la interfaz entre la VSAT y la terminal de usuario o LAN‡.

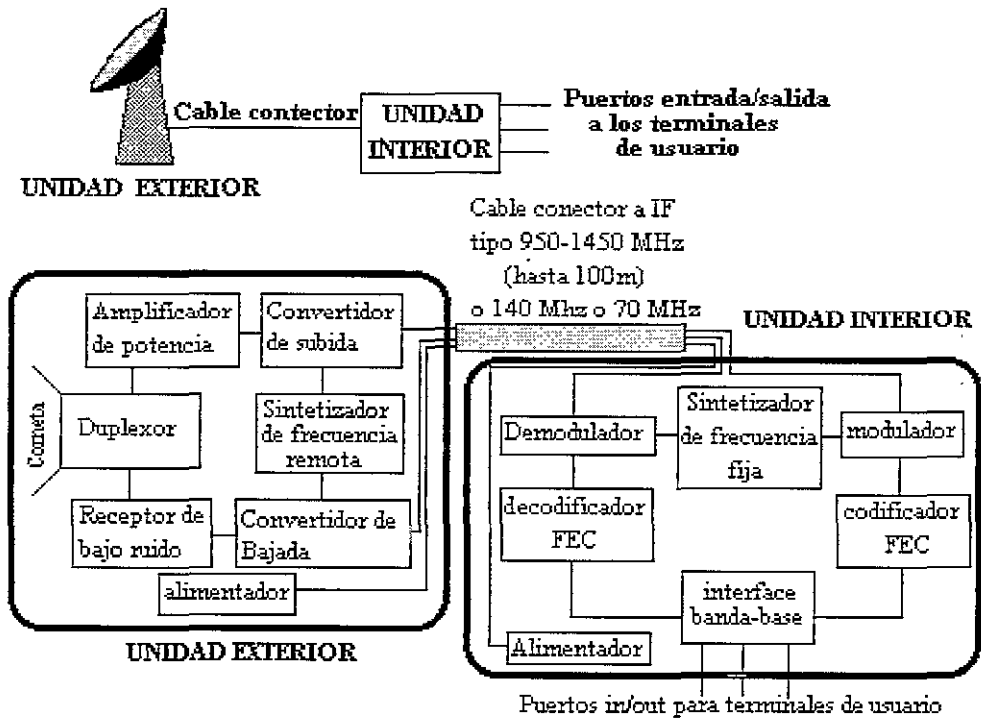


Figura 1.5 Elementos de una terminal VSAT.

1.4.1 Unidad Exterior

Básicamente se compone de los siguientes elementos:

- Antena.
- Amplificador de potencia (HPA).

* Algunos autores manejan el término de USAT como las terminales diseñadas para operar en la banda de frecuencias Ka

† Técnica de modulación en la cual la energía de la señal es expandida sobre un ancho de banda mucho más amplio que el requerido para la transmisión.

‡ Local Area Network

- Amplificador de bajo ruido (LNA).
- Sintetizador de frecuencia.
- Osciladores
- Duplexor.

Los parámetros utilizados para evaluar a la *Unidad Exterior* son:

- La anchura espectral del transmisor y del receptor para el ajuste de la portadora en la transmisión y para sintonizar adecuadamente la portadora en recepción.
- El PIRE^{*}.
 - ♦ Ganancia de la antena en transmisión.
 - ♦ Potencia de salida.
- Figura de mérito $\frac{G}{T}$ que condiciona la calidad del enlace de bajada.
 - ♦ Ganancia de la antena en recepción.
 - ♦ Temperatura de ruido del receptor.
 - ♦ El patrón de radiación de la antena.

1.4.2 Unidad Interior

Se compone de los siguientes elementos:

- Modulador
- Demodulador.
- Sintetizador de frecuencia fija
- Codificador
- Decodificador

Los parámetros necesarios para especificar a la Unidad Interior son:

- Número de puertos.
- Velocidad de los puertos. Es la máxima velocidad (*bps*[†]) del flujo de datos entre la terminal de usuario y la unidad interior de VSAT en un puerto dado.

1.5 Tipos de Acceso Múltiple

1.5.1 Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA[‡])

En esta técnica de acceso cada estación terrena tiene asignado un ancho de banda dentro del transpondedor[§] entre frecuencias específicas. La capacidad total del satélite se divide en varios transpondedores. Típicamente el ancho de banda de un transpondedor varía entre 27 y 110 MHz, aunque el más común es de 36 MHz. Este ancho de banda se distribuye, en partes asignadas a clientes específicos y sus estaciones terrenas.

Cada asignación tiene un uso exclusivo de su ancho de banda. La potencia de las señales debe ser balanceada para que una señal con exceso de potencia no interfiera con señales débiles en la vecindad de

^{*} Potencia Isotópica Radiada Efectiva

[†] Bits Per Second / Bits Por Segundo

[‡] Frequency Division Multiple Access

[§] Un transpondedor recibe una señal proveniente de un estación terrena en una frecuencia dada, la amplifica y la retransmite en otra frecuencia

las frecuencias. FDMA utiliza equipos sencillos en las estaciones terrenas pero está limitado por el nivel de amplificación de potencia requerido por el satélite para manipular múltiples portadoras simultáneamente.

Si varias portadoras van a ser transmitidas a través de un transpondedor al mismo tiempo (figura 1.6), éstas deben estar en frecuencias distintas, evitando cualquier traslape entre los anchos de banda de cada una de ellas.

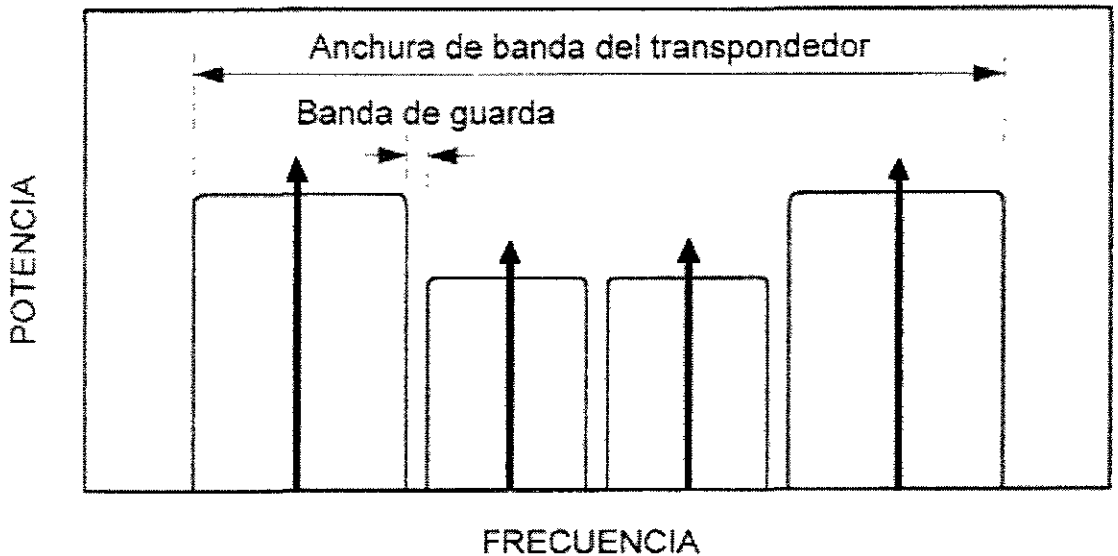


Figura 1.6 Distribución de portadoras y bandas de guarda en la técnica FDMA.

Regularmente las portadoras requieren diferentes potencias y anchos de banda; cada portadora tiene sus propios requerimientos de calidad. Además varios PIRE's son necesarios para ajustarse a los diferentes tamaños de las estaciones terrenas y transferencia de información.

Un amplificador puede producir ruido de intermodulación al operar con varias portadoras al mismo tiempo, por lo que es operado con cierto *back-off* de salida, además de que se utilizan segmentos de frecuencias libres de señal entre los anchos de banda utilizados, a los cuales se les conoce como *bandas de guarda* (figura 1.6).

Existen varios tipos de FDMA; uno es el fijo, ¿pero qué pasa si los usuarios no desean utilizar todo el tiempo su ancho de banda asignado? Esto sería un desperdicio; por esto surge el acceso múltiple por división de frecuencia con asignación por demanda o DAMA* (véase la Pág. 14).

1.5.2 Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA†).

En esta técnica el tiempo se divide en ranuras que ocupan la totalidad del ancho de banda asignado dentro de un transpondedor. Un inconveniente es que requiere sincronía entre todas las terminales conectadas a la red. A diferencia de usar división de frecuencia en un transpondedor, en esta técnica es posible comparti

* Demand Assignment Multiple Access

† Time Division Multiple Access.

por tiempos (*time slots o ranuras de tiempo*) el ancho de banda entero cuando se utiliza todo el transpondedor. En el amplificador de potencia del satélite está presente solamente una señal en cualquier momento. Cada estación terrena perteneciente a una red que tenga asignado un transpondedor toma su turno (figura 1.7), el cual es previamente acordado entre los usuarios. Cabe señalar que en ocasiones el ancho de banda del transpondedor no se utiliza en su totalidad, puesto que puede ser repartido entre las diferentes técnicas de acceso múltiple.

Una ventaja de TDMA es que el transpondedor puede operar cerca de su punto de saturación. El total de potencia de salida puede ser usado debido a que solamente una portadora está utilizando el amplificador de potencia. En esta técnica no hay problema con el ruido de intermodulación entre dos diferentes portadoras; esto incrementa el uso del PIRE del satélite y de la relación portadora a densidad de ruido a sus máximos valores en el enlace de bajada.

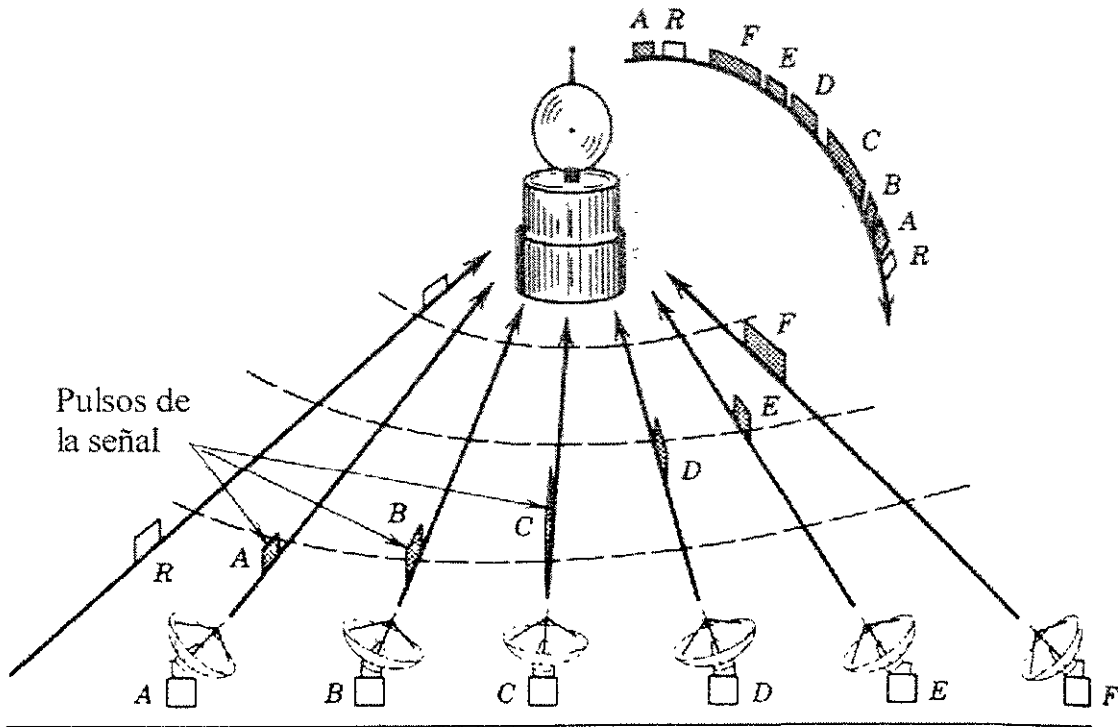


Figura 1.7 Distribución de las ranuras de tiempo para una red que utiliza TDMA.

TDMA es un sistema flexible y puede acomodar las variaciones de tráfico entre las estaciones incrementando o disminuyendo la duración del flujo de tráfico de cada una de las estaciones; de esta manera, en cuanto una estación termina, otra toma la oportunidad de transmitir.

El acceso múltiple por división en el tiempo o TDMA es una técnica totalmente digital mediante la cual varias estaciones terrenas acceden u ocupan un transpondedor o parte de él. A diferencia del acceso múltiple por división en frecuencia, en donde cada estación transmisora tiene asignada una ranura de frecuencias dentro del transpondedor, normalmente con un ancho de banda diferente, en esta nueva técnica todo un grupo de estaciones tiene asignada la misma ranura, con cierto ancho de banda fijo, y se comparte entre ellas secuencialmente en el tiempo; es decir, cada estación tiene asignado un tiempo T para transmitir lo que guste dentro de la ranura, y cuando su tiempo se agota debe dejar de transmitir para que lo hagan las estaciones que le siguen en la secuencia, hasta que le toque nuevamente su turno. El tiempo T asignado a cada estación no es necesariamente igual en todos los casos, puesto que algunas estaciones conducen más tráfico que otras y, por lo tanto, la ranura de tiempo que se les asigne debe ser más larga

que la de las estaciones chicas. Estos tiempos asignados pueden ser fijos por estación, en cuyo caso se tiene acceso múltiple por división en el tiempo con asignación fija, o bien pueden variar con el tiempo cuando algunas estaciones tengan exceso de tráfico (horas pico). En estas condiciones, es preciso reorganizar la distribución de los tiempos con una nueva estructura de marco o trama de transmisión, dándole ranuras de tiempo más largas a las estaciones con exceso de tráfico y ranuras más cortas a las de poco tráfico; la nueva estructura de marco se repite secuencialmente hasta que haya necesidad de hacer otro cambio. Hay varios métodos para cambiar los marcos de transmisión según la demanda, pero la más común es mediante un programa establecido con base en las estadísticas de tráfico. En cualquiera de los casos anteriores, la duración usual de un marco o ciclo es de unos cuantos milisegundos y se requiere contar con un mecanismo confiable de sincronización, para que no haya traslapes entre las transmisiones de las diversas estaciones.

Un sistema TDMA es más complejo que uno de FDMA y necesita una buena coordinación entre todas las estaciones terrenas de la red que lo usan y una estación de referencia; además, como las estaciones transmiten en forma de ráfaga a intervalos con duración de una pequeña fracción de milisegundo, debe contar con módulos de almacenamiento de información digital, que funcionan como memorias con amortiguamiento y que van liberando la información por paquetes en cada ráfaga. Una de las grandes ventajas de esta técnica es que durante cada ranura de tiempo se pueden transmitir en forma multiplexada digitalmente, y por paquetes, porciones de canales telefónicos, de datos y hasta de video sobre la misma portadora de la ráfaga. Cuando en TDMA se ocupa el transpondedor completo una sola portadora está presente en cada instante dentro del amplificador de potencia del transpondedor, por lo que no se genera ruido de intermodulación y se puede aprovechar al máximo la potencia de salida.

Existe una ligera modificación a la técnica TDMA que se llama TDMA con conmutación en el satélite, se realiza con satélites de varias antenas de haz pincel, diseñadas para cubrir diferentes zonas geográficas con muy alta densidad de potencia; cada haz está asociado con ciertos receptores y transmisores y es posible conmutar parte de la información o toda de un haz a otro mediante una matriz de microondas. Este versátil sistema es digital, con acceso múltiple TDMA; se denomina acceso múltiple por división en el tiempo con conmutación en el satélite o SS⁺/TDMA, esta técnica incrementa significativamente la eficiencia de un sistema, puesto que se logra la cobertura total de un gran territorio dividido en zonas con haces de potencia altamente concentrada, en vez de hacerlo con un solo haz común de baja densidad de potencia por unidad de área. [PRATT93]

1.5.3 Acceso Múltiple por División de Código (CDMA[†]).

Además de las técnicas de acceso múltiple FDMA y TDMA, que son las de mayor uso en los satélites comerciales de comunicaciones, existe una tercera alternativa en la que un transpondedor completo es ocupado por varias estaciones que transmiten a la misma frecuencia y al mismo tiempo (figura 1.8). Esta técnica, denominada acceso múltiple por división de código o CDMA, y que aparentemente resulta imposible, es particularmente útil en transmisiones confidenciales o altamente sensitivas a la interferencia. Al igual que TDMA, es totalmente digital, y presenta la ventaja de que las antenas terrenas transmisoras y receptoras pueden ser muy pequeñas, sin importar que sus ganancias sean bajas y sus haces de radiación muy amplios. Por otra parte, presenta el inconveniente de que ocupa mucho ancho de banda (un transpondedor completo), pues cada bit de información como los que se transmiten en modalidad TDMA se transforma en un nuevo tren de bits muy largo, de acuerdo con un código determinado previamente. Cada estación transmisora utiliza una secuencia diferente de bits para codificar cada uno de los bits de información (figura 1.9); de las estaciones terrenas receptoras, sólo la destinataria de cierta información determinada conoce el código con el que se transmitió y es capaz de reconstruir el mensaje original (figura

* Satellite Switched

† Code Division Multiple Access.

1.10), aunque llegue superpuesto con todos los demás mensajes que se transmitieron simultáneamente, pues estos últimos sólo los detecta como "ruido" tolerable. En virtud de que el ancho de banda que utiliza este sistema de CDMA es muy amplio, por la expansión del espectro en frecuencia de la señal al codificar cada bit de información en un nuevo tren de bits, también se le denomina acceso múltiple con espectro expandido o SSMA*. [PRATT93]

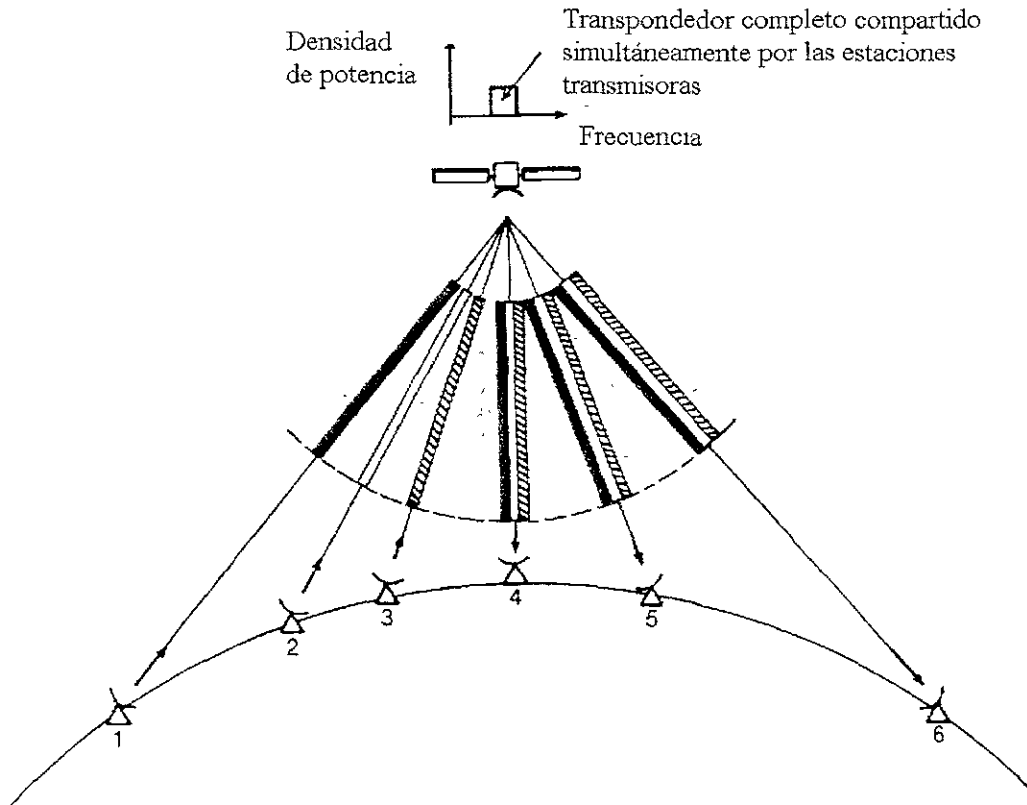


Figura 1.8 Estaciones terrenas usando CDMA, todas transmiten en la misma frecuencia y utilizando todo el ancho de banda disponible pero con diferente código pseudoaleatorio.

De esta manera cada estación transmite usando un único código pseudoaleatorio, lo cual da como características, la privacidad, la tolerancia a la interferencia, la habilidad para operar con razones portadora a ruido negativas, dando como resultado estaciones terrenas poco complejas y de bajo costo.

* Spread Spectrum Multiple Access

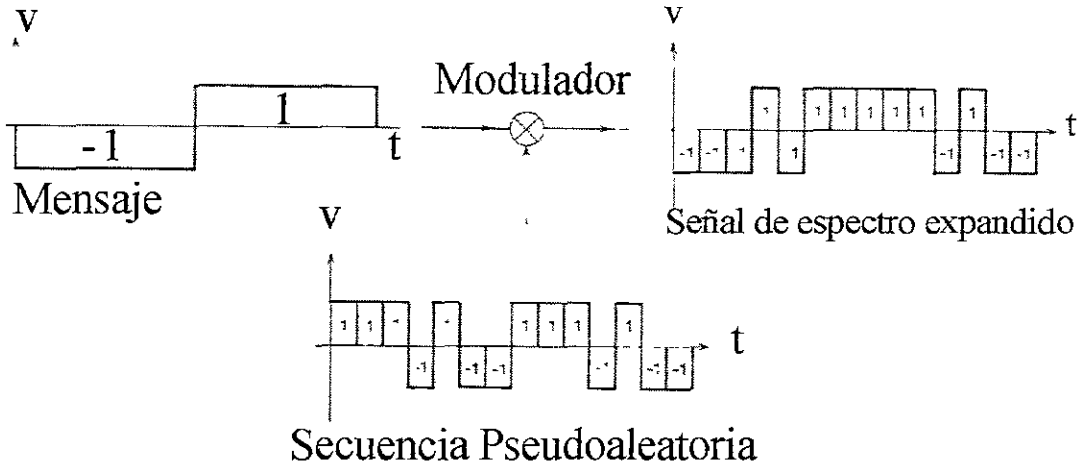


Figura 1.9 Mensaje alterado por la secuencia pseudoaleatoria

El método básico para transmitir espectro expandido incluye largos códigos de ruido pseudoaleatorios (PN) en tasas de Mbits/seg. Este código es llamado chip y es modulado por la información. La tasa $R_{\text{chip}} / R_{\text{data}}$ es llamada ganancia de procesamiento, típicamente tiene valores de 100:1 a 1000:1. [TOM94]

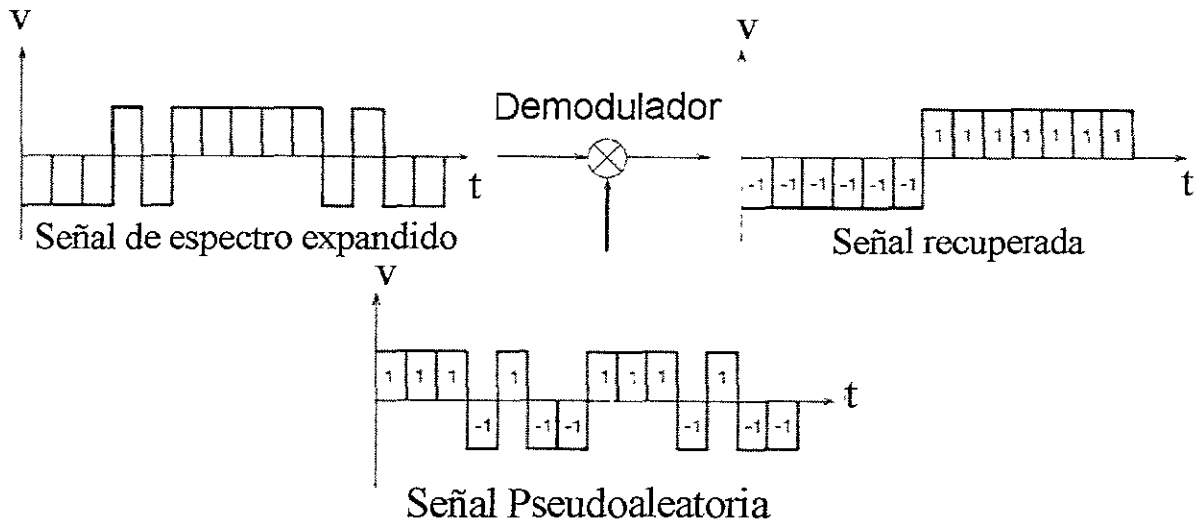


Figura 1.10 Mensaje recuperado de la multiplicación de la señal de espectro expandido con la secuencia pseudoaleatoria.

El hecho de que muchos canales CDMA puedan coexistir, si son ortogonales entre sí, provoca que sean muy usados en equipos portátiles de comunicación satelital ya que las antenas con un ancho del haz grande no es problema para las interferencias.

1.5.4 Métodos de Acceso Múltiple Aleatorio por División de Tiempo (ALOHA)

Este método permite a estaciones terrenas pequeñas y baratas comunicarse con un mínimo de protocolos y sin supervisión de la red. Trabaja más o menos como el TDMA, pero en este caso no existe una estación de control maestra que proporcione la organización y los arreglos de tiempo (figura 1.11).

Cuando una estación ALOHA tiene algo que transmitir inmediatamente manda unos pulsos de aviso, y revisa el enlace de bajada para verificar la transmisión. Si ve algo distinto en la bajada sabe que alguien está transmitiendo y espera un momento (tiempo aleatorio) y prueba de nuevo; obviamente el tiempo de espera no es posible determinarlo ya que existen más estaciones que podrían querer transmitir al mismo tiempo.

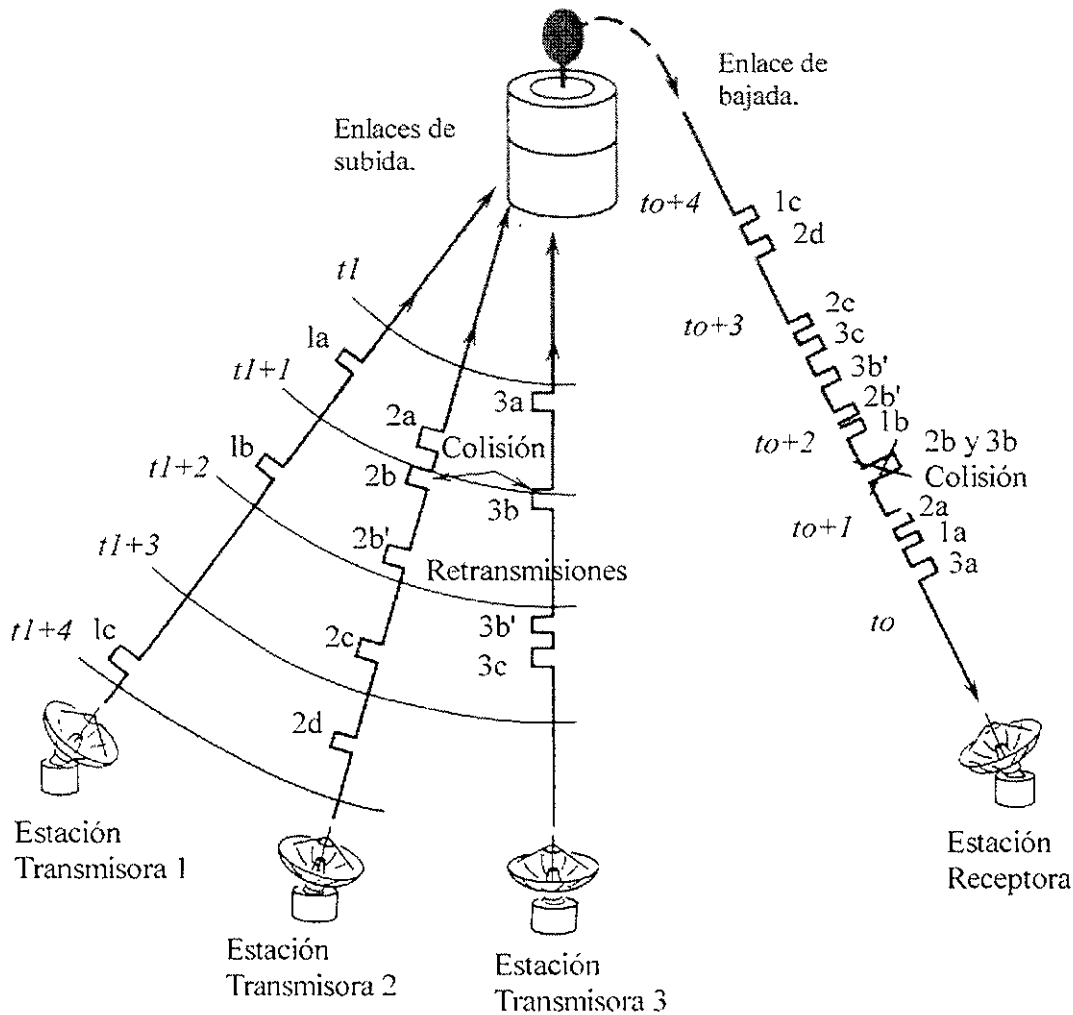


Figura 1.11 Enlaces de subida y bajada para una red VSAT que utiliza ALOHA.

El acceso a un transpondedor por las estaciones de una red se realiza en forma de contienda por el uso de cada portadora, y puede no haber un control centralizado de asignación permanente o temporal, o puede haber una forma simple de autocontrol de cada estación individualmente. Esta técnica de acceso proporciona alta eficiencia en el uso de la capacidad que requiere de un transpondedor y es adecuada para redes en que este factor no sea fundamental, pudiendo operar hasta en un sólo canal con la anchura de banda que utiliza una sola estación al transmitir. Es útil especialmente para redes VSAT interactivas en que el tráfico medio por estación sea muy bajo y en forma de paquetes, particularmente si son tolerantes a retardos de algunos segundos en recibir un mensaje o la respuesta a un mensaje, debido a que puede requerirse retransmisiones automáticas de los paquetes que son más numerosas durante los picos de tráfico. En estas condiciones, una red en estrella de 1000 estaciones puede requerir solo una o pocas portadoras de entrada a una estación maestra o principal, de relativamente baja capacidad, con un costo bajo de la capacidad satelital y con un costo de inversión menor que utilizando DAMA* para el mismo servicio. Por ejemplo, es adecuada para transacciones de autorización de crédito en terminales en sitios de ventas, o para la recolección de información de una red meteorológica.

En un sistema RA† puro cada estación terrena transmite ráfagas de bits de información en cualquier momento que ocasionalmente pueden interferirse con las de las otras dificultando su recepción, por no contarse como en los sistemas CDMA con un código para extraer la información útil de entre el ruido representado por la interferencia. En algunos casos cada estación puede recibir su propia señal con el tiempo de retraso de la propagación (por supuesto trasladada por el repetidor del satélite) y compararla con la original para determinar si existe una colisión con la señal de otra estación. Si existe colisión se pierde el paquete de información y se retransmite la ráfaga en la misma forma hasta un número n de veces con un tiempo de retardo generalmente aleatorio, pero después de 0.27 segundos de la primera transmisión en el caso de satélites geoestacionarios. También es posible que la estación receptora transmita un acusado de recibo de cada paquete recibido correctamente, si se trata de una estación maestra que por otro canal preasignado (no en RA) transmite paquetes de información constantemente a todas las demás estaciones denominadas remotas o secundarias, por lo que no contribuye por este procedimiento a aumentar el número de colisiones. Al aumentar el número de estaciones con tráfico, o el número de ráfagas por estación, aumenta la probabilidad de que exista colisión en el primer intento de transmitir un determinado paquete de información y al repetir su transmisión se congestiona más el canal, llegando a un punto de operación en que se reduce el número total de paquetes transmitidos exitosamente por unidad de tiempo que es proporcional al tiempo efectivo de utilización del canal.

El desempeño de un sistema de acceso aleatorio como el ALOHA permite un máximo de 18.4% de utilización total de la capacidad del canal. El sistema ALOHA ranurado (RA/TDMA) es más complejo, ya que en lugar de que la transmisión de los paquetes se realice en cualquier momento, se establecen ranuras de tiempo, pero sin preasignación para cada estación, por lo que cualquier estación puede ocupar cualquier ranura. Cada estación puede transmitir sólo al empezar el intervalo de una ranura de tiempo, requiriéndose cierta sincronización con las demás, por lo que es una técnica que disminuye lo aleatorio de las emisiones. En esta forma, no existen colisiones parciales, es decir, las ráfagas llegan a su destino sin interferencia o son interferidas totalmente por otra ráfaga, lográndose una capacidad máxima de utilización de 36.8%, es decir, el doble que en el sistema puro.

* Demand Assignment Multiple Access

† Random Access

1.5.5 Asignación Fija (FA^{*}) y Asignación por Demanda (DA[†])

En las técnicas de acceso TDMA y FDMA se pueden emplear distintas asignaciones tanto de ranuras de tiempo como de frecuencia, respectivamente. Las asignaciones son: fija y por demanda. Cabe mencionar que en CDMA no se hacen asignaciones debido a que en esta técnica no se definen ranuras de tiempo ni de frecuencia.

Asignación Fija

En este tipo de acceso los recursos del satélite son compartidos en una forma determinada entre todas las estaciones, sin importar la demanda de tráfico. Es posible que en un determinado momento el tráfico dentro de la VSAT sea mayor que la capacidad para la cual fue diseñada o que el acomodo no pueda realizarse como está determinado. Así pues, la VSAT debe aceptar o rechazar la demanda de tráfico, lo que significa un incremento en el retraso y produce el bloqueo de llamadas, esto a pesar de que la VSAT pueda tener capacidad para determinado exceso. Por lo tanto, la red no puede ser explotada óptimamente.

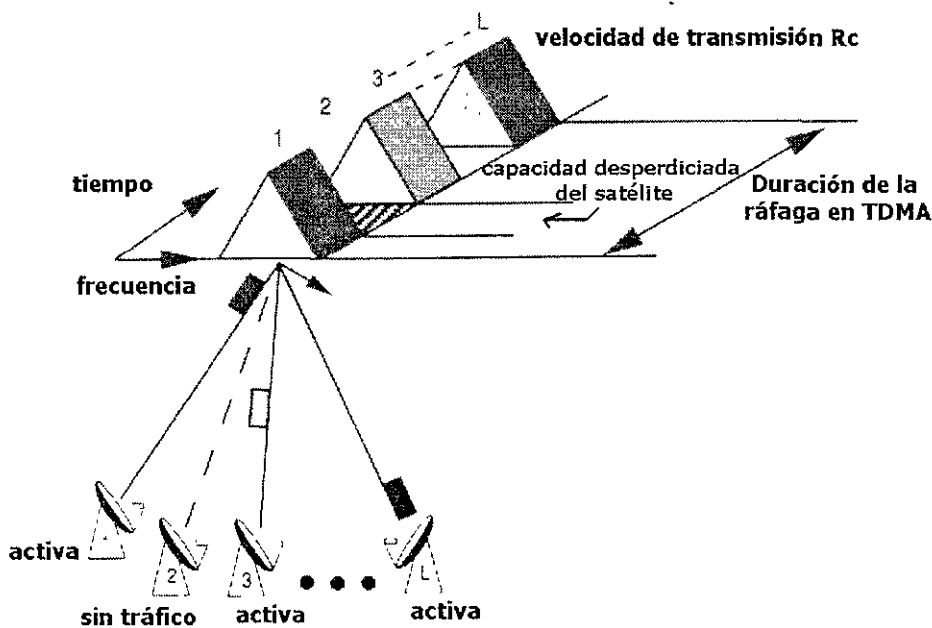


Figura 1.12 Asignación Fija por tiempo

FA tiene la ventaja de que es simple, además de que no tiene bloqueos o pérdida de tiempo en espera para la asignación de una portadora. Sin embargo, la capacidad de la red VSAT es pobremente utilizada si la demanda de tráfico es variable (figura 1.13). [MARAL95]

* Fixed Assignment

† Demand Assignment

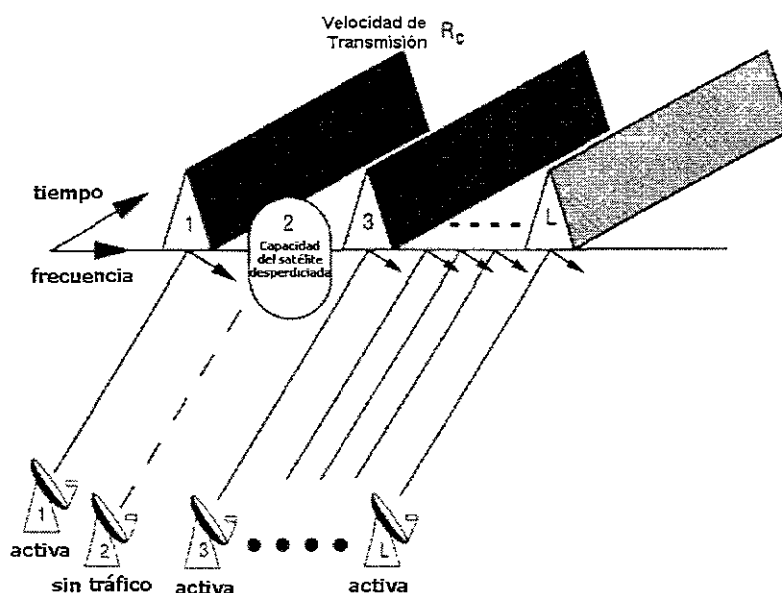


Figura 1.13 Desperdicio de ancho de banda cuando se usa asignación fija.

El bloqueo de llamadas puede ocurrir en una terminal dentro de la red, cuando algunas estaciones quieren establecer comunicación con otras estaciones al mismo tiempo, pues el número de peticiones puede sobrepasar la capacidad de la VSAT.

Asignación por Demanda

La técnica de acceso múltiple DAMA permite aprovechar al máximo las ranuras de frecuencia y la potencia del satélite cuando el tráfico que genera cada estación es esporádico, pues las ranuras se asignan a las estaciones terrenas solamente durante el tiempo que las necesitan para establecer comunicación; en el momento en que alguna deja de transmitir, esa ranura se libera y queda disponible para cualquiera otra de las estaciones del sistema que la solicite temporalmente (figura 1.14). Cuando minutos u horas después, la estación terrena que liberó una ranura quiera transmitir más información, podría darse el caso de que la ranura de frecuencia que usó previamente dentro del amplificador esté ocupada en ese instante por la señal de otra estación; pero puede haber otras ranuras vacías en ese momento, y de ser éste el caso, la estación terrena en cuestión podría utilizar cualquiera de ellas. Es decir, la frecuencia de la portadora transmitida por cada estación terrena cambia en el tiempo, moviéndose de lugar en el espectro radioeléctrico del amplificador y, por supuesto, la estación debe estar debidamente equipada para hacerlo. Desde luego que la ocupación de cualquier ranura vacía no se puede hacer en forma arbitraria, sino a través de una estación central que coordina el banco de frecuencias disponibles. Cada vez que una estación terrena desee iniciar una transmisión, debe solicitarle antes al banco de frecuencias que le asigne una de ellas para su portadora; este mismo banco de frecuencias se comunica con el punto de destino para informarle que se le va a transmitir y en qué frecuencia debe sintonizarse para que reciba la señal; solamente hasta que la estación transmisora y la receptora hayan recibido la asignación de sus frecuencias de operación, se puede iniciar el enlace.

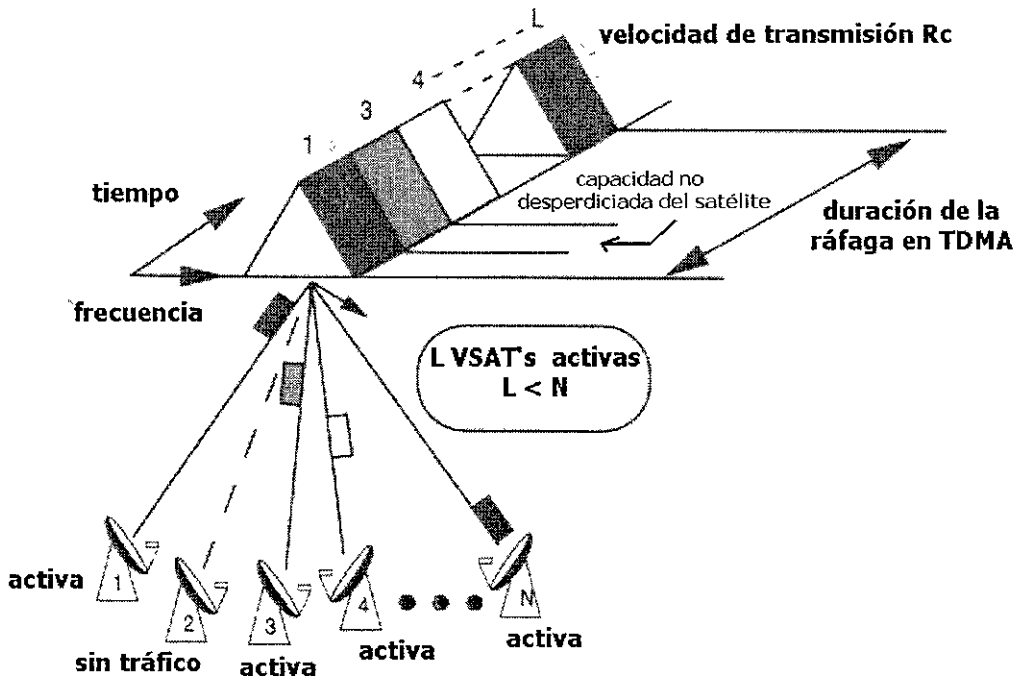


Figura 1.14 Asignación por demanda en tiempo.

Existen muchas variantes en cuanto a la forma de ranurar en frecuencia un transpondedor y accederlo u ocuparlo desde varias estaciones terrenas. Como norma general SCPC o con asignación por demanda se utiliza para comunicar puntos con tráfico esporádico, y para comunicar zonas con tráfico permanente se emplea la asignación fija. [MARAL95]

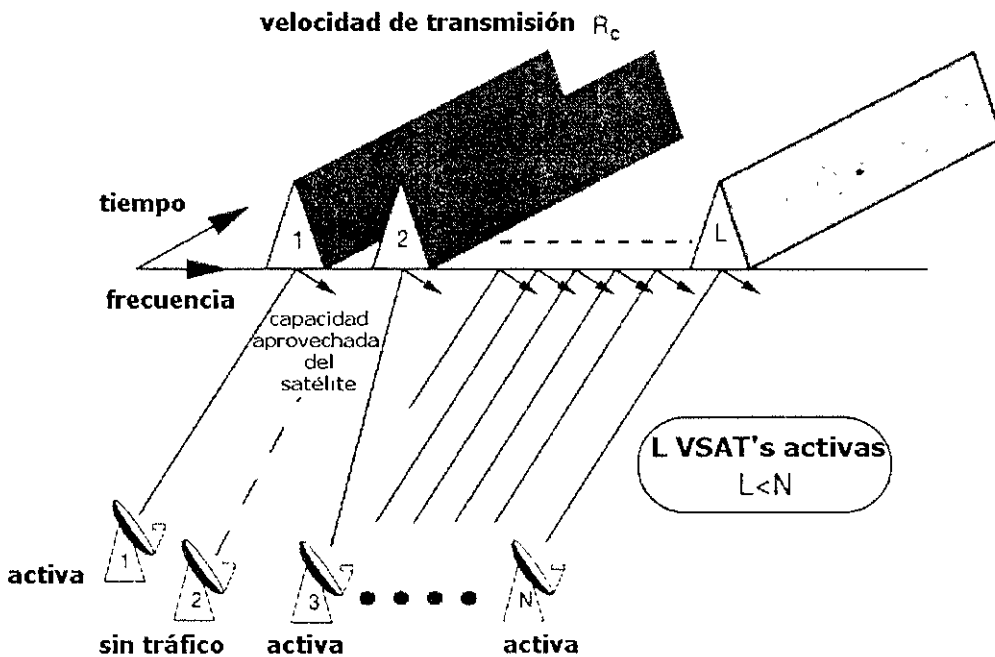


Figura 1.15 Asignación por Demanda en Frecuencia.

1.6 Codificación y Decodificación.

La calidad de la comunicación es de suma importancia, por lo que es necesario reducir la proporción de bits erróneos. Esto puede lograrse incrementando la potencia de la portadora como forma de aumentar la relación señal a ruido, pero esto requiere el uso de antenas de dimensiones inconvenientes y de alto costo o contar con la opción de transpondedores de mayor potencia.

Un método alternativo que permite obtener mejores resultados consiste en aplicar codificación para la detección y corrección de errores, añadiendo bits de control a los de información antes de la modulación, aunque obliga a utilizar un mayor ancho de banda o a reducir la velocidad binaria de información, evita reducir la necesidad de incrementar la potencia transmitida. Esta solución es muy útil en las aplicaciones en las que la potencia está limitada, como en las redes VSAT.

La parte de decodificación resulta más complicada que la de codificación, debido a que se utilizan algoritmos algebraicos o algoritmos probabilísticos. Los algoritmos algebraicos se basan en las propiedades algebraicas empleadas en la codificación, por lo que su aplicación es reducida. Y los probabilísticos no toman en cuenta la estructura del código, lo que los hace aplicables a casi cualquier código.

Existen dos clases de control de errores: la petición automática de repetición en caso de detectarse errores (ARQ*) y la corrección de errores sin canal de retorno (FEC†).

1.6.1 Petición Automática de repetición (ARQ)

La ARQ emplea un código de detección de errores que debe complementarse con un canal de retorno para solicitar la repetición de los bloques que se reciben con error. En la detección de errores se emplean varios métodos como: la verificación de paridad (par o impar), la violación de código y la verificación cíclica de redundancia. [ROS99]

Una desventaja de este método es la necesidad de contar con una memoria transitoria de amortiguamiento para almacenar los bloques con error y subsecuentes hasta que sean retransmitidos. Así, esta técnica solo es útil para la comunicación por satélites geoestacionarios a bajas velocidades binarias, ya que para cualquier señal de alta velocidad binaria el retardo de las señales obliga a almacenar temporalmente una cantidad inconveniente de bits y se agrega un mayor retraso.

1.6.2 Corrección de errores sin canal de retorno (FEC)

La codificación FEC permite corregir en el lugar de destino una proporción determinada de errores sin necesidad de retransmisión. Este método se basa en códigos de bloques y códigos de desarrollo continuo que agregan bits a los de información antes de la modulación. En la estación receptora, después de la demodulación se utiliza la redundancia proporcionada por los bits de control para corregir ciertas configuraciones de error. Este es el método más popular en las comunicaciones satelitales [ROS99].

* Automatic Repeat reQuest

† Forward Error Correction

1.7 Tipos de Modulación

La modulación es la alteración sistemática de los parámetros de una onda llamada portadora (en inglés se dice "carrier") en función del voltaje instantáneo de otra onda llamada mensaje o moduladora. La portadora es generalmente una onda senoidal teóricamente pura:

$$c(t) = A_c \cos(\omega_c t + \phi) \quad (1-1)$$

El mensaje o señal moduladora es la información que queremos transmitir y nunca tiene una ecuación que la defina. Para fines de análisis matemático y para pruebas de equipos se usa una onda senoidal:

$$m(t) = A_m \cos(\omega_m t) \quad (1-2)$$

En la ecuación de la portadora vemos que hay tres parámetros: La amplitud A_c , la frecuencia o velocidad angular ω_c y la fase ϕ . El mensaje puede influir en uno de ellos, en dos o en los tres al mismo tiempo. Así mismo, cada uno de los tres parámetros puede ser modificado simultáneamente por un mensaje diferente. Todo esto depende de las intenciones del diseñador del equipo.

Otro aspecto importante es que el mensaje hace variar los parámetros de la portadora en forma proporcional. Las variaciones no proporcionales no están prohibidas, pero no se utilizan.

El mensaje puede ser analógico o digital. En el caso de mensaje analógico, el parámetro alterado (amplitud, frecuencia o fase de la portadora) puede tener un número infinito de posibles valores. En el caso de mensaje digital, el parámetro alterado podrá tener tantos valores como niveles de voltaje tenga el mensaje. En la figura 1.16, podemos ver las tres modulaciones analógicas comparadas con las tres modulaciones digitales.

En modulación analógica hay tres variantes, que son *amplitud modulada* (AM), *frecuencia modulada* (FM) y *fase modulada* (PM). En modulación digital hay las mismas tres variantes básicas, que se llaman variación de amplitud por interrupción, variación de frecuencia por interrupción y variación de fase por interrupción. En este caso, por costumbre, se conocen por sus nombres en inglés: *amplitude shift keying* (ASK), *frequency shift keying* (FSK) y *phase shift keying* (PSK).

De todos estos tipos de modulación, el más usado en comunicaciones satelitales es de la modulación por variación de fase (PSK), en sus diferentes variantes BPSK y QPSK. [GORD93]

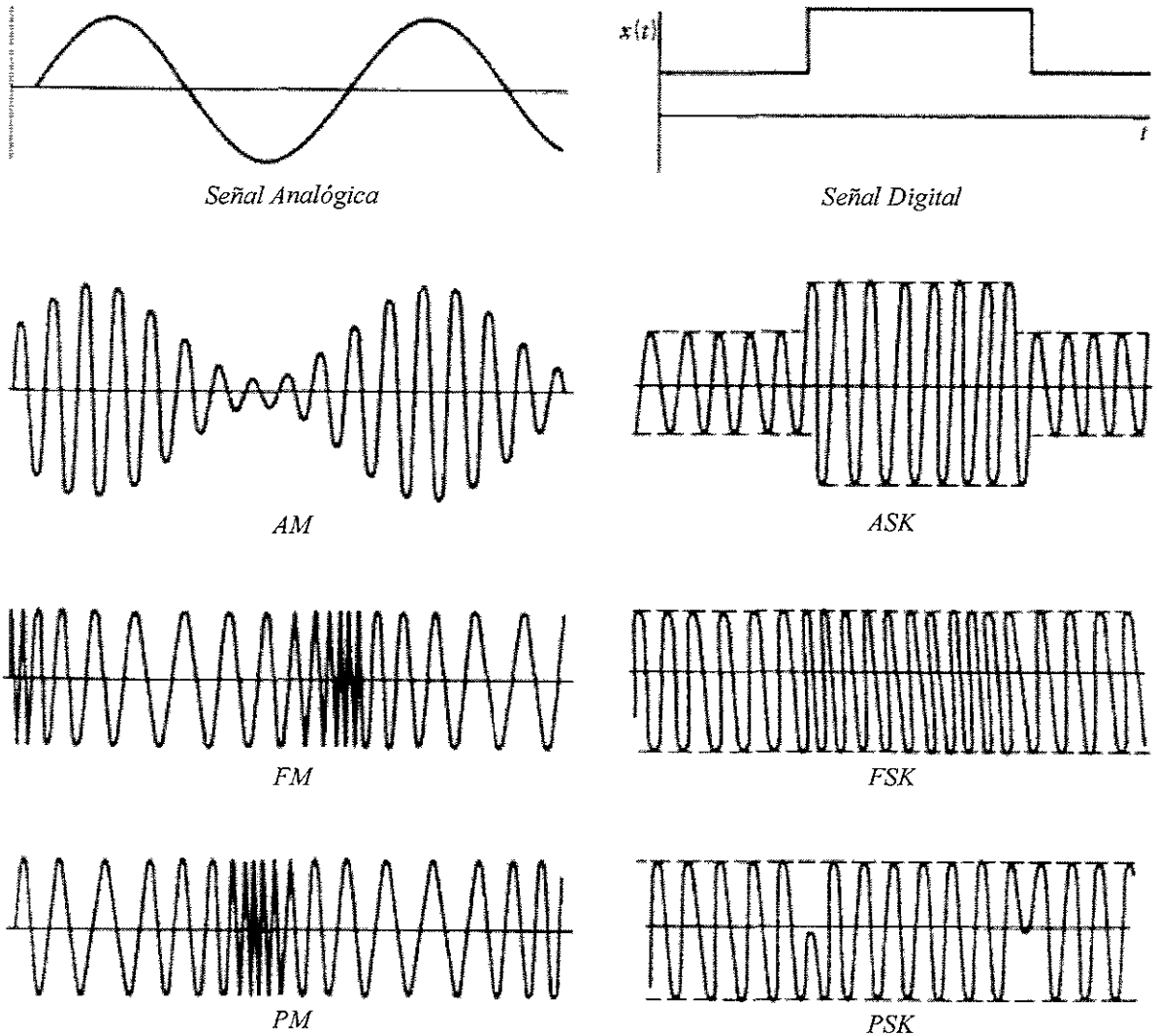


Figura 1.16 Modulaciones Básicas

1.7.1 Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK*)

En la modulación por desplazamiento de fase binaria son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia portadora. Una fase de salida representa un 1 lógico y la otra un 0 lógico. Conforme la señal digital de entrada cambia de valor, la fase de la portadora de salida se desplaza entre dos ángulos que estarán 180° fuera de fase.

* Binary Phase Shift Keying.

En un modulador BPSK la señal portadora, de amplitud constante, se multiplica por los datos binarios. Si $+1$ v se le asigna a un 1 lógico y -1 v a un 0 lógico, la portadora de entrada de forma $\text{sen}(\omega_c t)$ se multiplica ya sea por $+1$, o por -1 . En consecuencia, la señal de salida es $\text{sen}(\omega_c t)$ o $-\text{sen}(\omega_c t)$ (figura 1.17); la primera representa una señal que está en fase, con el oscilador de referencia; la segunda, un señal que está 180° fuera de fase, con el oscilador de referencia. [TOM94]

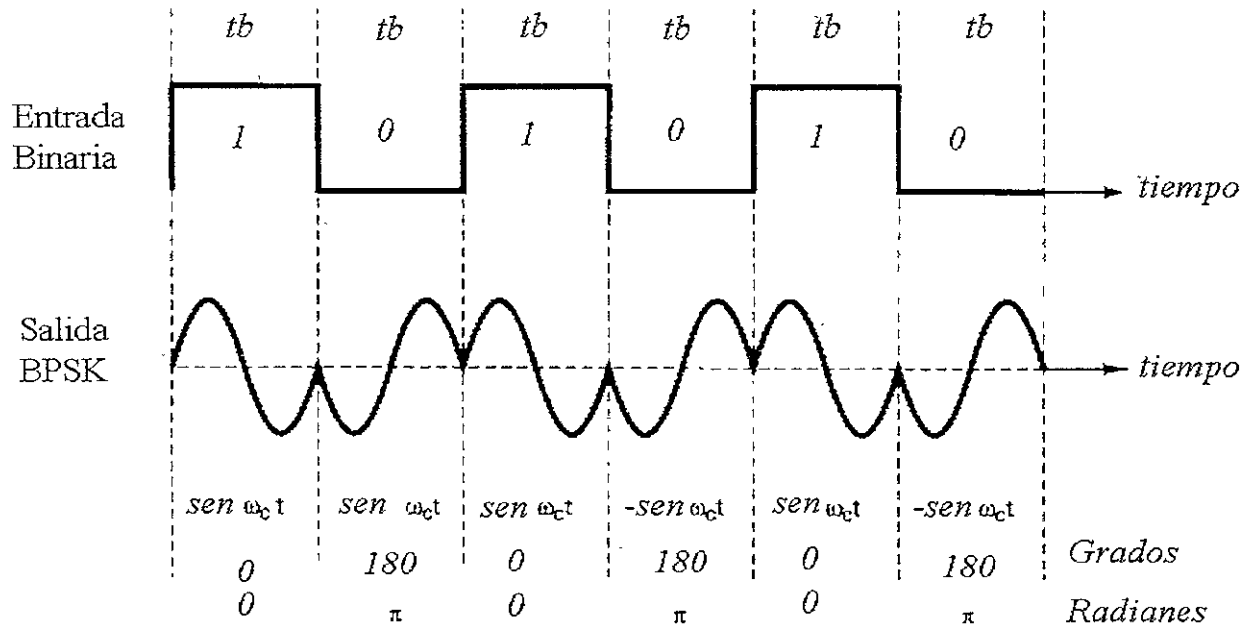


Figura 1.17 Modulación BPSK

1.7.2 Demodulación BPSK.

Para demodular una señal en BPSK $e(t) = p(t) \cos(\omega_0 t)$ donde $p(t)$ es la señal NRZ*, es decir, una secuencia de dos valores fijos $+1$ ó -1 , ésta se multiplica por una réplica de la señal portadora $\cos(\omega_0 t)$. La salida del multiplicador es $p(t) \cos^2(\omega_0 t)$. Esta expresión puede mostrarse, usando una identidad trigonométrica, de la siguiente manera: $p(t) (0.5 + 0.5 \cos 2\omega_0 t)$. Un filtro paso-bajas es usado para remover la segunda componente armónica de la portadora, dejando a la salida la componente de baja frecuencia $0.5 p(t)$, la cual representa la información deseada en el código de línea NRZ. Dado que para realizar esta operación en el extremo receptor es necesaria una réplica de la señal portadora que tenga exactamente la misma fase que la señal portadora original, a este tipo de proceso se le conoce como detección coherente. Además del filtro y del multiplicador, en el demodulador también se encuentran: una sección encargada de recuperar el reloj y un regenerador de pulsos.

* No Return to Zero

1.7.3 Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK*)

La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura, QPSK, es otra forma de modulación digital de amplitud constante. Con QPSK son posibles cuatro fases de salida, para una sola frecuencia de la portadora. Debido a que hay cuatro fases de salida, tiene que haber cuatro condiciones de diferentes de entrada. Ya que la entrada digital de un modulador QPSK es una señal binaria, para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita más de un solo bit en la entrada, por tal motivo se utilizan parejas de bits con las cuales se pueden codificar 4 valores: 00,01,10 y 11. Por tanto, para cada pareja de bits introducidos a un modulador, ocurre un solo cambio a la salida, es decir, la razón de cambio en la salida es la mitad de la presente en la entrada.

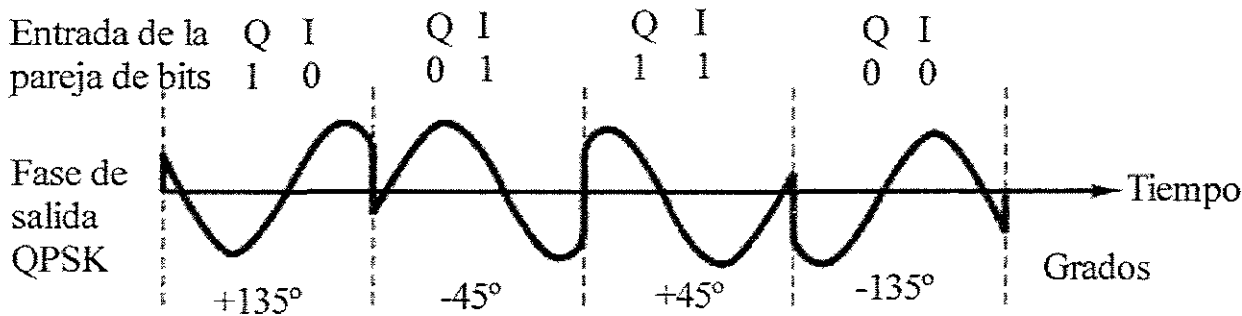


Figura 1.18 Modulación en QPSK

En esencia, un modulador QPSK son dos moduladores, de BPSK, combinados en paralelo, uno de ellos llamado canal I y el otro canal Q, donde el canal I tiene la entrada de uno de los bits de la pareja y de la señal del oscilador local, y el canal Q tiene la entrada del otro bit de la pareja y de una señal desfasada 90° con respecto del oscilador local. De esta manera con los dos valores posibles +1 y -1, tenemos que el canal I tiene a la salida $\text{sen}(\omega_c t)$ o $-\text{sen}(\omega_c t)$ y el canal Q tiene $\text{cos}(\omega_c t)$ o $-\text{cos}(\omega_c t)$; entonces, si la entrada del modulador tenemos 00, tendríamos a la salida: $-\text{sen}(\omega_c t) - \text{cos}(\omega_c t) = 1.414 \text{sen}(\omega_c t - 135^\circ)$. (figura 1.18). [TOM94]

1.7.4 Demodulación QPSK.

Para la demodulación de la señal QPSK se utiliza el mismo principio que en la demodulación BPSK, y que tendríamos un señal modulada de entrada $P_i(t) \cos(\omega_0 t) - P_q(t) \text{sen}(\omega_0 t)$, donde $P_i(t)$ y $P_q(t)$ son las señales de entrada de los canales I y Q del modulador QPSK. Al multiplicarse esta señal por las réplicas de las señales portadoras del canal I y Q, $\cos(\omega_0 t)$ y $\text{sen}(\omega_0 t)$ respectivamente, es fácil ver que a la salida del filtro del canal I tendremos $0.5 P_i(t)$ y a la salida del filtro del canal Q $0.5 P_q(t)$. Estas dos señales son combinadas en un convertidor paralelo serie para obtener así la señal original deseada [RODY96]

* Quaternary Phase Shift Keying.

1.7.5 Ancho de banda en las señales BPSK y QPSK.

En el ancho de banda de la señal BPSK tenemos que el máximo valor ocurre cuando tenemos una secuencia alternada de 1 y 0. La frecuencia de la secuencia alternada es la mitad de su tasa de transmisión. En consecuencia, el ancho de banda BPSK es igual a la tasa de transmisión de los bits de entrada, y dado que los moduladores de señal digital requieren de un filtro de caída senoidal a la salida, se agrega un factor llamado rolloff, ($0 \leq \rho \leq 1$) el cual es un parámetro del filtro que nos permite disminuir el ancho de banda. De esta manera el ancho de banda de la señal BPSK quedaría:

$$BW_{BPSK} = T.T. (1 + \rho) \quad (1-3)$$

Donde T.T. es la tasa de transmisión de la señal digital y ρ es el factor de rolloff.

Como ya se ha dicho, el modulador QPSK es equivalente a dos moduladores BPSK en paralelo, lo cual provoca que a la entrada de cada uno de los moduladores BPSK en paralelo se encuentre una señal con una tasa de transmisión de la mitad de la señal original, lo que resulta en que el ancho de banda de la señal QPSK sea la mitad del ancho de banda de la señal BPSK, por lo tanto:

$$BW_{QPSK} = \frac{(1 + \rho)}{2} T.T. \quad (1-4)$$

El valor conservador típico del factor rolloff es:

$$\rho = 0.5$$

1.7.6 BER* en modulación PSK

El ruido presente en la entrada del receptor puede causar errores en la detección de las señales. El voltaje del ruido se suma al de la señal, fluctuando de manera aleatoria entre valores positivos y negativos, lo cual conduce a que el valor de la muestra de la señal digital más el valor del ruido pueda tener una polaridad opuesta al valor original de la señal. Esto constituye un error en el pulso recibido.

El tipo de ruido más común en enlaces satelitales tiene un espectro de frecuencias plano, lo que significa que la densidad espectral de potencia del ruido, medida en watts por hertz, es constante. La densidad espectral del ruido se denota por N_0 . Cuando los dispositivos de recepción están diseñados para maximizar la relación señal a ruido, la máxima relación señal a ruido de voltajes es igual a $\sqrt{2E_b / N_0}$, donde E_b es el promedio de energía de los bits. El promedio de energía de los bits puede ser calculada conociendo el promedio de potencia recibida P_R y el período de un bit T_b :

$$E_b = P_R T_b \quad (1-5)$$

La probabilidad de que el detector cometa un error como resultado del ruido está dada por:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (1-6)$$

* Bit Error Rate

donde erfc es la función de error complementaria, y sus valores pueden ser obtenidos de tablas. La ecuación (1-6) es válida para el código NRZ polar y las modulaciones BPSK y QPSK. La probabilidad de error de los bits es también relacionada con la tasa de error de los bits (BER). Por ejemplo, una probabilidad de error de 10^{-6} significa un BER de 1 bit erróneo en un millón, en promedio. La figura 1.19 muestra la gráfica de BER contra E_b/N_0 , que corresponde a la función dada por la ecuación (1-6).

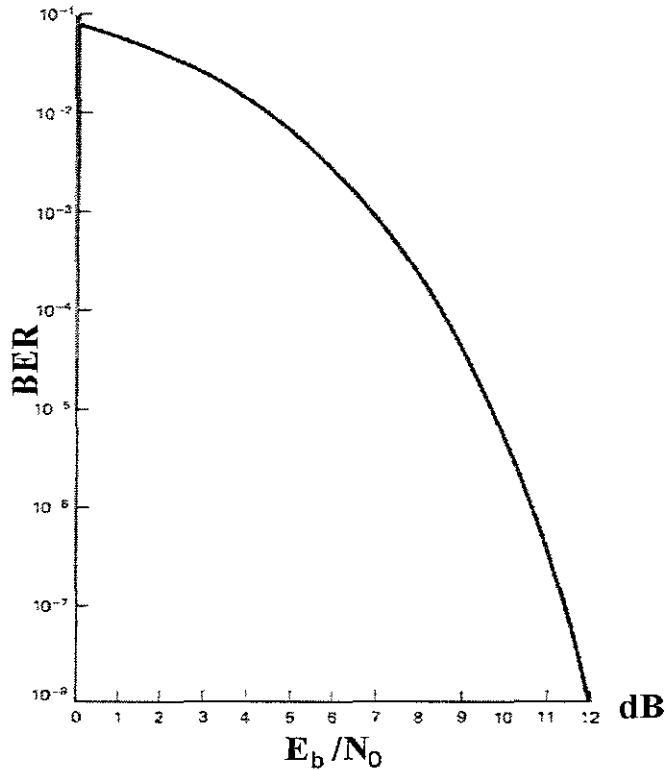


Figura 1.19 Gráfica de la probabilidad de error en el detector en función de la relación energía de bits a densidad ruido

Un importante parámetro para los sistemas de radio es la relación del promedio de la potencia de la portadora con la densidad de potencia de ruido, normalmente denotada por C/N_0 . Las relaciones E_b/N_0 y C/N_0 pueden ser relacionadas de la siguiente manera. Si el promedio de la potencia de la portadora en el receptor es P_R watts, la energía por cada bit es entonces $P_R/T.T.$ joules, con T.T. en bits por segundo. Entonces la energía por bit es:

$$E_b = \frac{P_R}{T.T.} \quad (1-7)$$

Si dividimos los dos miembros de la ecuación anterior por N_0 y sustituyendo a P_R por C , tenemos:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{T.T. N_0} \quad (1-8)$$

Despejando y usando notación en decibeles:

$$\left[\frac{C}{N_0} \right] = \left[\frac{E_b}{N_0} \right]_{dB} + [T.T.]_{dB} \quad [\text{dBHz}] \quad (1-9)$$

Para realizar una comparación entre sistemas que usan codificación y sistemas que no, podemos asumir que el valor de C/N_0 es igual para los dos casos. La tasa de transmisión en la entrada del modulador es $T.T.$ para el mensaje no codificado y, para el mensaje codificado es $T_C.T.$ debido a que n bits de código deben ser transmitidos por cada k número de bits de información. Las tasas de transmisión se relacionan así:

$$\frac{T.T.}{T_C.T.} = r_C \quad (1.10)$$

y dado que siempre $T_C.T. > T.T.$, entonces r_C siempre es menor que 1. Si despejamos y sustituimos en la ecuación (1-7) tenemos que:

$$\frac{E_C}{E_b} = r_C \quad (1.11)$$

por lo tanto si queremos la probabilidad de error de un sistema codificado tendríamos:

$$P_{ec} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{r_C E_b}{N_0}} \right) \quad (1.12)$$

Esto significa que $P_{ec} > P_{eu}$, es decir, la probabilidad de error en el sistema codificado es mayor que en el sistema no codificado. Esto trae como consecuencia que se deba de ampliar el ancho de banda (debido a que se aumenta la tasa de transmisión), pero como éste usualmente es fijo, entonces lo que se debe de aumentar es el tiempo de transmisión. Por ejemplo si tenemos una tasa de transmisión de 1.544 Mbps. Si es aplicado un FEC de 7/8 la tasa de transmisión sería $1.544 \times 8/7 = 1.765$ Mbps [RODY96]

1.7.7 Modulación Delta

Modulación Delta Lineal

Este tipo de modulación consiste en el muestreo de una señal analógica mediante el seguimiento de otra señal constituida por escalones del mismo tamaño y que van aumentando, o disminuyendo en el tiempo (figura 1.20). Por lo general, la frecuencia de muestreo es cuatro veces la frecuencia máxima de la señal, para poder ser más precisos en los valores tomados de la señal analógica. El objetivo es poder codificar la señal analógica mediante el siguiente algoritmo:

- Cuando la señal de muestreo supere en amplitud a la señal analógica se codifica como un “0” lógico y se disminuye un escalón en la señal de muestreo.
- Cuando la señal de muestreo quede por debajo de la señal analógica se codifica como un “1” lógico y se aumenta un escalón en la señal de muestreo.

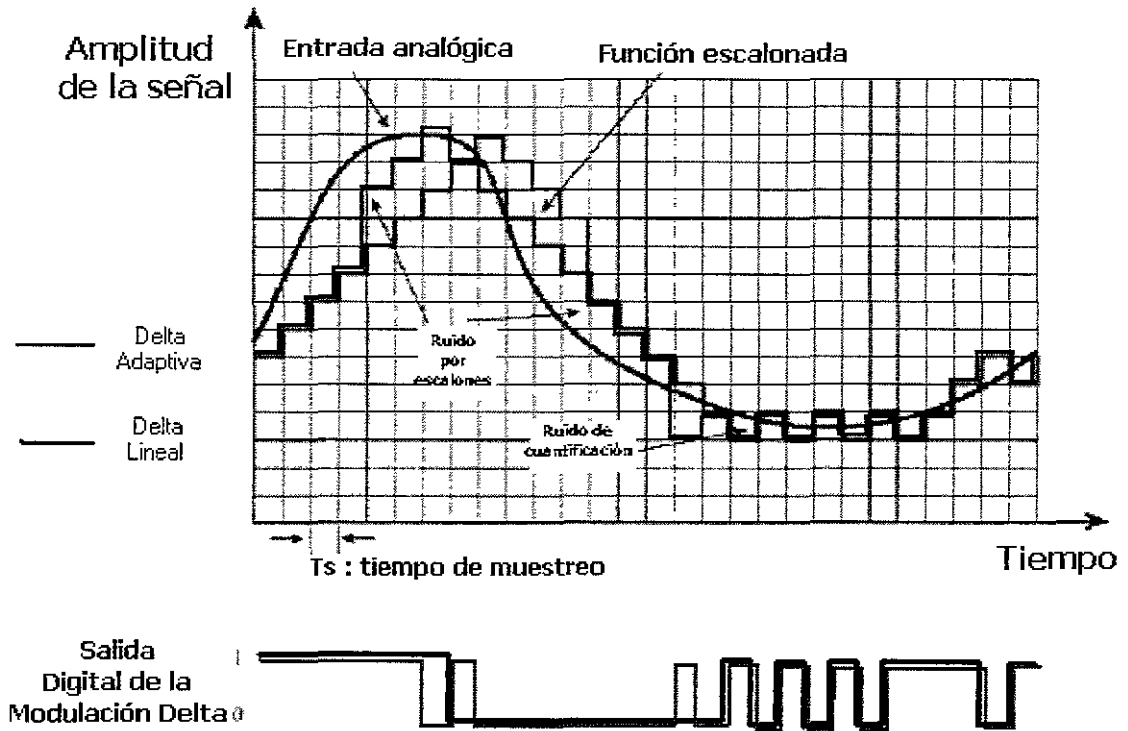


Figura 1.20 Modulación Delta Lineal y Delta Adaptiva.

La gran ventaja de esta modulación es que cada muestra se codifica con un solo bit, lo que significa una gran reducción en la palabra de codificación, se traduce en una gran disminución de la velocidad de transmisión y, por lo tanto, en el ancho de banda necesario. Como se puede ver en la figura 1.20, el gran problema que sufre este tipo de modulación es que la señal de muestreo no puede hacer un seguimiento muy rápido cuando se presentan movimientos bruscos en la amplitud de la señal analógica; debido a esto existe una variante llamada Modulación Delta Adaptiva.

Modulación Delta Adaptiva

Esta modulación sigue el mismo principio de la modulación delta lineal, con la particularidad de que con ésta se puede seguir a la señal analógica de manera más rápida (figura 1.20). Esto se basa en el algoritmo que a continuación se muestra:

- Cuando la señal de muestreo supere en amplitud a la señal analógica se codifica como un “0” lógico y se disminuye un escalón en la señal de muestreo.
- Cuando la señal de muestreo quede por debajo de la señal analógica se codifica como un “1” lógico y se aumenta un escalón en la señal de muestreo.
- Cuando la señal de muestreo permanece por tres escalones bajo la señal analógica la magnitud creciente del siguiente escalón es mayor que la de los demás escalones.
- Cuando la señal de muestreo permanece por tres escalones arriba de la señal analógica la magnitud decreciente del siguiente escalón es mayor que la de los demás escalones.

La demodulación de ambas consiste simplemente en reconstruir la señal analógica mediante la señal digital obtenida, lo que representa un proceso mucho más sencillo pues sólo se tiene que seguir el algoritmo empleado en la codificación.

1.8 Bandas Utilizadas

Las VSAT que operan en la Banda C transmiten y reciben alrededor 5.725-7.05 GHz y 3.4-4.8 GHz respectivamente. Por lo general utilizan técnicas de espectro expandido para reducir la potencia requerida por el transmisor. Los transmisores en ráfaga para las VSAT de Banda C generalmente tienen una potencia inferior a 6 watts y también es común encontrar los de 2 watts. [MARAL95] El diámetro de las antenas que operan en la Banda C depende de muchos factores, entre ellos: coordinación de la interferencia, condiciones climáticas, proyección del haz de la antena sobre la superficie de la tierra, etc. En general, las antenas son más grandes que las de la Banda Ku y las de menor diámetro son de 2.4 m. La Banda C es relativamente inmune a las condiciones de precipitación pluvial intensa, pero la interferencia debida a microondas terrestres es un tema que requiere de mayor atención.

Las VSAT que operan en la Banda Ku transmiten y reciben alrededor de 12.5-14.5 GHz y 10.7-12.75 GHz respectivamente, generalmente en canales de ancho de banda reducido y modulación BPSK o QPSK. Algunas veces se utilizan técnicas de espectro expandido a fin de reducir el diámetro de la antena. Los transmisores van desde 1 hasta 2500 watts (vease la tabla 3.3). Las VSAT de la Banda Ku pueden sufrir atenuación por lluvia, pero prácticamente no se encuentran otros problemas de interferencia de la señal en la Banda Ku. [MARAL95]

Tabla 1.2 Bandas utilizadas [RRUIT94]

BANDAS	BANDAS DE FRECUENCIAS	REGIONES	BANDA EXCLUSIVA O COMPARTIDA	ASCENDENTE O DESCENDENTE
C	3.400 - 4.200 GHz	WW	BC	D
	4.500 - 4.800 GHz	WW	BC	D
	5.725 - 5.850 GHz	R1	BC	A
	5.850 - 7.075 GHz	WW	BC	A
X	7.250 - 7.750 GHz	WW	BC	D
	7.900 - 8.025 GHz	WW	BC	A
	7.900 - 8.400 GHz	WW	BC	A
Ku	10.70 - 11.75 GHz	WW	BC	D
	11.70 - 12.10 GHz	R2	BC	D
	12.10 - 12.20 GHz	R2	BE	D
	12.50 - 12.70 GHz	R1	BE	D
	12.50 - 12.70 GHz	R3	BC	D
	12.70 - 12.75 GHz	R1	BE	D
	12.70 - 12.75 GHz	R2 y R3	BC	D
	12.75 - 13.25 GHz	WW	BC	A
	13.75 - 14.30 GHz	WW	BC	A
	14.30 - 14.40 GHz	R2	BC	A
	14.30 - 14.40 GHz	R1 y R3	BE	A
	14.40 - 14.50 GHz	WW	BC	A
Ka	17.30 - 19.70 GHz	WW	BC	D
	19.70 - 20.10 GHz	R1 y R3	BE	D
	19.70 - 20.10 GHz	R2	BC	D
	20.10 - 21.20 GHz	WW	BC	D
	24.75 - 25.25 GHz	R2 y R3	BE	A
	27.00 - 27.50 GHz	R2 y R3	BC	A
	27.50 - 28.50 GHz	WW	BC	A
	28.50 - 29.90 GHz	R2	BC	A
	28.50 - 29.90 GHz	R1 y R3	BE	A
	29.90 - 31.00 GHz	WW	BC	A

1.9 Tasa de transmisión y BER's típicos

Las tasas de transmisión dependen del tipo de información deseada, la cual puede ser datos, voz, video o una mezcla de las anteriores. Los datos y la voz son transmitidos en formato digital, mientras que el video puede ser transmitido también en forma analógica. Las ventajas de la transmisión digital es que se pueden utilizar técnicas de compresión que brindan mayor eficiencia en el uso del ancho de banda.

Los rangos de las tasas de transmisión típicas para los servicios de datos, voz y video son las que se muestran en la tabla 1.3

Tabla 1.3 Tasas de transmisión típicas utilizadas en la práctica para el Servicio Fijo por Satélite*.

TIPO DE SERVICIO.	TASA DE TRANSMISIÓN [Kbps]	FEC	BER	E_b/N_0 [dB]
Voz y Datos	16.000	1/2	10^{-3}	6.2
	19.200	1/2	$10^{-3}, 10^{-4}$	6.2, 7.0
	32.000	1/2	10^{-3}	6.2
	56.000	1/2, 3/4	$10^{-3}, 10^{-4}$	6.2, 7.0
	64.000	1/2, 3/4	$10^{-3}, 10^{-4}$	6.2, 7.0
Datos	128.000	1/2, 3/4	$10^{-3}, 10^{-4}$	6.2, 7.0
	256.000	1/2, 3/4	$10^{-3}, 10^{-4}$	6.2, 7.0
	384.000	1/2, 3/4, 7/8	$10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$	6.2, 7.0, 8.0
	512.000	1/2, 3/4, 7/8	$10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$	6.2, 7.0, 8.0
	768.000	1/2, 3/4, 7/8	$10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$	6.2, 7.0, 8.0
	1024.000	1/2, 2/3, 3/4, 7/8	$10^{-3}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$	6.2, 6.5, 7.0, 8.0
	2048.000	1/2, 2/3, 3/4, 7/8	$10^{-3}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$	6.2, 6.5, 7.0, 8.0
Datos y Video	6600.000	3/4, 7/8	$10^{-4}, 10^{-5}$	7.0, 8.0
	27000.000	1/2, 3/4	$10^{-3}, 10^{-4}$	6.2, 7.0
	45000.000	3/4	10^{-4}	7.0

1.10 Interferencias

El único problema de interferencia conocido generado por las VSAT hasta la fecha ha sido la interferencia intersatelital (PIRE fuera de eje). Este problema puede contrarrestarse mediante un equilibrio del diámetro de la antena, la forma del haz y la utilización del espectro expandido donde sea necesario.

El ruido debido a las interferencias tiene su origen en comunicaciones ajenas a las de la red que usan las mismas bandas de frecuencias.

* Estos datos fueron obtenidos de SATMEX

En el enlace de subida son fuentes de ruido las estaciones terrenas pertenecientes a otros sistemas geostacionarios y las transmisiones terrestres por microondas. En el enlace de bajada son fuentes de ruido los satélites adyacentes al propio y también las transmisiones terrestres por microondas.

Ha de destacarse que este tipo de interferencias pueden ser producidas por antenas pertenecientes a redes ajenas a la nuestra, pero también pueden ser debidas a las de nuestro propio sistema (cuando se usa polarización cruzada o la misma banda de frecuencias en distintos haces).

1.10.1 Interferencia Propia del sistema

Interferencia co-canal (CCI*)

El reuso de frecuencias dentro del sistema es un recurso necesario, debido a que el ancho de banda es limitado. Pero el reuso de frecuencias tiene un inconveniente: la CCI. Esta interferencia se origina por el mal aislamiento entre dos estaciones separadas geográficamente o por polarizaciones ortogonales que usan la misma frecuencia. Por lo tanto, esta interferencia depende fuertemente de las características de la antena tanto en la estación terrena como en el satélite.

Cuando dos estaciones terrenas de diferentes sistemas satelitales y aisladas geográficamente transmiten a la misma frecuencia hacia el satélite, se puede tener interferencia co-canal. Esto es debido a que la antena del satélite recibe ambas señales (figura 1.22), pero al tratarse de diferentes sistemas cada uno de ellos posee un patrón de radiación distinto de la antena del satélite. Por lo tanto, la señal A que transmite una de las estaciones es captada de manera parcial por el sistema de recepción del sistema B, lo que conlleva a interferencia dentro de la señal B del otro sistema. Esta cuestión es transparente para el transpondedor encargado de la señal B, lo que ocasiona que la señal con interferencia se retransmita al sistema y se produzcan errores en la interpretación de la información.

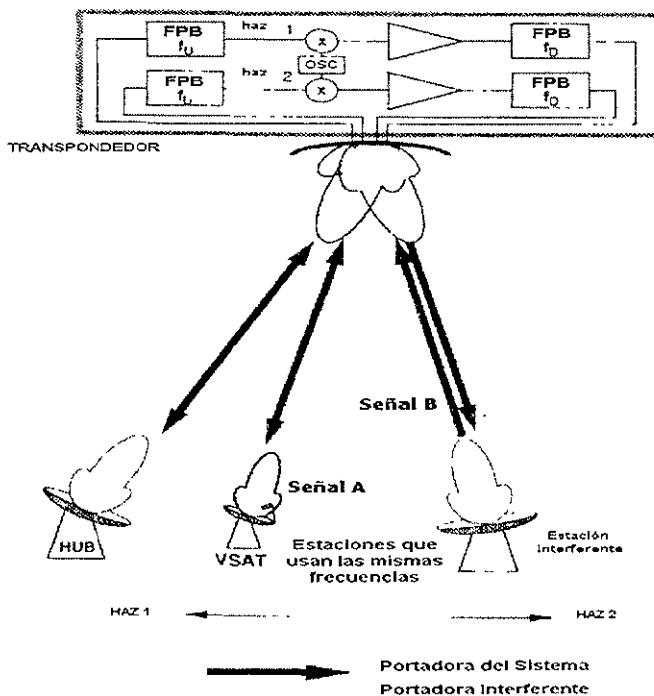


Figura 1.22 Interferencia por reuso de frecuencia.

* Co-Channel Interference

Por otro lado, cuando dos estaciones dentro de la misma región de cobertura usan la misma frecuencia pero con distinta polarización también pueden causar interferencia co-canal (figura 1.23). Usualmente una red VSAT trabaja bajo la misma polarización, pero puede ser que otra red dentro de la misma región trabaje con una polarización ortogonal a la primera y con las mismas frecuencias; esto conlleva a que las señales que llegan al transpondedor de polarización cruzada en el satélite sean retransmitidas tal cual hacia el área de cobertura. El problema surge debido a las características de las antenas en las estaciones que recibirán la señal con polarización cruzada, puesto que existe cierta interferencia entre las señales con polarizaciones ortogonales. Así pues, esto termina en una recepción incorrecta de la información que fue transmitida desde un principio.

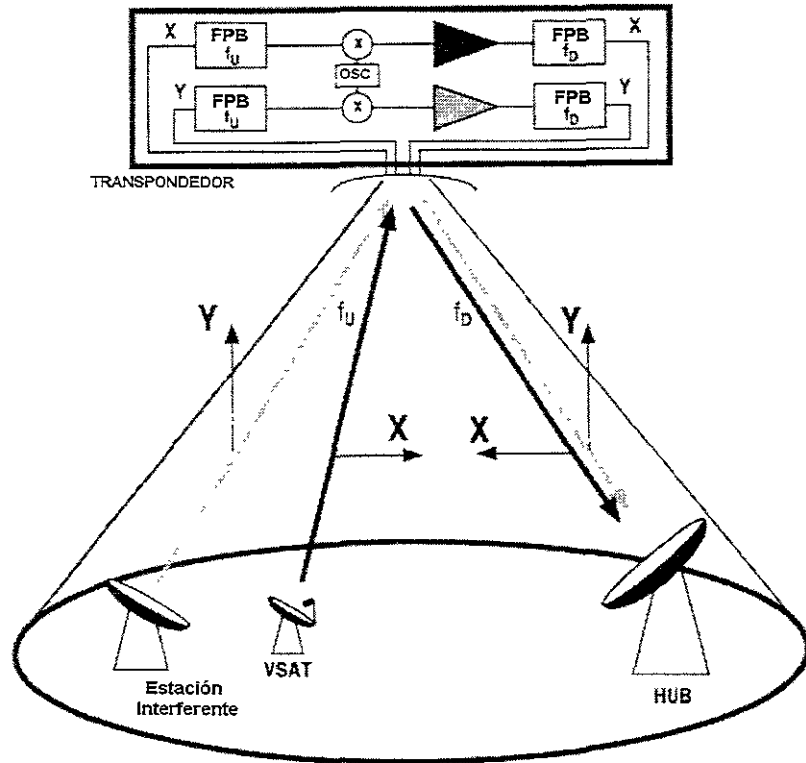


Figura 1. 23 Interferencia co-canal por polarización cruzada.

Interferencia por canal adyacente (ACI)*

Esta interferencia ocurre cuando dos estaciones dentro de la misma área de cobertura del satélite transmiten en canales de frecuencia contiguos (figura 1.24). Esto se debe a que el ancho de banda ocupado por la señal de una de las estaciones puede encimarse un poco en el ancho de banda reservado para el canal adyacente, pero el transpondedor no es capaz de realizar la distinción de señales, por lo que la retransmisión se hace aún a pesar de este imperfecto. Así pues, la señal del canal invadido se recibe de manera errónea. Este inconveniente se puede solucionar mediante la utilización de bandas de guarda entre los canales utilizados para transmisión y recepción. Las bandas de guarda son anchos de banda, colocado entre los canales, que no se utilizan.

* Adjacent Channel Interference

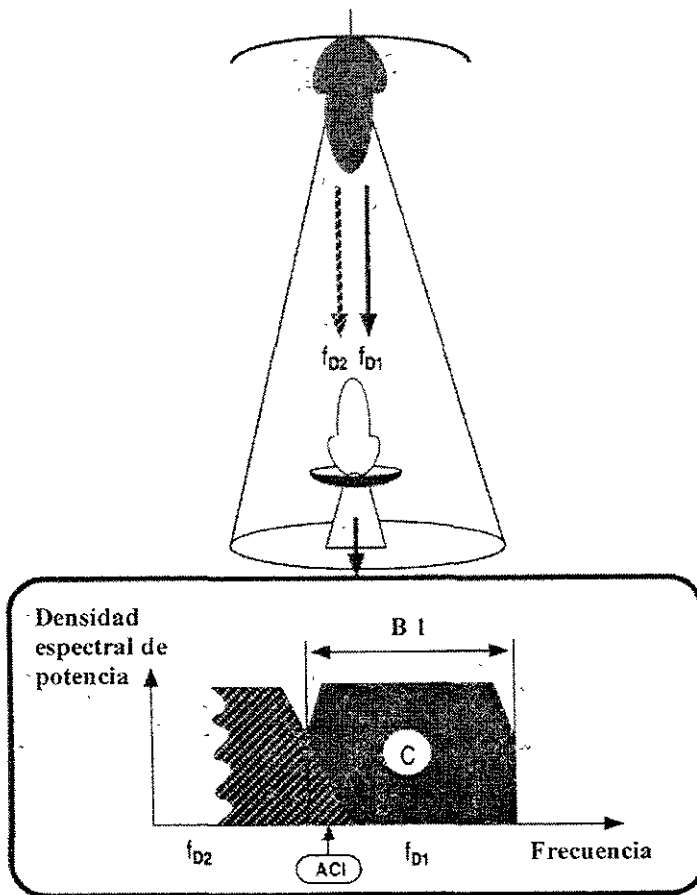


Figura 1.24 Interferencia de canal adyacente.

1.10.2 Interferencia Externa al sistema

Este tipo de interferencia es originado fuera de la red (satélite y VSAT's), se debe a transmisiones de otros satélites o estaciones terrenas que se encuentran operando en las mismas bandas de frecuencias. Las redes VSAT que operan en la banda Ku y Ka utilizan bandas de frecuencias exclusivas asignadas a servicios satelitales, por lo que se considera que los enlaces de microondas no representan algún problema.

Interferencia de un sistema satelital adyacente.

Un sistema satelital adyacente puede generar interferencia sobre otro sistema de dos maneras:

- Interferencia generada por una estación terrena del sistema adyacente. (Enlace ascendente)
- Interferencia generada por el satélite del sistema adyacente. (Enlace descendente)

Este fenómeno en ambos casos depende del patrón de radiación de las antenas en el caso del satélite, debido a que sólo deben cubrir el área de cobertura deseada; y con respecto a las estaciones terrenas, las antenas deben apuntar al satélite indicado sin interferir con otro satélite.

Interferencia de Enlace Ascendente

Este tipo de interferencia ocurre cuando dos estaciones transmiten a la misma frecuencia dentro del área de cobertura de nuestro satélite. Una de las estaciones pertenece a nuestro sistema y se encuentra en los límites de la huella de cobertura, mientras la otra estación ajena al sistema se ubica en el centro de la huella, pero transmitiendo a otro satélite. La señal de la estación propia es recibida por los lóbulos laterales de la antena del satélite, lo que significa que no recibe suficiente ganancia de la antena; mientras que la estación ajena transmite por sus lóbulos laterales hacia el lóbulo principal de la antena del satélite por lo que se recibe más ganancia provocando que interfiera con la señal deseada emitida por la estación propia (figura 1.25).

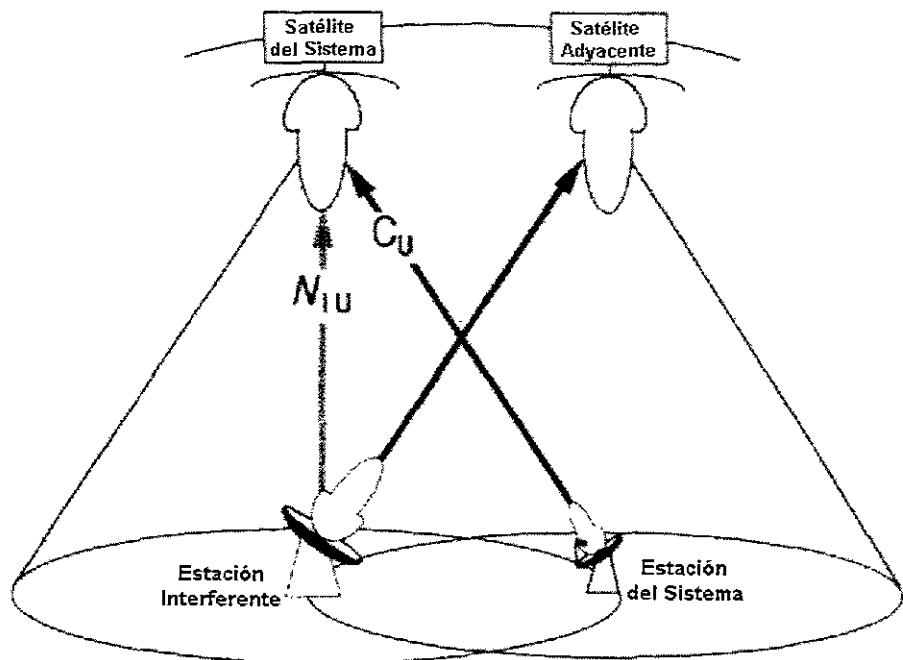


Figura 1.25 Interferencia con sistema satelital adyacente en el enlace de subida.

Interferencia de Enlace Descendente

Este tipo de interferencia ocurre cuando dos satélites transmiten a la misma frecuencia dentro un área de cobertura común a las huellas de ambos satélites. Uno de los satélites pertenece a nuestro sistema, y la estación terrena se encuentra en los límites de la huella de cobertura; mientras el otro satélite, ajeno al sistema, se ubica prácticamente encima de la estación terrena, que se localiza en el centro de la huella de cobertura. La señal del satélite propio es transmitida hacia la estación terrena por los lóbulos laterales de la antena del satélite, lo que significa que no recibe suficiente ganancia de la antena del satélite; mientras que el satélite ajeno transmite por su lóbulo principal hacia el lóbulo lateral de la antena de la estación terrena por lo que se recibe más ganancia provocando que interfiera con la señal deseada emitida por el satélite propio (figura 1.26).

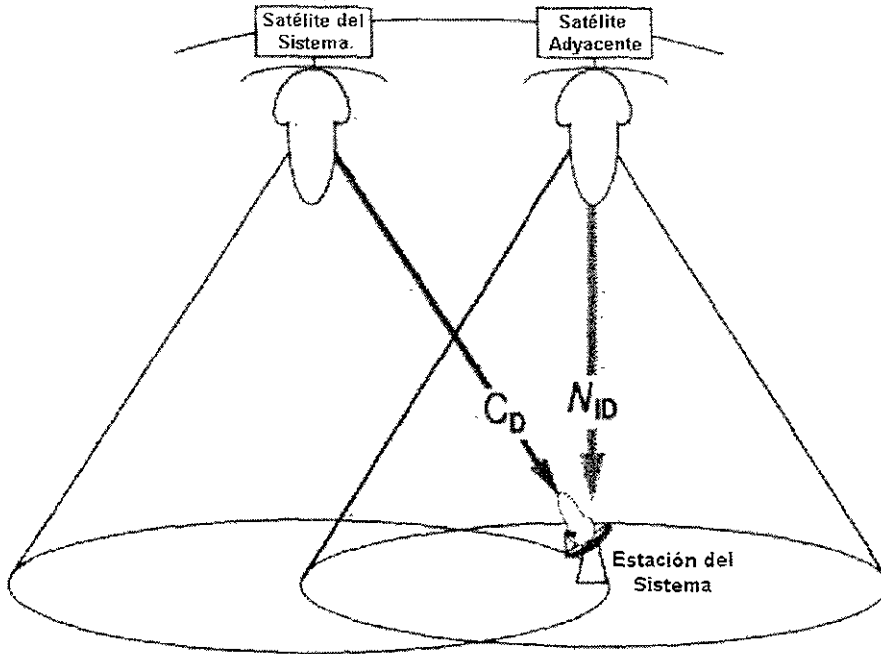


Figura 1.26 Interferencia con sistema satelital adyacente en el enlace de bajada.

Interferencia por Sistemas Terrestres

Debido a que existen bandas de frecuencias exclusivas para el servicio satelital en las bandas Ku y Ka, estas quedan libres de interferencias de otros sistemas. Por otra parte para la banda C sí debe considerarse la interferencia debido a los enlaces terrestres de microondas, ya que no se tienen bandas de frecuencias exclusivas al servicio satelital.

Finalmente, para reducir la interferencia debemos tomar en cuenta las siguientes características del sistema:

- Tener un patrón de radiación adecuado.
- Regular el nivel de potencia. (PIRE)
- Utilizar polarizaciones convenientes.

1.11 Aplicaciones.

1.11.1 Aplicaciones militares

Las redes VSAT han sido adoptadas por diferentes ejércitos. Gracias a su flexibilidad, son idóneas para establecer enlaces temporales entre unidades del frente y el HUB que estaría situado cerca del cuartel general. La topología más adecuada es la de estrella. Se usa la banda X, con enlace de subida en la banda de 7.9-8.4 GHz y con el de bajada en la banda de 7.25-7.75 GHz.

1.11.2 Aplicaciones civiles

Unidireccionales

- Transmisión de datos de la Bolsa de Valores.
- Difusión de noticias.
- Educación a distancia.
- Transmisión de datos de una red de comercios.
- Distribución de tendencias financieras y análisis.
- Teledetección de incendios y prevención de catástrofes naturales

Bidireccionales

- Telenseñanza.
- Videoconferencia de baja calidad.
- E-mail.
- Servicios de emergencia.
- Comunicaciones de voz.
- Telemetría y telecontrol de procesos distribuidos.
- Consulta a bases de datos.
- Monitorización de ventas y control de inventarios.
- Transacciones bancarias y control de tarjetas de crédito.
- Periodismo electrónico.
- Televisión corporativa.

Multimedia

El usuario final pedirá, en el futuro una combinación de servicios que incluirán texto, gráficos, video audio.

Los protocolos usados en el enlace VSAT deberán soportar los dos tipos de tráfico:

- Tráfico continuo: voz y video procesado en tiempo real. Por tanto, la mejor opción será la tecnología de conmutación de circuitos.
- Tráfico a ráfagas: información digital entre ordenadores, sin necesidad de procesamiento en tiempo real. Por tanto, la mejor opción será la tecnología orientada a paquetes.

Servicios móviles

La disminución del tamaño de las antenas al usar bandas de frecuencia como la Ka llevan a servicios como:

- Oficina Portátil: El usuario tendrá conexiones simultáneas de voz, datos y video de baja velocidad. Esto puede ser posible con conexiones de la unidad móvil del usuario con la estación VSAT de forma cableada o no.
- Terminal de oficina en casa: En el cambio de hábitos de trabajo, orientados a fijar el lugar de trabajo en casa, puede tener una gran influencia la tecnología VSAT. Trabajando en la banda Ka con antenas de 60-90 cm de diámetro en aquellas regiones donde el cable o la fibra óptica aun no han cubierto, se pueden conseguir velocidades de hasta 2 Mbps.

1.12 Desarrollo Espacial

Normalmente todas las redes VSAT operan con transpondedores convencionales en los satélites, con anchos de banda típicos que se encuentran entre 27 y 110 MHz. Esto provee completa flexibilidad tanto al proveedor de servicios como al operador del satélite en oposición al uso de transpondedores con procesador a bordo OBP*. Los transpondedores con procesamiento a bordo realizan regeneración de la señal en el satélite con lo cual podemos obtener mejoras de unos cuantos dB en el enlace. Aunque OBP ha sido una realidad tecnológica en los últimos años, sus riesgos y su inflexibilidad han provocado que no sea un sistema muy utilizado; esto quizás cambie a partir de hoy con todo el desarrollo de programas en la actualidad.

Habrà un aumento indudable en el número de sistemas satelitales no geoestacionarios (LEO† y MEO‡). Estas órbitas posiblemente serán requeridas para proveer cobertura global -tipo celular para comunicaciones personales y móviles. El uso de estas órbitas sí proporciona ventajas de utilidad, pero acompañadas de la escasa directividad de las antenas asociada al uso de grandes longitudes de onda en la banda L (1.8 GHz). Las limitantes de esta banda sugieren que no sea una buena alternativa para servicios fijos de VSAT.

El crecimiento seguirá constante en tecnología satelital, con mayores potencias y antenas más grandes que ampliarán la capacidad de los sistemas VSAT. Con numerosas huellas y antenas inteligentes en los satélites se permitirá la conmutación adaptiva y algunas otras ventajas. [TOM94]

1.13 Ventajas y desventajas

1.13.1 Ventajas

Flexibilidad

- Fácil gestión de la red.
- Servicio independiente de la distancia.
- Cobertura global e inmediata.
- Fácil y rápida implantación en lugares de difícil acceso.
- Debido a la gran variedad de configuraciones que puede adoptar una red VSAT, es posible adaptarla a las necesidades propias de cada compañía.
- Los enlaces asimétricos se adaptan a los requerimientos de transferencia de datos entre una estación central que transmite mucha información a estaciones lejanas que responden con poca información (si es que responden).
- Facilidad para reconfigurar y ampliar la red. El uso de un satélite hace que se pueda establecer contacto con cualquier punto dentro de su área de cobertura, con lo que los receptores pueden cambiar de ubicación sin más cambio que la reorientación de su antena. Del mismo modo, la introducción de una nueva terminal no afecta al funcionamiento de las demás.

* On Board Processor

† Low Earth Orbit

‡ Medium Earth Orbit

Gran fiabilidad

Se suele diseñar para tener una disponibilidad de la red del 99.5% del tiempo y con un BER de 10^{-7} . Es depende de la tasa de transmisión y el tipo de señal, de acuerdo con el uso. [ROS99]

Economía

- Estabilidad de los costos de operación de la red durante un largo período de tiempo. Una empresa puede ser propietaria de prácticamente todos los segmentos de la red. Esto hace que el presupuesto dedicado a comunicaciones se pueda establecer con gran exactitud. El único segmento del que la empresa no puede ser propietario es del segmento espacial, pero sus precios son muy estables.
- Evita las restricciones que impone una red pública en cuanto a costos y puntos de acceso.
- Aumento de la productividad de la organización. Al haber un centro de monitoreo y control de la red; el tiempo promedio entre fallas de la red aumenta considerablemente y la duración de las fallas suele ser corta. Por lo tanto, la organización puede responder rápidamente a las peticiones de sus clientes gracias a un medio de comunicación fiable, lo que repercute en un aumento de la satisfacción de los mismos y un aumento de las ventas.
- Se puede implantar una red corporativa insensible a fluctuaciones de las tarifas.

1.13.2 Desventajas

Problemas económicos

Las inversiones iniciales son elevadas y en algunos países no son claramente competitivas frente a redes basadas en recursos terrestres. Este problema puede ser atenuado recurriendo al alquiler del HUB.

Problemas radioeléctricos

- El retardo de propagación típico de 0.5s (doble salto) puede ser problemático para ciertas aplicaciones como telefonía y videoconferencia, pero también existen aplicaciones insensibles a esto como la actualización de software, e-mail, transferencia de archivos, etc.
- El punto más crítico de la red está en el satélite. Toda la red depende de la disponibilidad del satélite. Si el satélite sale temporalmente de servicio, toda la red sufre de interrupciones en su funcionamiento. De todas maneras el problema no es muy grave pues si el conflicto está en un transpondedor, un simple cambio de frecuencia o/y polarización lo soluciona. En caso de ser todo el satélite, bastaría con reorientar las antenas a otro satélite.

Problemas de privacidad

El uso de un satélite geostacionario como repetidor hace posible que cualquier usuario no autorizado pueda recibir una portadora y demodular la información. Para prevenir el uso no autorizado de la información, ésta se puede encriptar.

Referencias

- PRATT93] "Satellite Communications" T. Pratt, John Wiley & Sons, 1993.
- ROS99] "Comunicaciones por Satélite" C. Rosado, Limusa, México, 1999.
- GORD93] "Principles of Communications Satellite" D. Gordon, John Wiley & Sons, 1993.
- TOM94] "Electronic Communications Systems" W. Tomasi, Pearson, 1994.
- MARAL95] "VSAT Networks" G. Maral, John Wiley & Sons, 1995.
- RRUIT94] "Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones", 1994.
- RODY96] "Satellite Communications" D. Roddy, McGraw Hill, 1996.

CAPÍTULO 2

Elementos considerados como variables en los cálculos de enlace

Los elementos de las estaciones VSAT considerados en esta tesis como variables en los cálculos de enlace se muestran en la figura 2.1. Estos son:

- La antena de transmisión y recepción.
- El HPA*
- El LNA†
- El demodulador

La importancia de cada elemento en los cálculos es explicada a continuación.

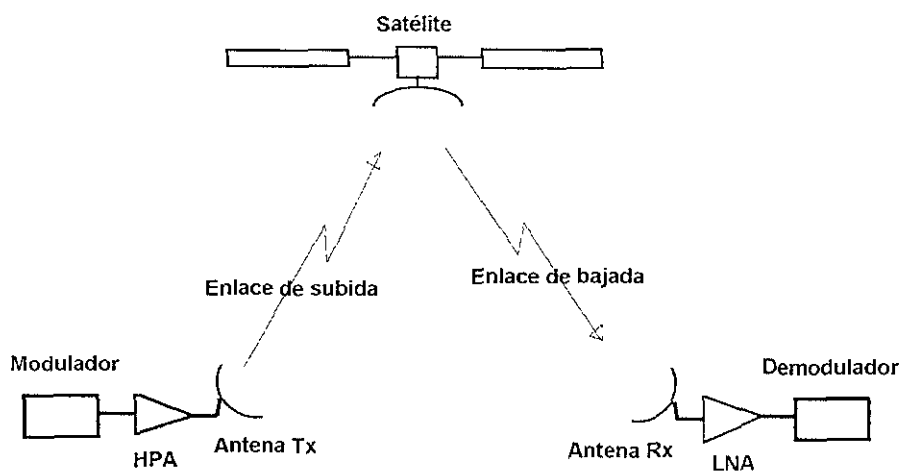


Figura 2.1 Principales elementos considerados en los cálculos de enlace.

* High Power Amplifier
† Low Noise Amplifier

2.1 Antena

Este elemento forma parte tanto del sistema de transmisión como del de recepción, por lo que su diseño influirá notablemente dentro del sistema completo de nuestra estación y del satélite. Es necesario que con este elemento podamos dirigir la señal hacia el satélite para poder aprovechar la potencia radiada de la mejor forma, y el tipo de antena que ofrece tales características es el de reflector parabólico de apertura circular (figura 2.2). La antena está constituida por un elemento radiador, que se encarga de emitir la señal hacia un elemento reflector que redirige la señal en una dirección determinada.

El principal objetivo de la antena es poder dirigir la potencia hacia el satélite, además de poder captar la potencia que el satélite está dirigiendo hacia la Tierra. Así pues, esto significa que se deben de tener ganancias suficientes tanto para la transmisión como para la recepción mediante la utilización de los menores diámetros de reflectores posibles.

Los parámetros más importantes dentro del diseño de una antena son: directividad, eficiencia, ganancia, y temperatura de ruido.

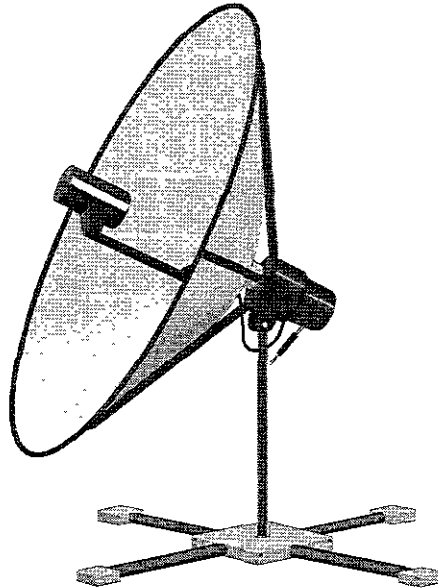


Figura 2.2 Antena de reflector parabólico.

2.1.1 Ganancia

La ganancia de una antena se define como la razón de la potencia transmitida en una dirección determinada comparada con la radiada por una antena isotrópica. Y matemáticamente se obtiene mediante el área efectiva de la antena y la longitud de onda de nuestra frecuencia de trabajo, como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_f}{\lambda^2} \quad (2 - 1)$$

donde A_f es el área efectiva de la antena y λ es la longitud de onda.

Además tenemos que:

$$A_f = \eta \cdot A_i \quad (2 - 2)$$

donde η es la eficiencia de la antena, A_i es el área física de la antena y se define (para un reflector parabólico de apertura circular) por:

$$A_i = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2 - 3)$$

donde D es el diámetro de la antena. Con lo que sustituyendo (2-2) y (2-3) en (2-1), tenemos la siguiente ecuación:

$$G = \eta \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 \quad (2 - 4)$$

2.1.2 Eficiencia

Como se puede observar en la ecuación (2 - 4), el diámetro de la antena y la longitud de onda no son los únicos factores que modifican la ganancia, sino que la eficiencia también lo hace. Los principales parámetros de la antena que definen el valor que puede tomar la eficiencia son: exactitud en la superficie del reflector, aproximación del reflector a una parábola, dimensiones, deformación y bloqueo de la señal por objetos como el alimentador u otros reflectores.

La eficiencia no es un parámetro fácil de definir para una antena, es por eso que es un dato dado por el fabricante implícitamente. Por ejemplo, se sabe que para antenas satelitales la eficiencia varía entre 0.5 y 0.65 [CLAB].

2.1.3 Patrón de radiación y directividad.

La directividad de una antena se define como la anchura que tiene su lóbulo principal donde la potencia máxima cae a la mitad de su valor (-3 dB) (figura 2.3). También se le conoce como el ancho del haz de media potencia (HPBW*). Para calcular la directividad de una antena parabólica se utiliza una ecuación que aproxima en buena forma este valor [PRATT93]:

$$\theta_{-3dB} = 75 \frac{\lambda}{D} \quad (2 - 5)$$

* Half Power Beam Width

donde D es el diámetro de la antena, λ es la longitud de onda y θ_{-3dB} es el ancho del haz en grados.

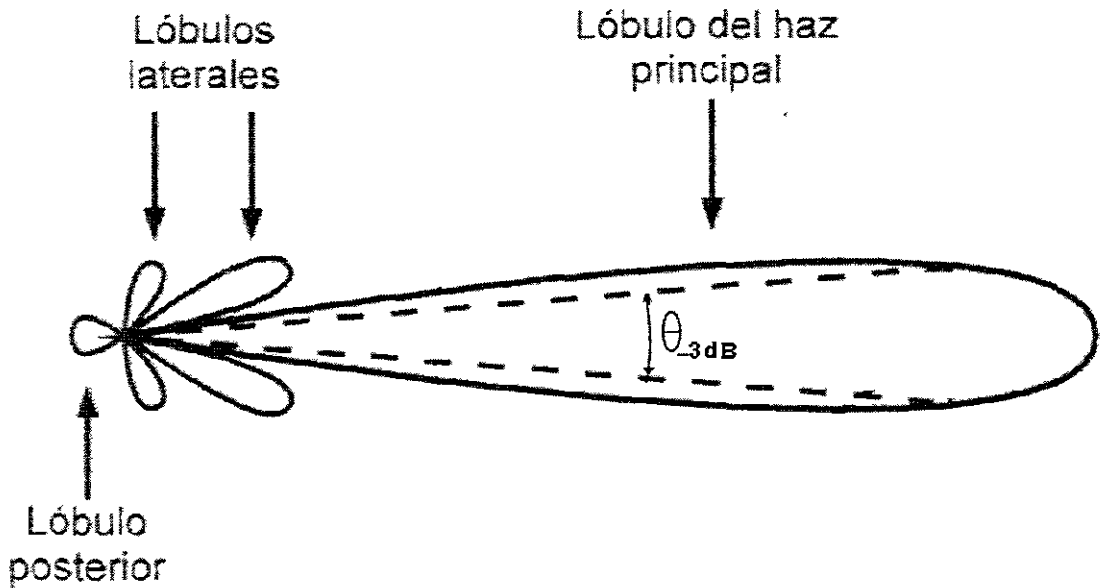


Figura 2.3 Directividad de la antena.

2.1.4 Temperatura de ruido

El ruido del sistema es un factor muy importante y son las antenas receptoras los principales contribuyentes en la magnitud total de este factor. Esto es debido a que el apuntamiento de las antenas además de ver el satélite también están viendo muchas fuentes de ruido potenciales, que no sólo introducen ruido por el lóbulo principal, sino también por los lóbulos laterales de la antena. Las principales contribuciones de ruido en el lóbulo principal son: ruido cósmico, ruido galáctico, ruido por propagación a través de la troposfera y la ionosfera, y ruido añadido por la precipitación pluvial. A través de los lóbulos secundarios las contribuciones de ruido son: el Sol, la Luna, interferencias terrestres, objetos cercanos y elementos que obstruyen la recepción de la antena.

Las temperaturas en las que interviene el cielo, es decir, las temperaturas cósmicas y galáctica, y la de la troposfera son dependientes de la frecuencia; por lo que es importante definir la magnitud de la temperatura del cielo en base a la frecuencia a la que nuestro sistema opere. Aunque cabe señalar que el ruido de la temperatura de la troposfera también depende del ángulo de elevación de la antena, pues a mayor ángulo la temperatura de ruido disminuye y viceversa.

Existe otro factor muy importante que afecta de manera significativa a las antenas: el efecto solar. Como sabemos, la radiación emitida por el Sol es radiación electromagnética y por lo tanto puede causar interferencia en un enlace satelital. Los enlaces más perjudicados por este efecto son el enlace de bajada y los enlaces intersatelitales, pues la antena del satélite, que es la que participa en el enlace de subida, no siempre ve al Sol, sino que usualmente lo único que ve es a la Tierra, por lo que dicho enlace no se ve afectado de la misma manera. Esta temperatura es dependiente de la frecuencia, el diámetro de la antena y la hora del día; pues el enlace se verá más afectado cuando la antena esté apuntado directamente al Sol, es decir, cuando el lóbulo principal apunte al Sol. Aunque puede existir interferencia del Sol mediante los lóbulos laterales de la antena.

El valor de temperatura de ruido es un parámetro que usualmente es otorgado por el fabricante (véanse las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4). Pero cabe señalar que este valor depende directamente del ángulo de elevación que tenga la antena, puesto que a medida que el ángulo disminuye, el valor de la temperatura de ruido aumenta. [ROS99]

2.1.5 Alimentadores

Los principales elementos que participan en la alimentación de energía a los reflectores son los radiadores primarios y los transductores de modo ortogonal, que se encargan de separar las señales polarizadas ortogonalmente cuando es el caso. Un radiador primario realiza el acoplamiento electromagnético con el medio de propagación de modo que la energía pueda propagarse eficientemente en una dirección sin que ésta se refleje. La forma de corneta de muchos de los radiadores primarios permite lograr el acoplamiento mencionado y sus dimensiones determinan la ganancia respecto a un radiador isotrópico (figura 2.4), así como la anchura del haz en su lóbulo principal.

Los alimentadores rectangulares o cornetas piramidales, tienen la ventaja de poder ser usados en polarización vertical y horizontal simultáneamente, pero su principal limitante es que no puede ser utilizada en polarización circular y su deficiente simetría en el lóbulo principal.

El tipo de radiador primario más utilizado en las antenas de reflector parabólico es el de corneta de apertura circular, debido a su versatilidad para manejar diferentes polarizaciones en las señales a transmitir. Las cornetas circulares con paredes interiores lisas producen un haz principal no simétrico, lo que se traduce en una baja eficiencia de las antenas. Debido a que este tipo de alimentadores generan polarización cruzada y lóbulos laterales considerables, se utilizan paredes corrugadas (Corneta corrugada) que tienen como finalidad reducir estos efectos. Los receptores domésticos, dentro de los cuales se puede incluir a las estaciones VSAT, utilizan generalmente antenas con alimentadores de corneta corrugada [RODY96].

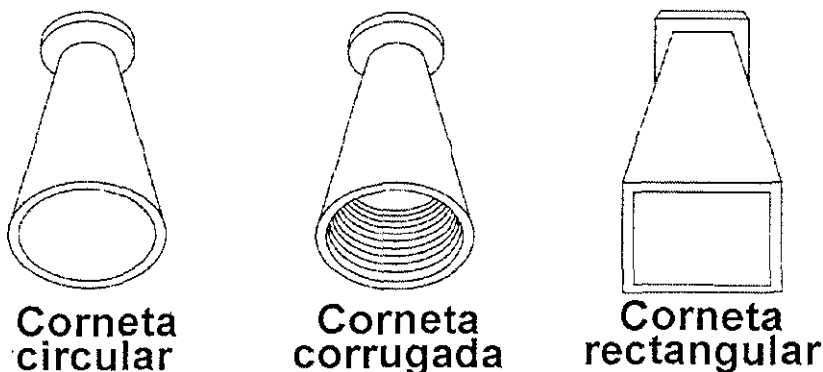


Figura 2.4 Alimentadores de antenas parabólicas

2.1.6 Tipos de antenas

Una antena parabólica tiene la propiedad de reflejar las señales que llegan a ella y concentrarlas en un punto fijo llamado foco (recepción). Así mismo, si las señales provienen del foco las refleja y las concentra en un haz muy delgado de radiación (transmisión). Este foco coincide con el foco geométrico del paraboloide de revolución que representa matemáticamente a la antena, y en él se coloca el alimentador, que por lo general es una antena de corneta; el tipo de alimentador define la ganancia final de la antena y las características de sus lóbulos. Hay varios tipos de alimentación de una antena parabólica pero los tres más utilizados son los de alimentación frontal, offset, Cassegrain y Gregorian. Las especificaciones técnicas de las antenas utilizadas para esta tesis, tales como temperatura de ruido, ganancia y frecuencias de operación se pueden consultar en las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

Antena parabólica simple con alimentación frontal

La ventaja principal de este tipo de reflector es que debido a que la energía que emite el alimentador es captada por toda la superficie de la antena, con lo que se pueden evitar casi en su totalidad las pérdidas por desbordamiento, es decir, la potencia casi no escapa por las orillas del reflector. Además, siendo un poco estrictos, no toda la energía es reflejada, debido a que las dimensiones del alimentador y su soporte interfieren en la trayectoria del haz principal de la antena, con lo que contribuyen al efecto de desbordamiento y como consecuencia se tiene una disminución del 10% en la eficiencia [RODY96] y un aumento de los lóbulos laterales del patrón de radiación de la antena (figuras 2.5 y 2.6).

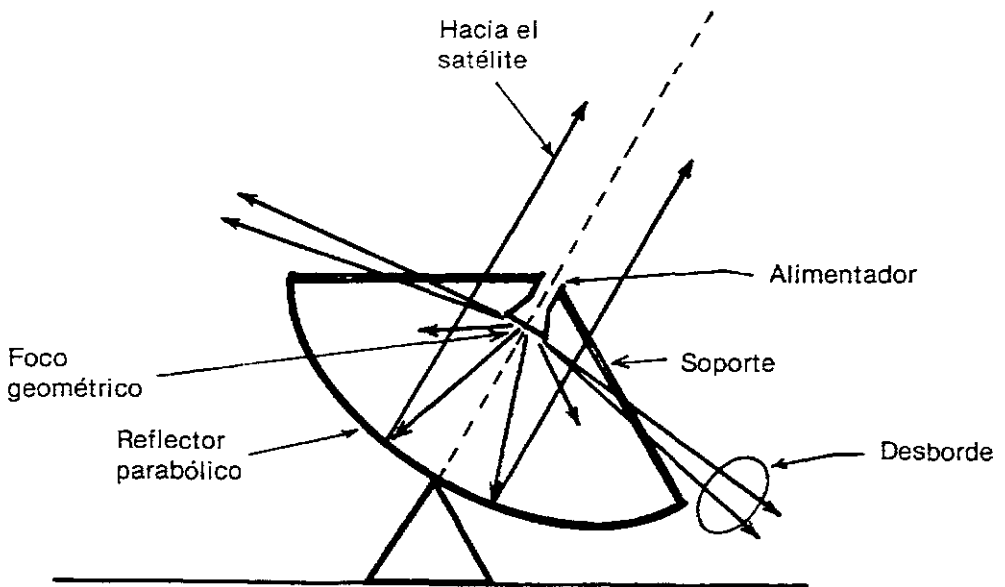


Figura 2.5 Antena de alimentador frontal



Figura 2.6 Antena de alimentador frontal

Antena parabólica offset

La principal característica que posee esta antena es que disminuye el efecto de bloqueo, puesto que el radiador y el soporte quedan fuera de la dirección de radiación de la antena. Para esto es necesario sólo usar una porción de la parábola, aunque el reflector sigue quedando en el foco de la misma como se muestra en las figuras 2.7 y 2.8. La principal desventaja de las antenas offset es la necesidad de utilizar soportes mecánicos de alta rigidez para poder conservar la geometría del reflector. Debido a su asimetría, la atenuación por polarización cruzada es mayor que la generada por una antena de alimentación frontal; una alternativa para solucionar este problema es introducir una corrección en el alimentador primario, como lo sería una corneta corrugada. Además, la antena offset presenta una eficiencia más alta sobre la que tiene una antena de alimentación frontal. Este tipo de antena es el más popular para las terminales VSAT esclavas.

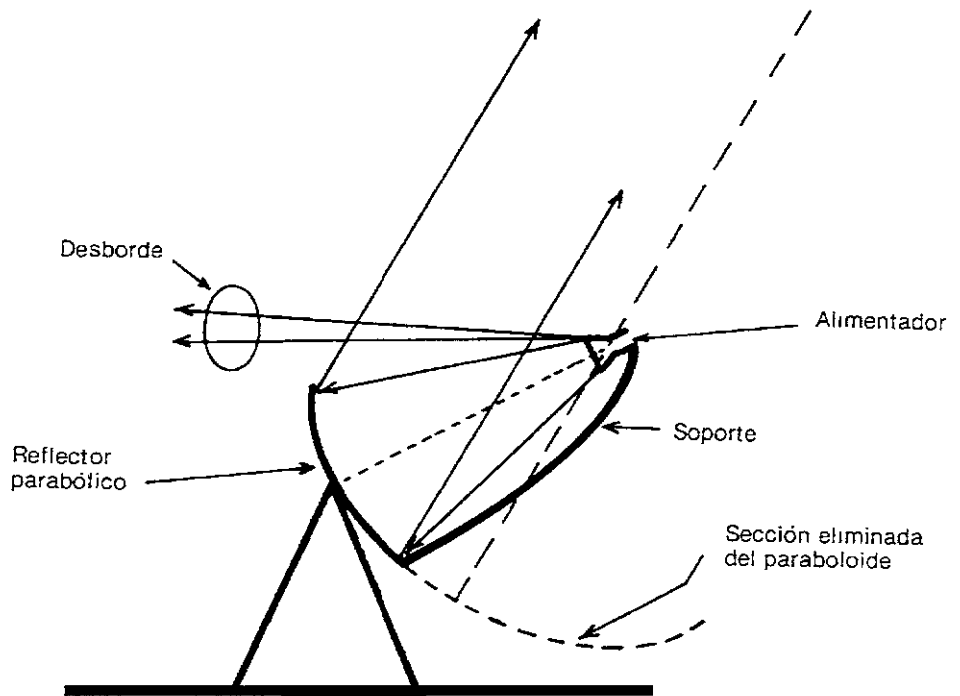


Figura 2.7 Antena tipo offset.

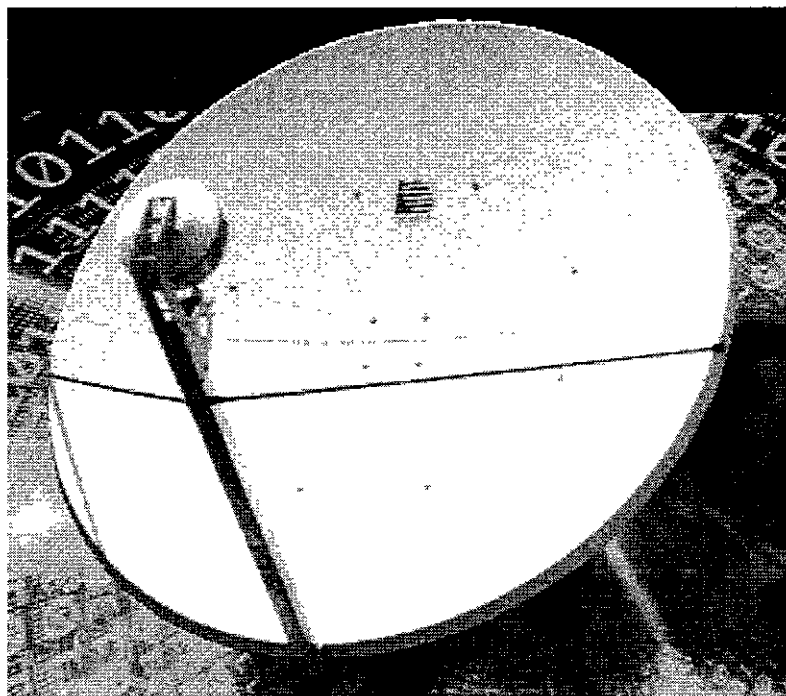


Figura 2.8 Antena tipo offset

Antenas Cassegrain y Gregorian

La principal característica de estas antenas es que utilizan dos reflectores en lugar de uno solo, donde a uno se le conoce como reflector secundario (el cual se encuentra de frente al alimentador) y al otro se le llama reflector primario, el cual es el de mayores dimensiones. Usualmente el reflector secundario es de forma hiperbólica para antenas Cassegrain, mientras que para antenas Gregorian es elíptico (figuras 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12), lo que hace que no cambien los frentes de onda del radiador primario; el reflector primario es un plato parabólico que se encarga de redirigir la energía en la dirección correcta. La principal ventaja de esta configuración es que la conexión del alimentador con el duplexor y los amplificadores (de potencia y bajo ruido) se puede hacer de manera más sencilla, gracias a la posición del alimentador primario. Además, esta antena tiene menor temperatura de ruido, debido a que la energía recibida en la parte más sensible de la zona de desbordamiento del radiador primario proviene del cielo, mientras que la de alimentación frontal proviene de la Tierra. Tiene el inconveniente de que los soportes del reflector secundario también obstaculizan la libre propagación de las ondas, lo que reduce la eficiencia y aumenta el tamaño de los lóbulos laterales. Este tipo de antenas es de gran uso en las estaciones centrales o HUB en redes VSAT con configuración de estrella.

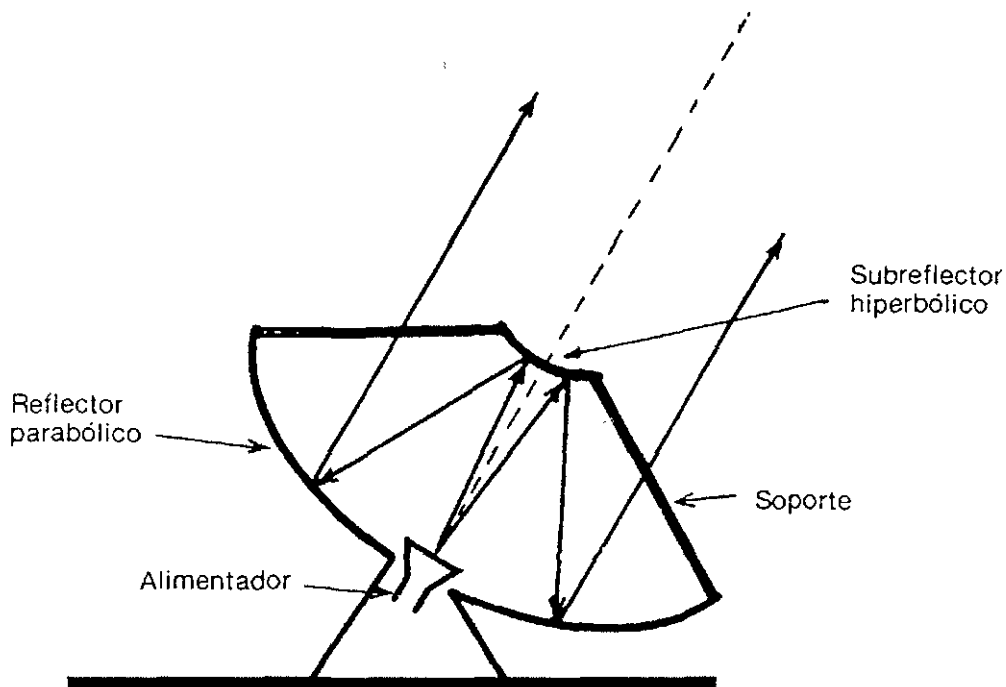


Figura 2.9 Antena Cassegrain

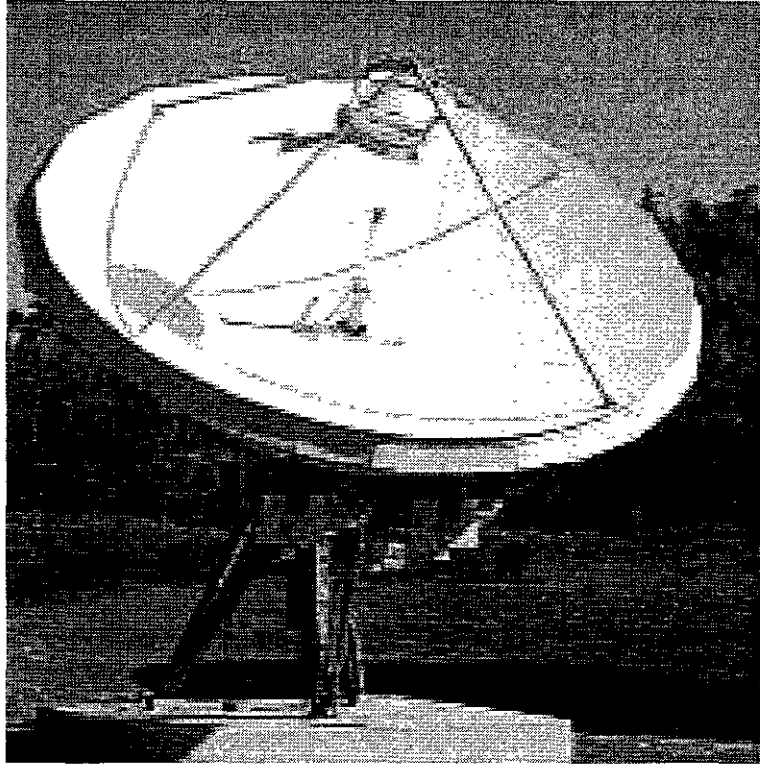


Figura 2.10 Antena Cassegrain

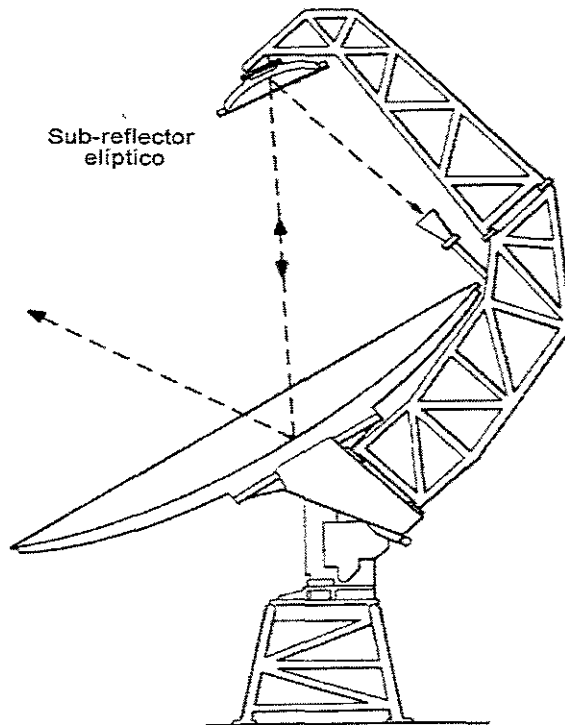


Figura 2.11 Antena Gregorian



Figura 2.12 Antena Gregorian

2.2 HPA

Para que la señal emitida por la estación terrena pueda llegar al receptor del satélite es necesario que se eleve su nivel de potencia, pues de otra forma la portadora no soportaría las múltiples atenuaciones que sufre en el trayecto hacia el satélite. Desafortunadamente la amplificación viene acompañada del ruido de intermodulación, el cual está presente en todos los HPA, por lo que, para evitarlo su operación se realiza a varios dB por debajo de la saturación (*back off*), como se muestra en la figura 2.13. Existen tres tipos básicos de amplificadores de alta potencia: TWT*, Klystron y SSPA†; sus principales características se presentan a continuación.

* Travelling Wave Tube

† Solid State Power Amplifier

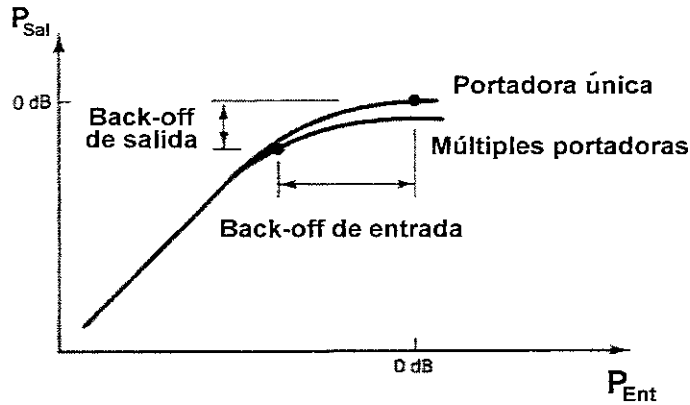


Figura 2.13 Back off

2.2.1 TWT

Los TWT, también conocidos como Amplificadores de Ondas Progresivas, son una variante de tubos de haces lineales como lo es el Klystron. Sus principales ventajas se basan en la posibilidad de selección de potencia, pues cuenta con una gran gama de opciones, que llegan hasta las centenas de Watts; además, su ancho de banda también se considera grande, pues puede ser de más de 500 MHz [ROS99]. Los TWT de más bajas potencias emplean el enfriamiento por conducción, los de potencia media usan ventilación forzada y los de altas usan enfriamiento por agua. Esto les da más versatilidad, pues pueden aplicarse para diferentes requerimientos. Las ganancias usuales de estos amplificadores son de 20 a 80 dB en las bandas Ku y Ka. (Véase las tablas 3.5 y 3.7)

Los TWT usados en estaciones terrenas utilizan fuentes de energía bastante complejas y muy precisas, con altos voltajes, por lo que su vida útil es de unos cuantos años, mientras que los usados en los satélites pueden durar más de 10 años, debido a que los niveles de potencia son menores.

2.2.2 Klystron

Este tipo de amplificador se utiliza en aquellas aplicaciones donde se tenga un ancho de banda no superior al del transpondedor. Utiliza potencia que va de cientos de Watts a varios kilowatts (Véase las tablas 3.5 y 3.7), por lo que el Klystron es un amplificador de potencia que puede dar más ganancia a las señales. La ganancia típica de estos dispositivos va de los 35 dB a los 80 dB en las bandas Ku y Ka. La eficiencia tanto de un Klystron como de un TWT está entre el 30% y el 50%. Para controlar la temperatura utilizan sistemas de refrigeración basados en la ventilación forzada de aire. Dentro del dispositivo existen diferentes cavidades resonantes, por medio de las cuales se puede ajustar la frecuencia central, por lo que es necesario sintonizarlos nuevamente para cada transpondedor.

El Klystron es un amplificador que utiliza mucha potencia de DC, y al no contar con ella en los satélites está limitado a funcionar como amplificador de potencia en las estaciones terrenas para usarlo en el enlace de subida. Las fuentes de alimentación de los Klystrons son más sencillas que las de los TWT y su vida útil puede ser mucho mayor.

2.2.3 Amplificadores de estado sólido

Los Amplificadores de Estado Sólido (SSPA) son convenientes y económicos cuando el ancho de banda total (de su o sus portadoras) es reducido. Son muy utilizados en redes de terminales de muy pequeña apertura (VSAT); ya que tienen una gama de potencia apropiada para este servicio (véase la tabla 3.6 y 3.8), mejor linealidad y menor figura de ruido, por ejemplo 10 dB, que los tipos de amplificadores antes mencionados [ROS99].

Los SSPA consisten de varias etapas de amplificadores en cascada. Usualmente los amplificadores son transistores de efecto de campo de arsenuro de galio, los cuales suelen tener una ganancia de 10 dB cada uno; y si se tienen 6 etapas, al final la ganancia puede ser de 60 dB. Como última etapa se tiene un atenuador variable que sirve para ajustar la ganancia y produce compensación térmica.

Debido a que los amplificadores de estado sólido son pequeños es muy difícil disipar el calor generado por ellos. Pero en aplicaciones donde el calor puede ser disipado, los SSPA ofrecen bajo peso y gran duración. Aunque cabe mencionar que la eficiencia de estos amplificadores de potencia es baja y requieren más potencia de DC para producir la misma magnitud de una señal de salida que otro amplificador haría con menos potencia. [GORD93]

2.3 LNA

El primer dispositivo electrónico importante que encuentran las señales recibidas por la antena es un amplificador de bajo ruido. Dado que las señales de radiofrecuencia recibidas son usualmente de un nivel de potencia muy bajo, la primera amplificación se debe realizar sin que se introduzca una cantidad significativa de ruido, pues de no hacerse así, al ser comparables las magnitudes de la señal y el ruido, la información podría perderse completamente.

De acuerdo con lo anterior, y como el nivel de potencia de la señal a su llegada a una estación terrestre receptora es muy bajo, el amplificador debe ser altamente sensible, es decir, que el ruido interno generado por él (temperatura de ruido) sea lo más bajo posible. La temperatura de ruido del amplificador es función de varios parámetros, tales como: su ganancia, las características de sus componentes y la temperatura física de ellos. Si la temperatura física logra reducirse, entonces la temperatura de ruido también disminuye, por lo que es deseable enfriar el interior del amplificador lo más que se pueda, hasta temperaturas cercanas al cero absoluto, además de colocarlo lo más cerca posible del duplexor de la antena para reducir las pérdidas de conexión.

Por otra parte, no sólo se introduce ruido en la señal a través del sistema amplificador de bajo ruido, sino también por la antena; la suma de ambas temperaturas determinan casi completamente la temperatura total T de ruido del sistema de recepción, siempre y cuando las pérdidas en la guía de ondas y los conectores sean bajas.

Existe un parámetro que se utiliza comúnmente para definir las cualidades de recepción de una estación terrestre, el cual debe obtener el valor mínimo para operar aceptablemente. Este parámetro es la relación G/T , donde: G es la ganancia de la antena y T , como ya se mencionó es la temperatura de ruido del sistema. Este cociente recibe el nombre de "Figura de Mérito". Cabe mencionar que el valor requerido de este parámetro también depende de la ubicación geográfica y los parámetros del satélite; es decir, no todos los satélites transmiten con la misma potencia; además, la estación terrestre puede estar situada cerca de

los límites de la huella de iluminación y debido a esto recibir menor densidad de potencia. Además, temperatura de ruido de los LNA disponibles en el mercado es mayor en las de frecuencias más altas.

Existen diferentes tipos de amplificadores. En la siguiente tabla (Tabla 2.1) se presentan diferentes tecnologías con sus características principales; posteriormente se describen los 3 tipos básicos de estos amplificadores.

Tabla 2.1 Tipos de LNA [MAR93]

TECNOLOGÍA	FRECUENCIA [GHz]	TEMPERATURA DE RUIDO [K]	ANCHO DE BANDA [GHz]	GANANCIA [dB]
Paramétrico Criogénico	4	13	0.5	30
	20	100	0.5	30
Paramétrico Refrigerado (Peltier)	4	35	0.5	30
	12	85	0.5	30
	20	150	0.5	30
Paramétrico sin refrigerar (ambiente)	4	55	0.5	30
	12	150	0.5	30
	20	200	0.5	30
FET Criogénico	20	75	0.5	45
FET Refrigerado (Peltier)	4	40	0.6	60
	12	120	0.75	60
	12	160	2.0	60
	20	180	1.0	45
FET sin refrigerar (ambiente)	4	70	0.6	60
	12	130	0.75	60
	12	180	2.0	60
	20	350	1.0	22
HEMT	20	300	1.6	16

Los tres tipos básicos de amplificadores de bajo ruido son: LNA paramétrico refrigerado por helio, LNA enfriado termo eléctricamente por efecto Peltier y LNA de efecto de campo sin enfriar.

Aunque el amplificador refrigerado es el de más baja temperatura de ruido, es también el más complicado, costoso y con mayor riesgo de falla, por lo que su uso está casi abandonado. Actualmente, el amplificador más empleado en las estaciones terrenas y en los satélites es el LNA de efecto de campo sin enfriar, ya que existen nuevos tipos con mejoras sustanciales en este aspecto, conocidos por las siglas HEMT*.

A manera de ejemplo, la temperatura de ruido adicional en la banda C que generan los LNA en una estación terrena es típicamente de 15 K para el refrigerado, de 35 K para el enfriado por efecto Peltier y de 70 K para el de efecto de campo sin enfriar. En la banda Ku los valores típicos son: 45 K para el paramétrico refrigerado, de 80 a 100 K para el paramétrico enfriado termoeléctricamente y de 130 K o más el de efecto de campo sin enfriamiento, aunque este tipo puede también enfriarse por efecto Peltier. Para valores más precisos véanse las tablas 3.9 y 3.10.

2.4 Modulador y demodulador

Esta etapa es la encargada de realizar la modulación de las señales transmitidas y la demodulación de las recibidas, lo cual implica la conversión de banda base a frecuencia intermedia y viceversa, según sea el caso. En las estaciones que tienen la capacidad de recibir y transmitir, el modulador puede encontrarse en la misma unidad que el demodulador, lo cual, constituye un MODEM.

La etapa de modulación del modem de la estación combina la forma de la señal original con la señal portadora, modificando el ancho de banda de frecuencias y la posición de la información dentro del espectro radioeléctrico, la cual es transferida a frecuencias más altas (véase tipos de modulación capítulo uno). Este cambio de banda base a frecuencia intermedia es el primer ascenso de conversión a microondas. Aunque el modulador coloca la señal en una parte más alta del espectro, ésta todavía no es lo suficientemente alta como para radiarla. Por tal motivo, a la salida del modulador regularmente va un convertidor de subida de microondas y a la entrada del modem, en la etapa de recepción, va el convertidor de bajada, para que la señal recibida sea procesada adecuadamente.

En la etapa de demodulación del modem, la señal de frecuencia intermedia que sale del convertidor de bajada aún está modulada, y el paso siguiente para recuperarla en su forma original (banda base) es precisamente demodularla. En realidad, la señal nunca se recupera exactamente como era en su forma original, ya que diversos factores, como el ruido térmico y el de intermodulación, se encargan de distorsionarla. El grado de distorsión que se produce depende del tipo de modulación que se haya elegido, del nivel de la potencia transmitida, de la ganancia de las antenas, y de otros parámetros del diseño del enlace. De cualquier manera, si el enlace ha sido bien diseñado, el oído o el ojo humanos no perciben tal distorsión en una señal de audio o de video, respectivamente, y la toman como aceptable o quizá hasta excelente. Para esto se han establecido normas y recomendaciones internacionales, las cuales fueron acordadas después de haber hecho muchas pruebas subjetivas con una gran gama de individuos, a fin de saber cuánto ruido era permisible en presencia de cada tipo de señal sin que resultase incómodo; es decir, se comprobó que si el cociente de la potencia de la señal deseada (una imagen de TV, un programa de radio, una voz por teléfono, etc.) dividida entre la potencia del ruido presente era mayor de cierto valor o estándar, entonces el sistema funcionaba bien. A este cociente se le llama relación señal a ruido y se representa como S/N; es la medida de la calidad de la señal recibida y se especifica precisamente a la salida del demodulador. Para cada clase de señal hay un estándar o S/N distinto. Por ejemplo, para una señal telefónica el estándar es de 50 dB, o sea, que la mayor parte del tiempo, la potencia de la señal que

* High Electron Movement Transistor

sale del demodulador y que contiene la información de la voz debe ser 100 000 veces mayor que potencia del ruido que se le añade.

La relación señal a ruido es la medida de calidad para enlaces analógicos; en una transmisión digital dicha relación no se utiliza, sino que se emplea la probabilidad de error. La señal digital está compuesta por una secuencia de unos y ceros. El ruido al añadirseles a ellos en diferentes etapas del enlace ocasiona que algunos unos y ceros se interpreten mal en el receptor, es decir, que a veces éste se equivoque e interprete a un uno como si fuera un cero, o viceversa. Cuantos más errores cometa el aparato por efecto de superposición del ruido, más difícil es reconstruir la señal en su forma original y, en consecuencia, la calidad del servicio se degrada. La proporción de bits que sean interpretados erróneamente por el demodulador digital, en relación con la secuencia correcta que tenía la señal original, es la medida de calidad del enlace y se conoce como probabilidad de error. Por ejemplo, si por cada 10 000 bits de información demodulada uno de ellos está mal detectado, la probabilidad de error P_e , la cual también puede calcularse con la ecuación (1-6), es de 1/10 000, o sea, tendríamos un BER de 10^{-4} [NER193].

Así como se indicó para las transmisiones analógicas, el estándar o P_e de una transmisión digital depende del tipo de información que se esté transmitiendo y del uso que se le va a dar. Por ejemplo, un canal telefónico digitalizado se considera de muy buena calidad si a la salida del demodulador se recupera con una probabilidad de error de 10^{-4} la mayor parte del tiempo, es decir, no más de un error por cada 10 000 bits de información; en cambio, para un servicio de correo electrónico, de alta velocidad o transferencia de datos entre computadoras, la probabilidad de error no debe pasar de 10^{-8} , es decir, no más de un error por cada cien millones de bits de información recuperada. Según lo anterior, se ve que el demodulador es un bloque muy importante de la cadena de recepción, ya que determina la calidad final del enlace, entregando a su salida la señal original con cierta relación S/N o una probabilidad de error P_e , según el caso. Obviamente, para que el demodulador funcione bien necesita que la señal modulada que entre a él lo haga cuando menos con un nivel mínimo de potencia, en relación con el ruido que lleva consigo. Para diferenciar los cocientes de la potencia de la señal entre el ruido, tanto a la entrada como a la salida del demodulador se utiliza la notación C/N a la entrada y S/N o P_e a la salida; C es la potencia de la señal todavía en forma modulada y N es la potencia del ruido distribuido en todo el ancho de banda de la señal modulada, y el cociente se denomina relación portadora a ruido [NER193]. Generalmente los demoduladores muestran un comportamiento como el mostrado en la figura 2.10 para señales analógicas y 2.11 para señales digitales. Para las especificaciones proporcionadas por el fabricante véase la tabla 3.1.

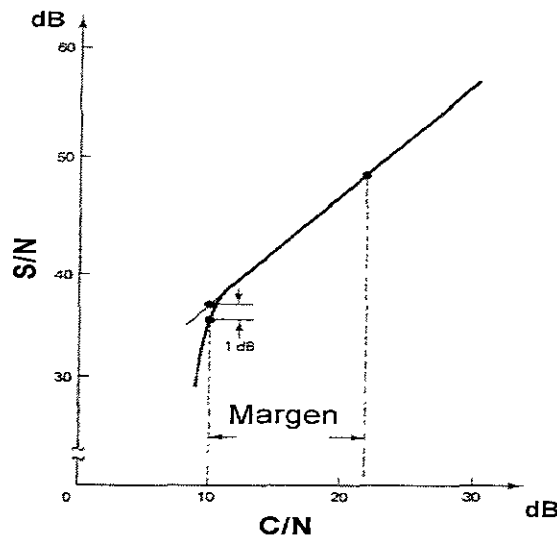


Figura 2.10 Comportamiento de un demodulador de señales analógicas.

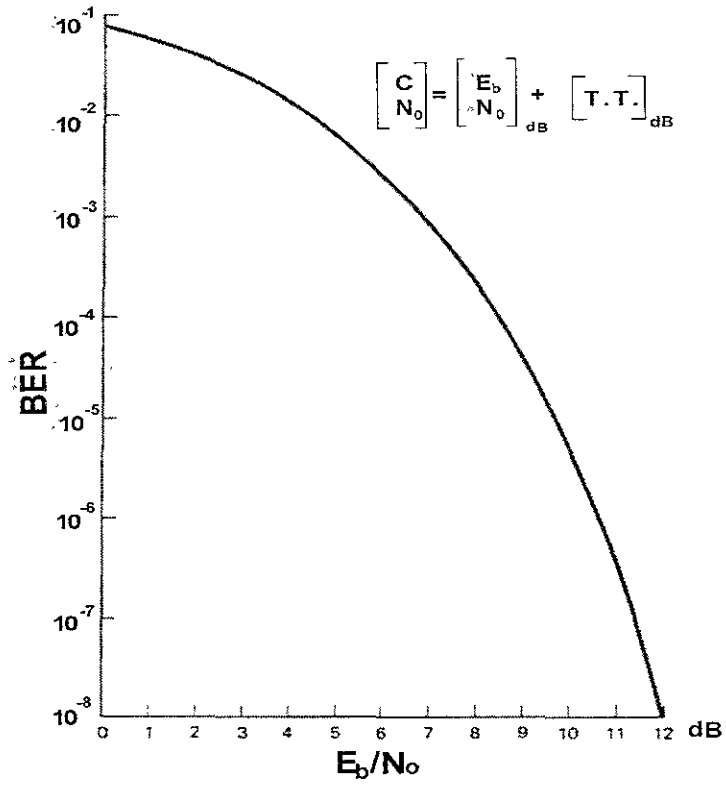


Figura 2.11 Comportamiento de un demodulador digital.

Referencias

Libros

[PRATT93] "Satellite Communications" T. Pratt, John Wiley & Sons, 1993.

[ROS99] "Comunicaciones por Satélite" C. Rosado, Limusa, México, 1999.

[GORD93] "Principles of Communications Satellite" D. Gordon, John Wiley & Sons, 1993.

[NERI93] "Satélites de Comunicaciones" R. Neri, McGraw Hill, México 1993.

[RODY96] "Satellite Communications" D. Roddy, McGraw Hill, 1996.

[MAR93] "Satellite Communications Systems" G. Maral, John Wiley & Sons, 1993.

Internet.

[CLAB] Communications Lab, http://happy.emu.id.au/lab/rep/rep/9510/txtspace/9510_008.htm

CAPÍTULO 3

Equipos disponibles en las bandas Ku y Ka

A continuación se enlistan los modelos y características proporcionados por diversos fabricantes de los elementos considerados como variables dentro del cálculo de enlace en esta tesis.

3.1 Antenas

Las redes VSAT tienen dos configuraciones esenciales, la estrella y la malla, donde la estrella es la más utilizada. Esta configuración implica la existencia de una estación maestra y varias estaciones esclavas. Cabe señalar que las diferentes funciones que desempeña cada tipo de estación tiene una repercusión directa sobre el tipo de equipo que debe utilizar. Así pues, a continuación se muestra la clasificación de las antenas, tanto en banda Ku como en Ka, con sus respectivas divisiones, para estaciones maestras y estaciones esclavas. El parámetro utilizado para la selección de las antenas para cada tipo de estación es el diámetro. Para estaciones esclavas corresponden diámetros de antenas menores a 2.4 metros; las estaciones que requieren mayor ganancia (mayor diámetro) en sus antenas son las maestras, esto es debido a la cantidad de tráfico y portadoras que suelen manejar.

3.1.1 Banda Ku

Estaciones maestras

Tabla 3.1 Antenas de banda Ku encontradas en el mercado para estaciones maestras

FABRICANTE	MODELO	DIÁMETRO [m]	GANANCIA [dB]		FRECUENCIA DE OPERACIÓN [GHz]		TEMP. DE RUIDO [K]	COSTO CON MONTAJE [DLS]
			R _x	T _x	R _x	T _x		
Prodelin	1256 offset	2.4	47.6	49.2	10.95 a 12.75	14.0 a 14.5	44 @ 10° el 32 @ 20° el 28 @ 30° el 27 @ 40° el	2000
Prodelin	1244 offset	2.4	47.6	49.2	10.95 a 12.75	14.0 a 14.5	32 @ 20° el 28 @ 30° el	2571
Prodelin	1251 offset	2.4	47.6	49.2	10.95 a 12.75	13.75 a 14.5	42 @ 10° el 32 @ 20° el 28 @ 30° el 27 @ 40° el	2000
Prodelin	1382 offset	3.8	51.7	53.2	10.95 a 12.75	14.0 a 14.5	29 @ 10° el 21 @ 20° el 20 @ 30° el 19 @ 40° el	12279
Prodelin	1383 offset	3.8	51.7	53.2	10.95 a 12.75	13.75 a 14.5	29 @ 10° el 21 @ 20° el 20 @ 30° el 19 @ 40° el	12643
Prodelin	1388 offset gregorian	3.8	51.7	53.2	10.95 a 12.75	13.75 a 14.5	39 @ 10° el 30 @ 20° el 26 @ 30° el 24 @ 40° el	15464
Andrew	ES76K-1 gregorian	7.6	58.0	59.1	10.7 a 13.25	14.0 a 14.8	55 @ 10° el 41 @ 30° el 36 @ 50° el	56000
Andrew	ES65-1 gregorian	6.5	56.5	57.4	10.7 a 13.25	14.0 a 14.8	48 @ 10° el 33 @ 30° el 31 @ 50° el	33000
Andrew	ES56-1 gregorian	5.6	55.5	57.0	10.7 a 13.25	12.750 a 14.8	96 @ 10° el 64 @ 30° el 59 @ 50° el	37700
Andrew	ES46M-1 gregorian	4.6	53.9	55.0	10.7 a 13.25	14.0 a 14.8	49 @ 10° el 38 @ 30° el 36 @ 50° el	23600

Andrew	ES39MPJ K-1 gregorian	3.9	51.9	53.1	10.7 a 13.25	14.0 a 14.8	41 @ 10° el 27 @ 30° el 25 @ 50° el	22300
Andrew	EES37MPJ K-1 gregorian	3.7	51.6	52.7	10.7 a 13.25	13.75 a 14.8	52 @ 10° el 39 @ 30° el 37 @ 50° el	21950

Estaciones esclavas

Tabla 3.2 Antenas de banda Ku encontradas en el mercado para estaciones esclavas

FABRICANTE	MODELO	DIÁMETRO [m]	GANANCIA [dB _i]		FRECUENCIA DE OPERACIÓN [GHz]		TEMP. DE RUIDO [K]	COSTO CON MONTAJE [DLS]
			R _x	T _x	R _x	T _x		
Prodelin	1184 offset	1.8	45	46.5	10.95 a 12.75	14.0 a 14.5	44 @ 10° el 38 @ 20° el 35 @ 30° el 33 @ 40° el	671
Prodelin	1194 offset	1.8	45.2	46.7	10.95 a 12.75	13.75 a 14.5	38 @ 20° el 35 @ 30° el	764
Prodelin	1134 offset	1.2	41.5	43.0	10.95 a 12.75	13.75 a 14.5	45 @ 20° el 43 @ 30° el	413
Prodelin	1123 1125 offset	1.2	41.7	43.2	10.95 a 12.75	14.0 a 14.5	49 @ 20° el 43 @ 30° el	307
Prodelin	1185 offset	1.8	45.0	46.5	10.95 a 12.75	14.0 a 14.5	49 @ 10° el 38 @ 20° el 35 @ 30° el 34 @ 40° el	720
Prodelin	1951 offset elíptica	0.95	39.7	41.2	10.95 a 12.75	13.75 a 14.5	43 @ 20° el 41 @ 30° el	264
Prodelin	1981 offset	0.98	39.8	41.3	10.95 a 12.75	13.75 a 14.5	47 @ 20° el 46 @ 30° el	356

3.1.2 Banda Ka

Estaciones maestras

Tabla 3.3 Antenas en la banda Ka encontradas en el mercado para estaciones maestras.

FABRICANTE	MODELO	DIÁMETRO [m]	GANANCIA [dB _i]		FRECUENCIA DE OPERACIÓN [GHz]		TEMP. DE RUIDO [K]	COSTO CON MONTAJE [DLS]
			R _x	T _x	R _x	T _x		
Andrew	ES56 KA-1 gregorian	5.6	59.2	62.0	17.7 a 21.2	27.5 a 30.0	96 @ 10° el 64 @ 30° el 59 @ 50° el	126670

Estaciones esclavas

Tabla 3.4 Antenas en la banda Ka encontradas en el mercado para estaciones esclavas.

FABRICANTE	MODELO	DIÁMETRO [m]	GANANCIA [dB _i]		FRECUENCIA DE OPERACIÓN [GHz]		TEMP. DE RUIDO [K]	COSTO CON MONTAJE [DLS]
			R _x	T _x	R _x	T _x		
Prodalin	3067	0.67	41.0	44.5	19.7 a 20.2	29.5 a 30.0	47 @ 20° el 44 @ 30° el	150
Prodalin	3098	0.98	44.3	47.8	19.7 a 20.2	29.5 a 30.0	45 @ 20° el 42 @ 30° el	400
Prodalin	3120	1.2	46.1	49.5	19.7 a 20.2	29.5 a 30.0	44 @ 20° el 41 @ 30° el	455
Q-par Angus	610mm Cassegrain	0.61	37	43	18	40	43 @ 20° el 39 @ 30° el	140

Nota: Nótese que hay una gran diferencia de precios entre las antenas de 5.6 m de banda Ku y Ka. Las fuentes consultadas no parecen indicar que se incluyan otras cosas más que la antena y el montaje, de modo que, según nuestro criterio, la explicación de tal diferencia de costo puede deberse a los dos puntos siguientes:

- En la banda Ka a una frecuencia de 30 GHz su longitud de onda mide 1 cm. Considerando que la superficie del reflector parabólico y la del subreflector debe aproximarse lo mejor posible a un acabado liso sin irregularidades importantes, una alteración de $\lambda/10$ significaría la necesidad de fabricar la antena con precisión de 1 mm, de tal manera que la eficiencia no se degrade.
- Las redes VSAT en la banda Ku son muy populares actualmente, además de que la precisión de la superficie no es tan estricta, el hecho de fabricar cientos de tales antenas permite reducir el costo unitario, en cambio, la banda Ka apenas comienza a ser utilizada y los costos de manufactura junto con el número limitado de piezas, pueden ser la causa de que su precio unitario sea tan elevado. Sin embargo, es posible que conforme la banda Ka se utilice para las redes VSAT, con el lanzamiento del ANIK F2 en el 2002 el costo unitario decrezca.

3.2 HPA

Al igual que las antenas, los amplificadores de potencia también son diferentes para cada tipo de estación. Para las estaciones maestras se tienen TWT o Klystron, debido a que estas estaciones requieren de mayor potencia de salida por el múltiple manejo de portadoras, mientras que las estaciones esclavas pueden utilizar potencias medias para la transmisión, es por esto que generalmente utilizan amplificadores de estado sólido o SSPA. Por lo tanto, a continuación se muestra el equipo de las bandas Ku y Ka con la clasificación antes mencionada.

3.2.1 Banda Ku

Estaciones maestras

Tabla 3.5 Amplificadores de Alta Potencia en la banda Ku encontrados en el mercado para estaciones maestras.

FABRICANTE	MODELO	TIPO	FREC [GHz]	B.W. [MHz]	GANANCIA [dB]	POTENCIA MAXIMA [Watts]	COSTO [DLS]
NEC	LD4447	TWT	14.0 a 14.5	500	70	130	35410
NEC	LD7213	TWT	14.0 a 14.5	500	75	300	44850
NEC	LD7213L	TWT	13.75 a 14.5	750	75	300	45000
NEC	LD7241	TWT	12.75 a 13.25	500	75	300	44900
NEC	Thomson	TWT	13.75 a 14.5	750	75	750	69840
XICOM	XT-100K	TWT	13.75 a 14.5	750	46	125	45100
XICOM	XT-200K	TWT	13.75 a 14.5	750	46	200	39300
XICOM	XT-400	TWT	14.0 a 14.5	500	70	325	46240
XICOM	XT-450TLW	TWT	14.0 a 14.5	500	70	325	46290
XICOM	XT-50T1	TWT	14.0 a 14.5	500	51	70	30050
XICOM	XT-100T	TWT	14.0 a 14.5	500	51	95	33000
XICOM	XT-80K	TWT	14.0 a 14.5	500	50	80	32500

XICOM	XTD-400K	TWT	13.75 a 14.5	750	75	400	50500
XICOM	XTD-450TLP	TWT	14.0 a 14.5	500	69	325	46100
XICOM	XTD-750K	TWT	13.75 a 14.5	750	75	750	70000
XICOM	XTK-2000K	Klystron	14.0 a 14.5	85	80	2450	69000
XICOM	XTK-2000K1	Klystron	13.75 a 14.5	85	80	2450	70000
XICOM	XTK-2000K2	Klystron	14.5 a 14.8	85	80	2450	68500
XICOM	XTK-2000K3	Klystron	12.75 a 13.25	80	80	2200	67000
XICOM	XTRD-100T	TWT	14.0 a 14.5	500	65	95	33400
XICOM	XTRD-400T1	TWT	14.0 a 14.5	500	62	325	46000
XICOM	XTRD-200K Ku	TWT	13.75 a 14.5	750	75	125	36000
XICOM	XTRD-200K	TWT	13.75 a 14.5	750	75	200	40050
XICOM	XTRD-400K	TWT	13.75 a 14.5	750	75	400	50750
XICOM	XTRD-750K	TWT	13.75 a 14.5	750	75	750	70100
VERTEXrsi	2100 TTRI	TWT	14.0 a 14.5	500	20	270	60000
VERTEXrsi	2100TK	TWT	13.75 a 14.5	750	75	340	47071
VERTEXrsi	2100T Hub	TWT	13.75 a 14.5	750	70	340	47071
VERTEXrsi	2100TK	TWT	13.75 a 14.5	750	75	650	64286
VERTEXrsi	2100KKU	Klystron	13.75 a 14.5	80	80	2500	68357

Estaciones esclavas

3.6 Amplificadores de Alta Potencia en la banda Ku encontrados en el mercado para estaciones esclavas.

FABRICANTE	MODELO	TIPO	FREC [GHz]	B.W. [MHz]	GANANCIA [dB]	POTENCIA MAXIMA [Watts]	COSTO [DLLS]
Advantech	ARSA-K20	SSPA	14.0 a 14.5	500	55	20	8000
Advantech	ARSA-K25	SSPA	14.0 a 14.5	500	55	25	12427
Advantech	ARSA-K30	SSPA	14.0 a 14.5	500	55	30	22725
Advantech	ARSA-K40	SSPA	14.0 a 14.5	500	60	40	30500

Advantech	ARSA-K50	SSPA	14.0 a 14.5	500	60	50	35000
Advantech	ARSA-K60	SSPA	14.0 a 14.5	500	60	60	37500
Advantech	ARSA-K80	SSPA	14.0 a 14.5	500	60	80	42798
Advantech	ARSA-K100	SSPA	14.0 a 14.5	500	60	100	46300
Advantech	ARSA-K125	SSPA	14.0 a 14.5	500	60	125	50222
MICROWAVE CO.	K1414 40 OD	SSPA	14.0 a 14.5	500	56	40	28700
MICROWAVE CO.	K1414 50 OD	SSPA	14.0 a 14.5	500	57	50	33500
MICROWAVE CO.	K1414 25 OD	SSPA	14.0 a 14.5	500	56	25	12500
MICROWAVE CO.	K1414 125 OD	SSPA	14.0 a 14.5	500	60	125	51000
MICROWAVE CO.	K1414 100 OD	SSPA	14.0 a 14.5	500	60	100	46400
Microwave - amps	AM2	SSPA	9.0 - 20.0	500	30 - 40	0.5	1100
Microwave - amps	AM46	SSPA	3.5 - 16.0	500	40 - 50	2.0	2250
Microwave - amps	AM65	SSPA	9.5 - 15.0	500	40 - 50	2.0	2200
Microwave - amps	AM56	SSPA	1.7 - 14.5	500	40 - 50	1.0	1470
Microwave - amps	AM52	SSPA	7.0 - 14.0	500	30 - 40	2.0	2150
VERTEXrsi	PKM14S0 40R	SSPA	14.0 a 14.5	500	56	40	23873
VERTEXrsi	PKO14S0 40R	SSPA	13.75 a 14.5	750	56	40	25786
VERTEXrsi	PKM14S0 80R	SSPA	14.0 a 14.5	500	58	80	45386
VERTEXrsi	PKO14S0 80R	SSPA	13.75 a 14.5	750	58	80	49019
VERTEXrsi	PKM14S0 50R	SSPA	14.0 a 14.5	500	56	50	27386
VERTEXrsi	PKM14S1 00R	SSPA	14.0 a 14.5	500	58	100	53314
VERTEXrsi	PKM14S2 00R	SSPA	14.0 a 14.5	500	75	200	109671
VERTEXrsi	PKM14S0 20R	SSPA	14.0 a 14.5	500	50	20	14944
VERTEXrsi	PKO14S0 20R	SSPA	13.75 a 14.5	750	50	20	16143
RF Amplifiers	HD12506	SSPA	12.0 a 18.0	500	25	0.02	980
RF Amplifiers	HD12507	SSPA	12.0 a 18.0	500	31	0.03	1153
RF Amplifiers	HD12508	SSPA	12.0 a 18.0	500	37	0.03	1227

3.2.2 Banda Ka

Estaciones maestras

Tabla 3.7 Amplificadores de Alta Potencia en la banda Ka encontrados en el mercado para estaciones maestras.

FABRICANTE	MODELO	TIPO	FREC [GHz]	B.W. [MHz]	GANANCIA [dB]	POTENCIA MAXIMA [Watts]	COSTO [DLLS]
XICOM	XTD-120Ka	TWT	27.5 a 29.5	750	70	120	150296
XICOM	XTD-150Ka	TWT	27.5 a 29.5	750	70	150	167000
XICOM	XTD-150Ka1	TWT	28.35 a 30.0	750	70	250	210500
XICOM	XTD-250Ka	TWT	28.0 a 31.0	500	40	250	195000
XICOM	XTD-500Ka	TWT	28.0 a 31.0	250	40	500	320000
MILIMETER WAVE	VKA2400 A	Klystron	30.055 a 30.435	400	43	325	200000
MILIMETER WAVE	VKA2400 B	Klystron	30.055 a 30.435	400	43	500	220050
MILIMETER WAVE	VKA2400 C	Klystron	28.250 a 29.600	750	35	750	247100
RF Amplifiers	HD18343	TWT	27.5 a 30.0	750	52	120	150000
RF Amplifiers	HD18344	TWT	27.5 a 30.0	750	53	150	165000
RF Amplifiers	HD18337	TWT	26.5 a 40.0	750	40	10	102500
RF Amplifiers	HD18338	TWT	26.5 a 40.0	750	44	25	105000
RF Amplifiers	HD18339	TWT	26.5 a 40.0	750	46	40	107500
RF Amplifiers	HD18340	TWT	26.5 a 40.0	750	47	50	121250

Estaciones esclavas

Tabla 3.8 Amplificadores de Alta Potencia en la banda Ka encontrados en el mercado para estaciones esclavas.

FABRICANTE	MODELO	TIPO	FREC [GHz]	B.W. [MHz]	GANANCIA [dB]	POTENCIA MAXIMA [Watts]	COSTO [DLLS]
SPACEK LABS INC.	SP2412-15-23	SSPA	18.0 a 30.0	500	15	0.25	1800
SPACEK LABS INC.	SP2412-15-27	SSPA	18.0 a 30.0	500	15	0.5	2300
SPACEK LABS INC.	SP268-20-29	SSPA	22.0 a 30.0	500	20	0.9	3100
SPACEK LABS INC.	SP276-18-23	SSPA	24.0 a 30.0	500	18	0.25	2100
SPACEK LABS INC.	SP270-18-27	SSPA	24.0 a 30.0	500	18	0.5	3100

SPACEK LABS INC.	SP336-18-23	SSPA	30.0 a 36.0	500	18	0.25	2600
NEWTEC	2509ca	SSPA	29.5 a 30.0	500	47	0.5	2587
NEWTEC	2509cb	SSPA	29.5 a 30.0	500	50	1.0	3350
NEWTEC	2509cc	SSPA	29.5 a 30.0	500	73	2.0	4800
NEWTEC	2509ga	SSPA	29.5 a 30.0	500	52	0.5	2630
NEWTEC	2509gb	SSPA	29.5 a 30.0	500	55	1.0	3400
NEWTEC	250955	SSPA	29.5 a 30.0	500	55	1.0	3400
RF Amplifiers	HD18333	SSPA	26.5 a 40.0	500	40	10	10800

3.3 LNA

3.3.1 Banda Ku

Tabla 3.9 Amplificadores de Bajo Ruido en la banda Ku encontrados en el mercado.

FABRICANTE	MODELO (tipo de enfriamiento)	RANGO DE FRECUENCIAS [GHz]	GANANCIA [dB]	TEMPERATURA DE RUIDO [K]	FIGURA DE RUIDO [Db]	COSTO [DLLS]
Microwave Amplifiers	AL16	7.0 a 18.0	20 - 30	170	2.0	1450
Microwave Amplifiers	AL18	8.0 a 15.0	20	120	1.5	1500
VERTEXrsi	LKR12S90	10.7 a 12.75	63	90	1.2	1771
VERTEXrsi	LKR12S80	10.7 a 12.75	64	80	1.1	2433
VERTEXrsi	LKR12S70	10.7 a 12.75	-	70	0.9	3214
SATELLINK	SHA1185 20M (sin enfriamiento)	10.9 a 12.7	20	75	1.0	3,990
JCA	1218-200	12.0 a 18.0	10	316	3.2	2000
JCA	1218-300	12.0 a 18.0	20	263	2.8	2300
JCA	1218-400	12.0 a 18.0	28	263	2.8	2380
JCA	1218-500	12.0 a 18.0	35	263	2.8	2425
JCA	1218-600	12.0 a 18.0	42	263	2.8	2560
JCA	1218-700	12.0 a 18.0	48	263	2.8	2610
JCA	714-201	7.0 a 14.0	14	627	5.0	1100
JCA	714-202	7.0 a 14.0	16	627	5.0	1130
JCA	714-203	7.0 a 14.0	15	627	5.0	1115
JCA	714-301	7.0 a 14.0	21	438	4.0	1200
JCA	714-302	7.0 a 14.0	24	438	4.0	1255
JCA	714-303	7.0 a 14.0	23	438	4.0	1230
JCA	714-401	7.0 a 14.0	29	438	4.0	1270
JCA	714-402	7.0 a 14.0	30	438	4.0	1280
JCA	714-403	7.0 a 14.0	28	438	4.0	1265
JCA	714-501	7.0 a 14.0	35	438	4.0	1515
JCA	714-502	7.0 a 14.0	34	438	4.0	1302

JCA	714-503	7.0 a 14.0	34	438	4.0	1304
JCA	816-201	8.0 a 16.0	18	627	5.0	1140
JCA	816-202	8.0 a 16.0	16	627	5.0	1135
JCA	816-203	8.0 a 16.0	17	627	5.0	1142
JCA	816-301	8.0 a 16.0	25	527	4.5	1190
JCA	816-302	8.0 a 16.0	24	527	4.5	1188
JCA	816-303	8.0 a 16.0	22	527	4.5	1173
JCA	816-401	8.0 a 16.0	31	438	4.0	1290
JCA	816-402	8.0 a 16.0	31	473	4.2	1210
JCA	816-403	8.0 a 16.0	30	473	4.2	1205
JCA	816-501	8.0 a 16.0	38	438	4.0	1350
JCA	816-502	8.0 a 16.0	37	473	4.2	1220
JCA	816-503	8.0 a 16.0	36	473	4.2	1230

3.3.2 Banda Ka

Tabla 3.10 Amplificadores de Bajo Ruido en la banda Ka encontrados en el mercado.

FABRICANTE	MODELO	RANGO DE FRECUENCIAS [GHz]	GANANCIA [dB]	TEMPERATURA DE RUIDO [K]	FIGURA DE RUIDO [dB]	COSTO [DLLS]
Microwave Amplifiers	AL18	18 a 20	20	170	2.0	5000
MITEQ	JSD4 18002600 19 8P	18 a 26	35	159	1.9	4500
MITEQ	JSD4 18002600 21 8P	18 a 26	35	180	2.1	3175
MITEQ	JSD4 18002600 26 8P	18 a 26	35	238	2.6	1750
MITEQ	JSD3 1800 2600 21 8P	18 a 26	25	180	2.1	4200
MITEQ	JSD3 1800 2600 25 8P	18 a 26	25	226	2.5	2950
MITEQ	JSD3 1800 2600 30 8P	18 a 26	25	289	3.0	1500
SATELLINK	SHA2000 18M (sin enfriamiento)	19.5 a 20.5	18	120	1.5	9,990
SATELLINK	SHAC2000 31M (sin enfriamiento)	19.5 a 20.0	30	101	1.3	29,500
SPACEK LABS INC.	SLKKa-12-6	18.0 a 40.0	12	627	5.0	1900
SPACEK LABS INC.	SLKKa-30-6	18.0 a 40.0	30	627	5.0	2400
SPACEK LABS INC.	SLKKa-30-6W	18.0 a 40.0	30	627	5.0	2650

SPACEK LABS INC.	SL224-18-3	20.0 a 24.0	18	149	1.8	1600
SPACEK LABS INC.	SL224-18-3W	20.0 a 24.0	18	160	1.9	1850
SPACEK LABS INC.	SL224-35-3W	20.0 a 24.0	35	160	1.9	2600
JCA	1224-300	12.0 a 24.0	15	406	3.8	1300
JCA	1224-400	12.0 a 24.0	20	406	3.8	1325
JCA	1224-500	12.0 a 24.0	25	406	3.8	1370
JCA	1224-600	12.0 a 24.0	30	406	3.8	1410
JCA	1826-300	18.0 a 26.0	15	438	4.0	1150
JCA	1826-400	18.0 a 26.0	20	438	4.0	1180
JCA	1826-500	18.0 a 26.0	25	438	4.0	1210
JCA	1826-600	18.0 a 26.0	30	438	4.0	1260

3.4 Demoduladores

Tabla 3.11 Demoduladores MPSK encontrados en el mercado.

FABRICANTE	MODELO	TIPO DE MODULACIÓN	POTENCIA DE PORTADORA DESEADA [DBM]	RANGO DE TASAS DE TRANSMISIÓN	FEC	$\frac{E_b}{N_0}$ PARA QPSK	COSTO [DLS]
Comtech	VLM-7650	BPSK QPSK OQPSK 8PSK 16QAM	-15 a -55	9.6 Kbps a 20.0 Mbps	1/2	4.2 @ 10 ⁻⁷ BER 4.8 @ 10 ⁻⁴ BER 5.5 @ 10 ⁻⁵ BER 6.1 @ 10 ⁻⁶ BER 6.7 @ 10 ⁻⁷ BER 7.2 @ 10 ⁻⁸ BER	35700
					1/4	5.2 @ 10 ⁻⁷ BER 6.0 @ 10 ⁻⁴ BER 6.7 @ 10 ⁻⁵ BER 7.5 @ 10 ⁻⁶ BER 8.2 @ 10 ⁻⁷ BER 8.8 @ 10 ⁻⁸ BER	
					7/8	6.4 @ 10 ⁻⁷ BER 7.2 @ 10 ⁻⁴ BER 7.9 @ 10 ⁻⁵ BER 8.6 @ 10 ⁻⁶ BER 9.2 @ 10 ⁻⁷ BER 9.9 @ 10 ⁻⁸ BER	
Comtech	VLM-3650	BPSK QPSK OQPSK 8PSK	-15 a -55	2.4 Kbps a 5 Mbps	1/2	4.2 @ 10 ⁻⁷ BER 4.8 @ 10 ⁻⁴ BER 5.5 @ 10 ⁻⁵ BER 6.1 @ 10 ⁻⁶ BER 6.7 @ 10 ⁻⁷ BER 7.2 @ 10 ⁻⁸ BER	4015
					1/4	5.2 @ 10 ⁻⁷ BER 6.0 @ 10 ⁻⁴ BER 6.7 @ 10 ⁻⁵ BER 7.5 @ 10 ⁻⁶ BER 8.2 @ 10 ⁻⁷ BER 8.8 @ 10 ⁻⁸ BER	

					$\frac{7}{8}$	6.4 @ 10^{-3} BER 7.2 @ 10^{-4} BER 7.9 @ 10^{-5} BER 8.6 @ 10^{-6} BER 9.2 @ 10^{-7} BER 9.9 @ 10^{-8} BER	
Comtech	SLM-8650	BPSK QPSK OQPSK	-30 a -55 (≤ 2 Mbps) -30 a -45 (> 2 Mbps)	4.8 Kbps a 9.312 Mbps	$\frac{1}{2}$	4.2 @ 10^{-3} BER 4.8 @ 10^{-4} BER 5.5 @ 10^{-5} BER 6.1 @ 10^{-6} BER 6.7 @ 10^{-7} BER 7.2 @ 10^{-8} BER	8800
					$\frac{3}{4}$	5.2 @ 10^{-3} BER 6.0 @ 10^{-4} BER 6.7 @ 10^{-5} BER 7.5 @ 10^{-6} BER 8.2 @ 10^{-7} BER 8.8 @ 10^{-8} BER	
					$\frac{7}{8}$	6.4 @ 10^{-3} BER 7.2 @ 10^{-4} BER 7.9 @ 10^{-5} BER 8.6 @ 10^{-6} BER 9.2 @ 10^{-7} BER 9.9 @ 10^{-8} BER	
Comtech	SLM-7650	BPSK QPSK OQPSK 8PSK 16QAM	-15 a -55	9.6 Kbps a 20.0 Mbps	$\frac{1}{2}$	4.2 @ 10^{-3} BER 4.8 @ 10^{-4} BER 5.5 @ 10^{-5} BER 6.1 @ 10^{-6} BER 6.7 @ 10^{-7} BER 7.2 @ 10^{-8} BER	35700
					$\frac{3}{4}$	5.2 @ 10^{-3} BER 6.0 @ 10^{-4} BER 6.7 @ 10^{-5} BER 7.5 @ 10^{-6} BER 8.2 @ 10^{-7} BER 8.8 @ 10^{-8} BER	
					$\frac{7}{8}$	6.4 @ 10^{-3} BER 7.2 @ 10^{-4} BER 7.9 @ 10^{-5} BER 8.6 @ 10^{-6} BER 9.2 @ 10^{-7} BER 9.9 @ 10^{-8} BER	
Comtech	SLM-3650	BPSK QPSK OQPSK 8PSK	-15 a -55	2.4 Kbps a 5.9 Mbps	$\frac{1}{2}$	3.8 @ 10^{-3} BER 4.6 @ 10^{-4} BER 5.3 @ 10^{-5} BER 6.0 @ 10^{-6} BER 6.6 @ 10^{-7} BER 7.2 @ 10^{-8} BER	4750
					$\frac{3}{4}$	4.9 @ 10^{-3} BER 5.7 @ 10^{-4} BER 6.4 @ 10^{-5} BER 7.2 @ 10^{-6} BER 7.9 @ 10^{-7} BER 8.5 @ 10^{-8} BER	
					$\frac{7}{8}$	6.1 @ 10^{-3} BER 6.9 @ 10^{-4} BER 7.6 @ 10^{-5} BER 8.3 @ 10^{-6} BER 8.9 @ 10^{-7} BER 9.6 @ 10^{-8} BER	
Comtech	SDM-9000	QPSK 8PSK 16QAM	-4.5 a -25	6 Mbps a 13 Mbps	$\frac{1}{2}$	7.2 @ 10^{-8} BER	30500
					$\frac{3}{4}$	8.8 @ 10^{-8} BER	
					$\frac{7}{8}$	6.3 @ 10^{-3} BER 7.0 @ 10^{-4} BER 7.8 @ 10^{-5} BER 8.6 @ 10^{-6} BER 9.3 @ 10^{-7} BER 9.9 @ 10^{-8} BER	

Comtech	SDM-8000	BPSK QPSK 8PSK 16QAM	-30 a -55 (≤ 2 Mbps) -30 a -45 (> 2 Mbps)	4.8 Kbps a 9.312 Mbps	1/2	4.2 @ 10^{-3} BER 4.8 @ 10^{-4} BER 5.5 @ 10^{-5} BER 6.1 @ 10^{-6} BER 6.7 @ 10^{-7} BER 7.2 @ 10^{-8} BER	9000
					3/4	5.2 @ 10^{-3} BER 6.0 @ 10^{-4} BER 6.7 @ 10^{-5} BER 7.5 @ 10^{-6} BER 8.2 @ 10^{-7} BER 8.8 @ 10^{-8} BER	
					7/8	6.4 @ 10^{-3} BER 7.2 @ 10^{-4} BER 7.9 @ 10^{-5} BER 8.6 @ 10^{-6} BER 9.2 @ 10^{-7} BER 9.9 @ 10^{-8} BER	
Comtech	SDM-300L	BPSK QPSK OQPSK		19.2 Kbps a 4.375 Mbps	1/2	4.8 @ 10^{-3} BER 5.4 @ 10^{-4} BER 6.0 @ 10^{-5} BER 6.5 @ 10^{-6} BER	4125
					3/4	5.9 @ 10^{-3} BER 6.6 @ 10^{-4} BER 7.2 @ 10^{-5} BER 8.0 @ 10^{-6} BER	
					7/8	5.7 @ 10^{-3} BER 6.3 @ 10^{-4} BER 7.0 @ 10^{-5} BER 7.8 @ 10^{-6} BER 8.4 @ 10^{-7} BER 9.2 @ 10^{-8} BER	
Comtech	SDM-300A	BPSK QPSK 8PSK	-30 a -55	2.4 Kbps a 5.0 Mbps	1/2	4.6 @ 10^{-3} BER 5.3 @ 10^{-4} BER 5.9 @ 10^{-5} BER 6.4 @ 10^{-6} BER	4125
					3/4	6.0 @ 10^{-3} BER 6.8 @ 10^{-4} BER 7.5 @ 10^{-5} BER 8.0 @ 10^{-6} BER	
					7/8	6.1 @ 10^{-3} BER 6.8 @ 10^{-4} BER 7.2 @ 10^{-5} BER 7.9 @ 10^{-6} BER 8.6 @ 10^{-7} BER 9.4 @ 10^{-8} BER	
Comtech	CDM-600	BPSK QPSK OQPSK 8PSK	-30 a -60	4.8 Kbps a 17.5 Mbps	1/2	5.4 @ 10^{-3} BER 6.0 @ 10^{-4} BER 6.7 @ 10^{-5} BER	32500
					3/4	6.8 @ 10^{-3} BER 7.4 @ 10^{-4} BER 8.2 @ 10^{-5} BER	
					7/8	6.2 @ 10^{-3} BER 7.0 @ 10^{-4} BER 7.7 @ 10^{-5} BER 8.4 @ 10^{-6} BER 9.0 @ 10^{-7} BER 9.6 @ 10^{-8} BER	
Comtech	CDM-550	BPSK QPSK OQPSK	-30 a -60	4.8 Kbps a 2.048 Mbps	1/2	5.4 @ 10^{-3} BER 6.0 @ 10^{-4} BER 6.7 @ 10^{-5} BER	2575
					3/4	6.8 @ 10^{-3} BER 7.4 @ 10^{-4} BER 8.2 @ 10^{-5} BER	

					$\frac{7}{8}$	6.2 @ 10^{-7} BER 7.0 @ 10^{-4} BER 7.7 @ 10^{-5} BER 8.4 @ 10^{-6} BER 9.0 @ 10^{-7} BER 9.6 @ 10^{-8} BER	
Comtech	BEM-7650	BPSK QPSK OQPSK 8PSK 16QAM	-15 a -55	9.6 Kbps a 20.0 Mbps	$\frac{1}{2}$	4.2 @ 10^{-3} BER 4.8 @ 10^{-4} BER 5.5 @ 10^{-5} BER 6.1 @ 10^{-6} BER 6.7 @ 10^{-7} BER 7.2 @ 10^{-8} BER	35700
					$\frac{3}{4}$	5.2 @ 10^{-3} BER 6.0 @ 10^{-4} BER 6.7 @ 10^{-5} BER 7.5 @ 10^{-6} BER 8.2 @ 10^{-7} BER 8.8 @ 10^{-8} BER	
					$\frac{7}{8}$	6.4 @ 10^{-3} BER 7.2 @ 10^{-4} BER 7.9 @ 10^{-5} BER 8.6 @ 10^{-6} BER 9.2 @ 10^{-7} BER 9.9 @ 10^{-8} BER	
Comtech		BPSK QPSK 8PSK 16QAM	-30 a -55 (≤ 2 Mbps) -30 a -45 (> 2 Mbps)	4.8 Kbps a 9.312 Mbps	$\frac{1}{2}$	4.2 @ 10^{-3} BER 4.8 @ 10^{-4} BER 5.5 @ 10^{-5} BER 6.1 @ 10^{-6} BER 6.7 @ 10^{-7} BER 7.2 @ 10^{-8} BER	9000
					$\frac{3}{4}$	5.2 @ 10^{-3} BER 6.0 @ 10^{-4} BER 6.7 @ 10^{-5} BER 7.5 @ 10^{-6} BER 8.2 @ 10^{-7} BER 8.8 @ 10^{-8} BER	
					$\frac{7}{8}$	6.4 @ 10^{-3} BER 7.2 @ 10^{-4} BER 7.9 @ 10^{-5} BER 8.6 @ 10^{-6} BER 9.2 @ 10^{-7} BER 9.9 @ 10^{-8} BER	
Radyne ComStream	CM601A	QPSK	-20 a -45	9.6 Kbps a 2.5 Mbps	$\frac{1}{2}$	6.5 @ 10^{-7} BER	2150
					$\frac{3}{4}$	8.0 @ 10^{-7} BER	
Radyne ComStream	CM701A	BPSK QPSK	-10 a -55	9.6 Kbps a 4.375 Mbps	$\frac{1}{2}$	6.6 @ 10^{-3} BER 7.4 @ 10^{-4} BER	4050
					$\frac{3}{4}$	7.0 @ 10^{-7} BER	
Radyne ComStream	CM2401A	BPSK QPSK OQPSK	-40 a -65	9.6 Kbps a 4.375 Mbps	$\frac{1}{2}$	5.7 @ 10^{-3} BER 6.2 @ 10^{-4} BER 6.9 @ 10^{-5} BER 7.5 @ 10^{-6} BER 8.0 @ 10^{-7} BER 8.8 @ 10^{-8} BER	4200
					$\frac{3}{4}$	5.1 @ 10^{-3} BER 6.2 @ 10^{-7} BER	
					$\frac{3}{4}$	6.2 @ 10^{-3} BER 6.7 @ 10^{-7} BER	

					7/8	6.0 @ 10 ⁻¹ BER 6.9 @ 10 ⁻⁴ BER 7.5 @ 10 ⁻⁵ BER 8.5 @ 10 ⁻⁶ BER 8.6 @ 10 ⁻⁷ BER 9.1 @ 10 ⁻⁸ BER	
--	--	--	--	--	-----	--	--

Nota

Los precios sombreados mostrados en las tablas son aproximados mediante una regresión, obtenida por medio de los valores reales (precios sin sombreado) que nos otorgan los fabricantes. Este método de aproximación es necesario debido a que algunas compañías tienen políticas que impiden proporcionar los costos de sus equipos al público en general.

Referencias

Páginas de Internet

[Prodelin] <http://www.tripointglobal.com>

[Nec] <http://www1n.mesh.ne.jp/necomscsd/sat/sat.html>

[Xicom] <http://www.xicomtech.com>

[VertexRSi] <http://www.tripointglobal.com>

[Advantech] <http://www.globalnetworx.com>

[Microwave Co] <http://www.sspamicrowave.com>

[Microwave Amplifiers Ltd] <http://www.maltd.com>

[Millimeter Wave] <http://www.cmp.cpii.com>

[RF Amplifiers] <http://www.rfamplifiers.com>

[Spacek Labs Inc] <http://www.spaceklabs.com>

[Newtec] <http://www.newtec.be>

[Jca] <http://www.jcatech.com>

[Miteq] <http://www.miteq.com>

[Comtech] <http://www.comtechefdata.com>

[Radyne Comstream] <http://www.radynecomstream.com>

[Q-Par Angus Ltd] <http://www.q-par.com>

CAPÍTULO 4

Transpondedores en las bandas Ku y Ka

La gran demanda de servicios de comunicación en los últimos años, en los que se encuentran los servicios satelitales, han obligado a la migración hacia nuevas tecnologías. En el caso de los satélites, la gran demanda de servicios afecta principalmente la disponibilidad de frecuencias para dicho servicio, por lo que se han tenido que buscar nuevas alternativas para cubrir la demanda con la utilización de otras bandas de frecuencias.

En la década de los 80's la demanda por servicios satelitales obligó a la industria a migrar de la banda C a la banda Ku, situación que ahora se vive de manera similar con la banda Ka. La escasez de frecuencias en la banda Ku ha orillado a que se estudien otras alternativas donde se puedan encontrar buenos resultados. Es por esto, que durante la última década se han lanzado satélites que operan en la banda Ka para hacer estudios y experimentar, para después obtener resultados y valorar la fiabilidad de utilizar dicha banda; tal es el caso de proyectos como Olympus, DFS Kopernikus y ACTS*. Estos proyectos han mostrado que la introducción de esta banda en los satélites puede ser considerada en futuros sistemas de comunicación satelital; lo que busca esta tesis es apoyar con sus resultados los encontrados en estos proyectos.

En este capítulo se presentan las características de los transpondedores de diferentes satélites en ambas bandas, o en una de ellas según sea el caso.

4.1 Hotbird6.

El satélite Hotbird6 fue construido por el consorcio Alcatel Space de Francia, que fue el principal contratista; además, incluyó a DASA de Alemania y a Alenia Aerospazio de Italia como los principales subcontratistas. Las características principales del satélite se muestran en la tabla 4.1:

* Advanced Communication Technology Satellite

Tabla 4.1 Características del satélite Hotbird6

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Fecha de lanzamiento	Finales de 2001
País de origen	Europa
Misión	Telecomunicaciones
Ubicación	13° E
Vehículo de lanzamiento	Ariane
Masa al lanzamiento	3800 Kg.
Estabilización	3 ejes
Vida estimada	12 años
Bandas	Ku y Ka

4.1.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku.

El Hotbird6 cuenta con 28 transpondedores para la banda Ku; 16 con un ancho de banda de 33 MHz. y 12 de 36 MHz. Estos tienen una cobertura del continente europeo y el norte de África.

En la tabla 4.2 se presentan los transpondedores con la frecuencia central de cada uno, así como también, el tipo de polarización, y si es para el enlace ascendente o descendente.

Tabla 4.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku del Hotbird6.

NUMERO DE TRANSPONDEDOR	POL. HORIZONTAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. HORIZONTAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	ANCHO DE BANDA (MHZ)
115		10.81508		13.78902	33
116	13.80820		10.83426		33
117		10.85344		13.82738	33
116	13.84656		10.87262		33
123		10.97141		14.25066	36
124	14.27141		10.99216		36
125		11.01291		14.29216	36
126	14.31291		11.03366		36
127		11.05441		14.33366	36
128	14.35441		11.07516		36
129		11.09591		14.37516	36
130	14.39591		11.11666		36
131		11.13741		14.41666	36

132	14.43741		11.15816		36
133		11.17891		14.45816	36
134	14.47891		11.19966		36
153		11.56574		14.01918	33
154	14.03836		11.58492		33
155		11.60410		14.05754	33
156	14.07672		11.62328		33
157		11.64246		14.09590	33
158	14.11508		11.66164		33
159		11.68082		14.13426	33
90	14.15344		12.51984		33
91		12.53902		14.17262	33
92	14.19180		12.55820		33
93		12.57738		14.21098	33
94	14.23016		12.59656		33

4.1.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka.

El Hotbird6 cuenta con 4 transpondedores para la banda Ka con un ancho de banda de 72 MHz. cada uno. Estos tienen cobertura en el oeste del continente europeo. En la tabla 4.3 se presentan los 4 transpondedores con la frecuencia central de cada uno, así como también, el tipo de polarización y si es para el enlace ascendente o descendente.

Tabla 4.3 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka del Hotbird6

NUMERO DE TRANSPONDEDOR	POL. HORIZONTAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. HORIZONTAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	ANCHO DE BANDA (MHZ)
K153		19.74800		29.54800	72
K154	29.54800		19.74800		72
K158	29.64200		19.84200		72
K159		19.84200		29.64200	72

4.1.3 Huellas de PIRE y G/T del satélite en la banda Ku.

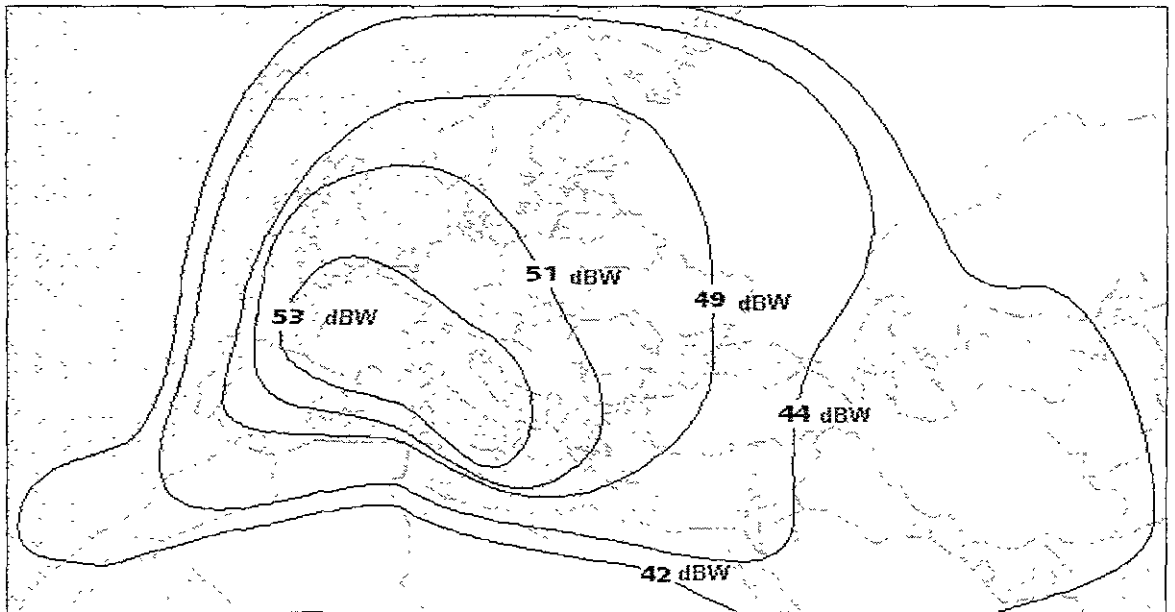


Figura 4.1 Huella de PIRE del satélite Hotbird6 en la banda Ku.

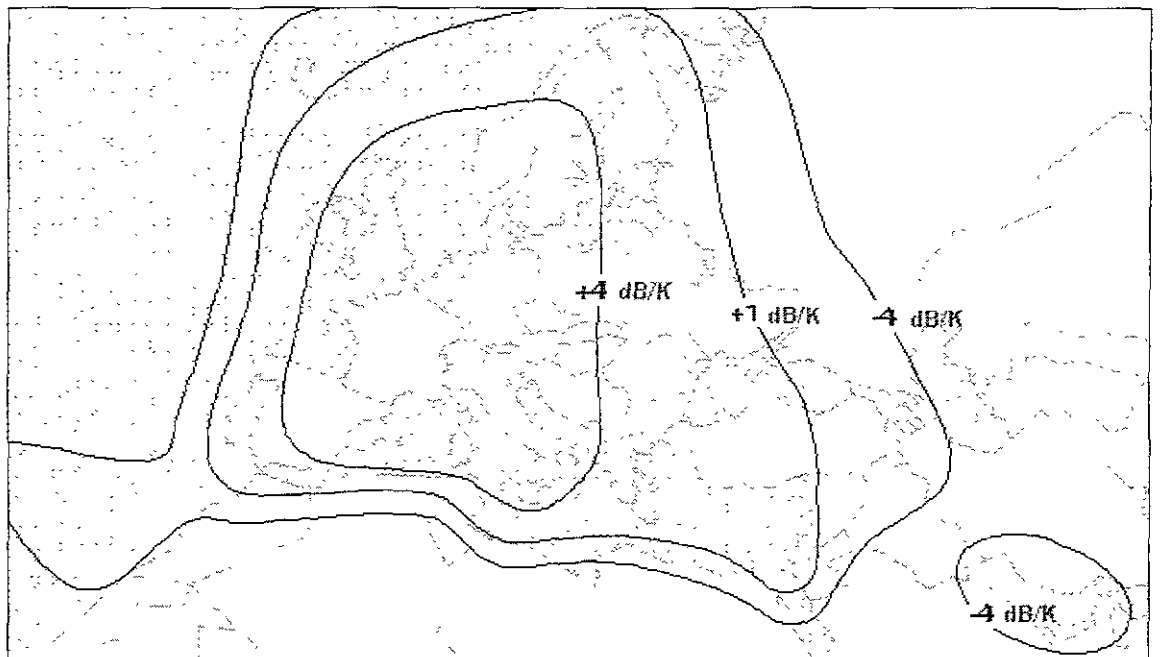


Figura 4.2 Huella de G/T del satélite Hotbird6 en la banda Ku.

4.1.4 Huellas de PIRE y G/T del satélite en la banda Ka.

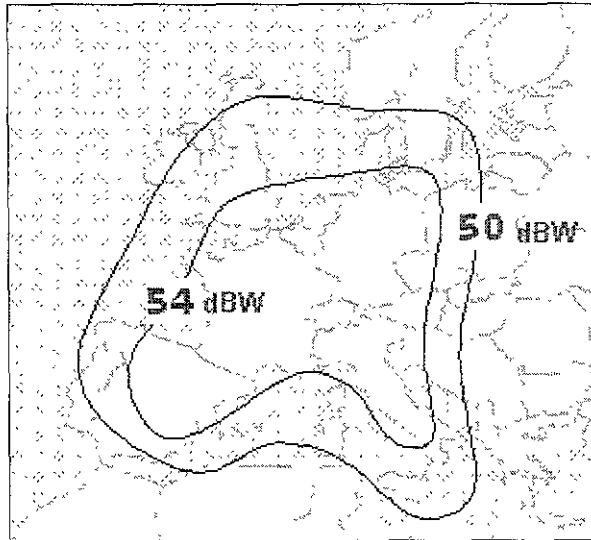


Figura 4.3 Huella de PIRE del satélite Hotbird6 en la banda Ka.

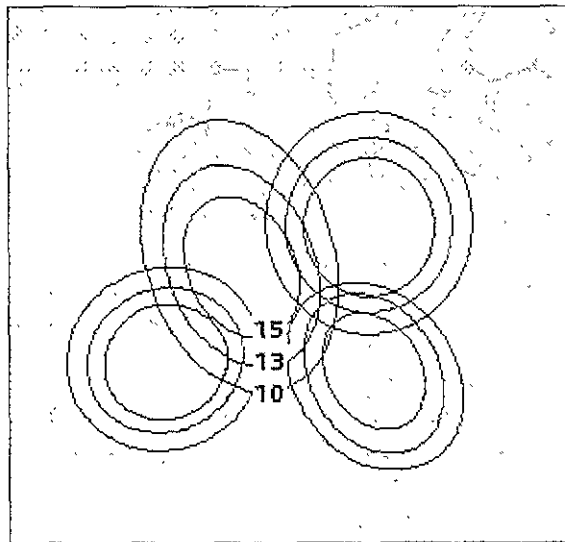


Figura 4.4 Huella de G/T del satélite Hotbird6 en la banda Ka (todos los contornos en $[dB/K]$). Los valores de G/T para los tres contornos de cada huella son los mismos

4.2 DFS3 Kopernikus.

El satélite Kopernikus fue construido por el consorcio R-DFS de Alemania, que fue el principal contratista, además, incluyó a ANT y MMB-ERNO como los principales subcontratistas.

Las características principales del satélite se muestran en la tabla 4.4:

Tabla 4.4 Características del satélite Kopernikus

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Fecha de lanzamiento	12 de octubre de 1992
País de origen	Alemania
Misión	Telecomunicaciones
Ubicación	23.5° E
Vehículo de lanzamiento	Delta 2 #215
Masa al lanzamiento	1415 Kg.
Estabilización	3 ejes
Vida estimada	10 años

4.2.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku.

El DFS3 Kopernikus cuenta con 10 transpondedores para la banda Ku; 3 con un ancho de banda de 72MHz. y 7 de 36 MHz. Estos tienen cobertura nacional(Alemania).

En la tabla 4.5 se presentan los transpondedores con la frecuencia central de cada uno, así como también el tipo de polarización y si es para el enlace ascendente o descendente.

Tabla 4.5 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku del Kopernikus

NUMERO DE TRANSPONDEDOR	POL. HORIZONTAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. HORIZONTAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	ANCHO DE BANDA (MHZ)
A		11.50000		14.30000	72
B	14.37500		11.57500		72
C		11.65000		14.45000	72
K1	14.02450		12.52450		36
K2		12.55800		14.05800	36
K3	14.09150		12.59100		36
K4		12.62500		14.12500	36
K5	14.15850		12.65850		36
K6		12.69200		14.19200	36
K7	14.22550		12.72550		36

4.2.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka.

El Kopernikus cuenta con un transpondedor para la banda Ka con un ancho de banda de 72 MHz. Éste tienen cobertura nacional (Alemania).

En la tabla 4.6 se presentan el transpondedor con su frecuencia central, así como también, el tipo de polarización y si es para el enlace ascendente o descendente.

Tabla 4.6 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka del Kopernikus

NUMERO DE TRANSPONDEDOR	POL. HORIZONTAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (MHZ)	POL. HORIZONTAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (MHZ)	POL. VERTICAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (MHZ)	POL. VERTICAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (MHZ)	ANCHO DE BANDA (MHZ)
K8		19.78000		29.58000	72

4.2.3 Huella de PIRE en la banda Ku.

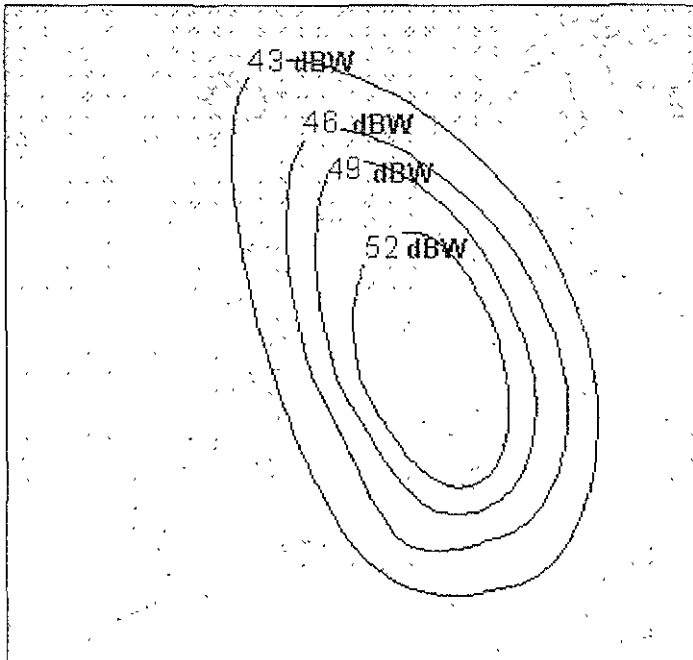


Figura 4.5 Huella de PIRE del satélite DFS Kopernikus en la banda Ku.

No se da información sobre las características en la banda Ka, debido a que el transpondedor era de fines experimentales.

4.3 Italsat2.

El satélite Italsat2 fue construido por el consorcio Alcatel Space de Francia, que fue el principal contratista, además, incluyó a DASA de Alemania y a Alenia Aerospazio de Italia como los principales subcontratistas.

Las características principales del satélite se muestran en la tabla 4.7:

Tabla 4.7 Características del satélite

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Fecha de lanzamiento	8 de agosto de 1996
País de origen	Italia
Misión	Telecomunicaciones
Ubicación	16.4° E
Vehículo de lanzamiento	Ariane V90
Masa al lanzamiento	1983 Kg.
Estabilización	3 ejes
Vida estimada	8 años
Banda	Ku y Ka

4.3.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka.

El Italsat2 cuenta con 9 transpondedores para la banda Ka; 3 con un ancho de banda de 72 MHz. cada uno y 6 con un ancho de banda de 110 MHz. En ambos, se tiene cobertura nacional.

4.3.2 Huellas de PIRE del satélite en la banda Ka.

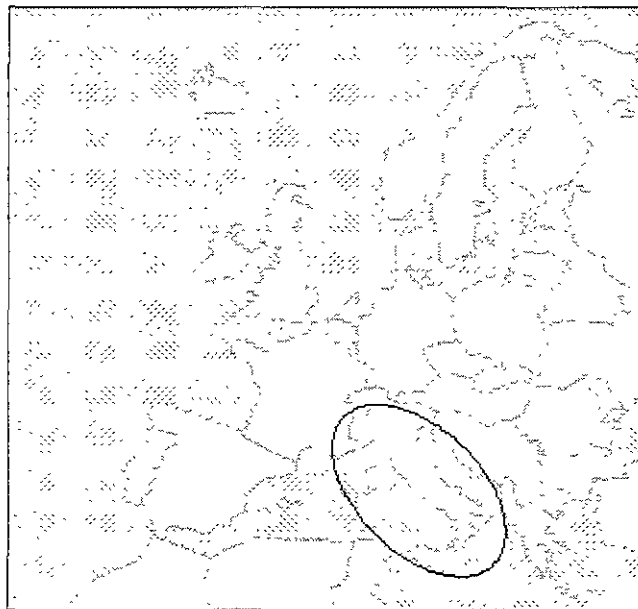


Figura 4.6 Huella de PIRE del satélite Italsat2 cobertura con un haz en la banda Ka.
($PIRE_{MAX}=48$ [dBW])

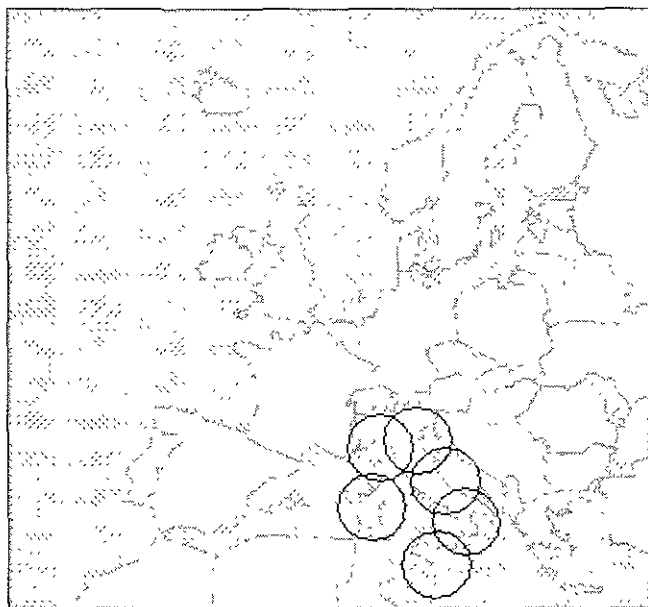


Figura 4.7 Huella de PIRE del satélite Italsat2 con varios haces en la banda Ka.
($PIRE_{MAX}=54$ [dBW])

4.4 Satmex 5

El satélite Satmex 5 fue construido por el consorcio Hughes. Las características principales del satélite se muestran en la tabla 4.8:

Tabla 4.8 Características del satélite

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Fecha de lanzamiento	6 de diciembre de 1998
País de origen	México
Misión	Telecomunicaciones
Ubicación	116.8° O
Vehículo de lanzamiento	Ariane VI14
Masa al lanzamiento	3550 Kg.
Estabilización	3 ejes
Vida estimada	15 años
Banda	C y Ku

4.4.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku.

El Satmex 5 cuenta con 24 transpondedores para la banda Ku activos y 8 de respaldo; con un ancho de banda de 36 MHz. cada uno.

En la tabla 4.9 se presentan los transpondedores con la frecuencia central de cada uno, así como también el tipo de polarización, y si es para el enlace ascendente o descendente.

Tabla 4.9 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku del Satmex 5.

NUMERO DE TRANSPONDEDOR	POL. HORIZONTAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. HORIZONTAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	ANCHO DE BANDA (MHz)
1		11.720		14.020	36
2	14.040		11.740		36
3		11.600		14.060	36
4	14.080		11.780		36
5		11.800		14.100	36
6	14.120		11.820		36
7		11.840		14.140	36
8	14.160		11.860		36
9		11.880		14.180	36
10	14.200		11.900		36
11		11.920		14.220	36
12	14.240		11.940		36
13		11.960		14.260	36
14	14.280		11.980		36
15		12.000		14.300	36
16	14.320		12.020		36
17		12.040		14.340	36
18	14.360		12.060		36
19		12.080		14.380	36
20	14.400		12.100		36
21		12.120		14.420	36
22	14.440		12.140		36
23		12.160		14.460	36
24	14.480		12.180		36

4.4.2 Huellas de PIRE del satélite en la banda Ku.

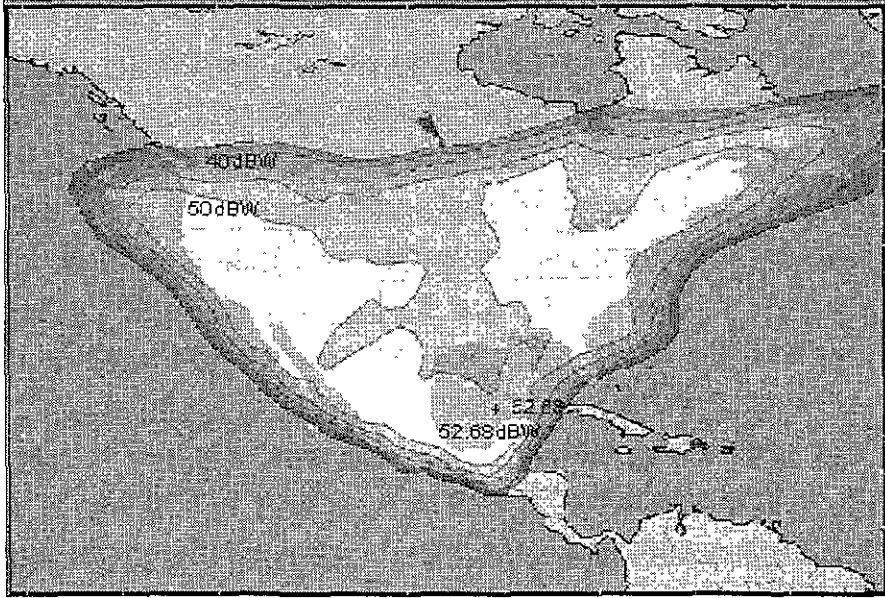


Figura 4.8 Huella de PIRE del satélite Satmex 5 cobertura con un haz en la banda Ku región uno.

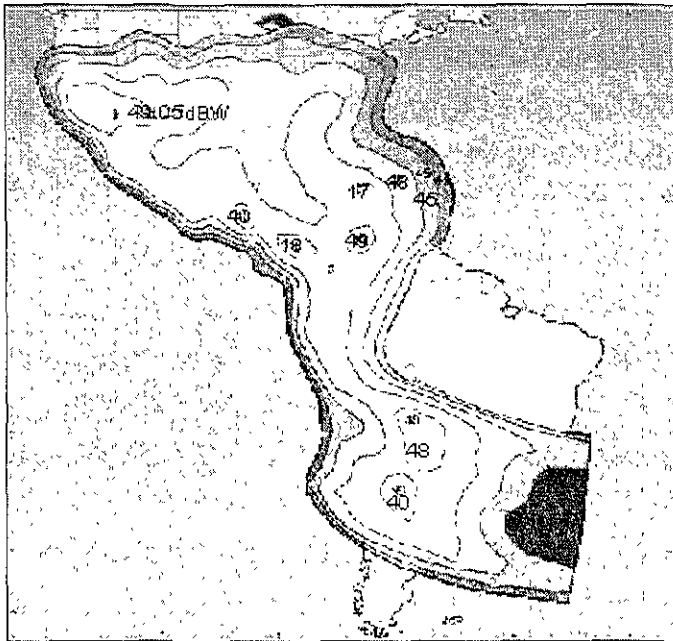


Figura 4.9 Huella de PIRE del satélite Satmex 5 con varios haces en la banda Ku región dos.

4.5 ANIK F2

Este satélite constituye el décimo de Telesat Canadá, fue construido por Boeing y será colocado en órbita por un cohete Ariane desde Kourou en la Guyana Francesa. Este provee servicios satelitales fijos, como acceso a Internet y es el primero en ofrecer servicios de multimedia. Sus principales características se muestran a continuación.

Tabla 4.10 Características del satélite ANIK F2

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCION
Fecha de lanzamiento	Abril de 2002
País de Origen	Canadá
Posición Orbital	111.1 ° O
Vida estimada	15 años
Masa al lanzamiento	8,258 Kg.
Bandas	C, Ku y Ka

4.5.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku

En la tabla 4.11 se pueden observar algunos parámetros importantes de los transpondedores en banda Ku del satélite ANIK F2, además de la cobertura que realiza.

Tabla 4.11 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku del ANIK F2

PARÁMETRO	DESCRIPCION
Banda del enlace de subida	14.0 a 14.5 [GHz]
Banda del enlace de bajada	11.7 a 12.2 [GHz]
Espectro utilizado	500 [MHz]
Polarización	Lineal
Tipo de haz	Sencillo y amplio
Ancho de banda agregado	1 [GHz]
Número de Transpondedores	32
Ancho de banda de cada transpondedor	27 [MHz]
Area de cobertura	Estados Unidos y Canadá

4.5.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka

A continuación se muestran las características esenciales de los transpondedores del ANIK F2 en la banda Ka. Se pueden notar diferencias importantes si se comparan con los datos mostrados en la tabla 4.11. Además en la tabla 4.13 se muestran características más específicas del manejo de esta banda en el satélite.

Tabla 4.12 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka del ANIK F2

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN
Banda del enlace de subida	28.35 a 28.6 [GHz] y 29.25 a 30.0 [GHz]
Banda del enlace de bajada	18.3 a 18.8 [GHz] y 19.7 a 20.0 [GHz]
Espectro utilizado	1000 [MHz]
Polarización	Circular sencilla
Tipo de haz	45 haces pequeños
Ancho de banda	aproximadamente 5.3 [GHz]
Número de Transpondedores	51
Ancho de banda de cada transpondedor	45 de 56.25 [MHz] (subida) y 6 de 500 [MHz] (bajada)
Area de cobertura	Estados Unidos y Canadá

4.13 Especificaciones del manejo de la banda Ka por el ANIK F2

CARACTERÍSTICAS	ENLACE DE SUBIDA	ENLACE DE BAJADA
Número de transpondedores	45	6
Ancho de banda por transpondedor	56.25	500
Configuración de los haces en el enlace de subida	6 haces	45 haces
G/T	-16 [dB/K]	-14 [dB/K]
Configuración de los haces en el enlace de bajada	45 haces	6 haces
PIRE en saturación en el Este	mayor a 58 [dBW]	mayor a 60 [dBW]
PIRE en saturación en el Oeste	mayor a 55 [dBW]	mayor a 60 [dBW]
Tamaño de las antenas de transmisión	5.6 m.	66 a 120 cm.
Potencia en el amplificador en el segmento terrestre	1000 W	1 a 4 W
Número de portadoras por transpondedor	1 a 3	cientos

Transpondedores con linealizadores

Una de las ventajas que ofrece el nuevo satélite ANIK F2 es el gran ancho de banda que pueden manejar sus transpondedores, pero esto provoca un incremento en el ruido de intermodulación. Este problema es ocasionado por la presencia de múltiples portadoras en el mismo transpondedor. Este satélite busca aliviar este problema utilizando TWT's equipados con linealizadores, los cuales logran hacer trabajar al TWT en una región lineal para así reducir el ruido de intermodulación.

4.5.3 Ubicación de los haces de cobertura de la banda Ka

En la figura 4.10 se muestra la región de cobertura y las huellas de cada uno de los haces sobre el territorio. En este se puede identificar la clasificación entre los haces del Oeste y los haces del Este, pues están sombreados con diferente color.

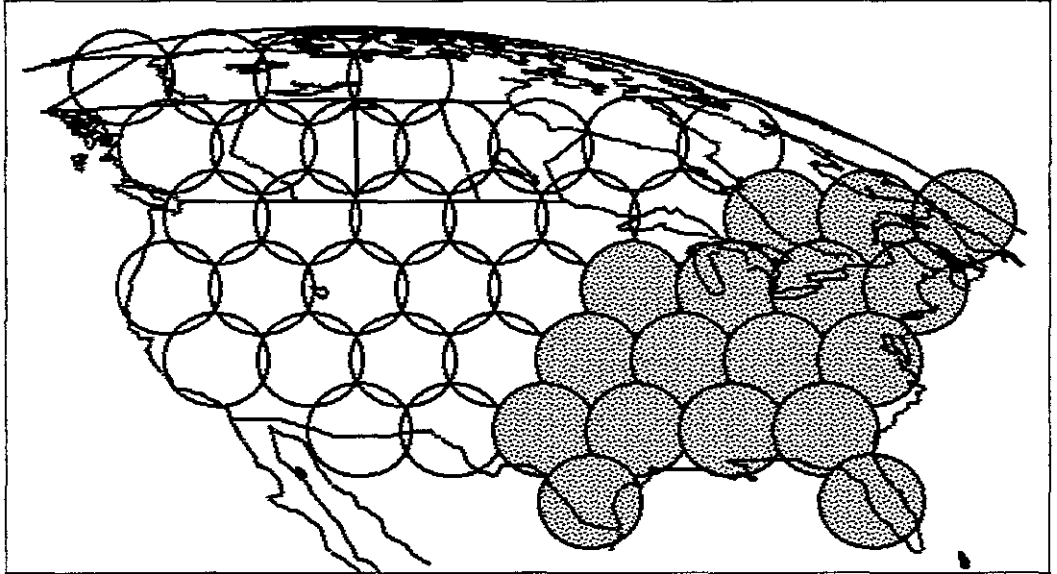


Figura 4.10 Ubicación de los haces del ANIK F2 en banda Ka en el área de cobertura.

4.6 Koreasat 3

El contratista de este satélite es Lockheed Martin y a continuación se mostrarán sus principales características en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Características del satélite Koreasat 3

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Fecha de lanzamiento	4 de septiembre de 1999
País de Origen	Corea del Sur
Posición Orbital	112.4 ° E
Vida estimada	15 años
Masa al lanzamiento	2790 Kg.
Bandas	Ku FSS [*] , Ku DBS [†] y Ka

4.6.1 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku

En la siguiente tabla se mostrarán los aspectos más importantes de la banda Ku en el satélite Koreasat 3.

* Fixed Satellite Service

† Direct Broadcast Satellite

Tabla 4.15 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ku del Koreasat 3.

CARACTERÍSTICAS	Ku DBS	Ku FSS
Transpondedores	6	24
Transpondedores de respaldo	3	8
Potencia	120 W	45 W
Ancho de banda	27 [MHz]	36 [MHz]
Cobertura	Corea del Sur	Región uno: Corea del Sur Región dos: Sureste de Asia
PIRE máximo	59.4 [dBW]	Región uno: 50.5 [dBW] Región dos: 55.1 [dBW] Región tres: 50.2 [dBW]
G/T máximo	14 [dB/K]	Región uno: 13.6 [dB/K] Región dos: 13.7 [dB/K] Región tres: 8.0 [dB/K]
Polarización	Circular	Región uno: Horizontal en subida y vertical en bajada Región dos: Vertical en subida y horizontal en bajada

4.6.2 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka

Para la banda Ka el Koreasat 3 tiene las siguientes características, que se muestran en la tabla 4.16

Tabla 4.16 Especificaciones técnicas de los transpondedores en banda Ka del Koreasat 3.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Transpondedores	3
Transpondedores de respaldo	2
Potencia	70 W
Ancho de banda	200 [MHz]
Cobertura	Península de Corea
PIRE máximo	55 [dBW]
G/T máximo	9.4 [dB/K]
Polarización	Circular

4.6.3 Huellas de PIRE en la banda Ku

En las figuras 4.11 y 4.12 se muestran las huellas de PIRE para la banda Ku en FSS y DBS respectivamente. Es importante señalar que las huellas para la banda Ka no están disponibles en la página web que usamos como principal fuente, ni en la del administrador del satélite.

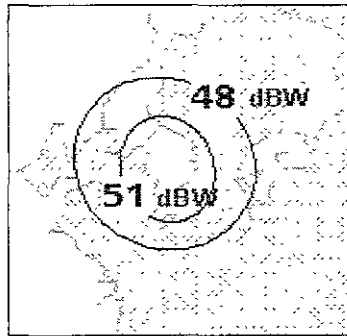


Figura 4.11 Huella de PIRE en banda Ku FSS del Koreasat 3

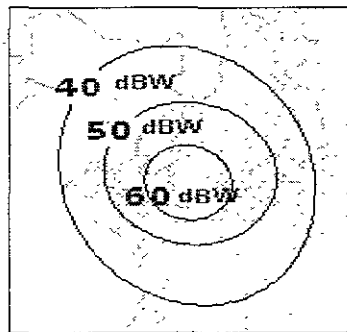


Figura 4.12 Huella de PIRE en banda Ku DBS del Koreasat 3

4.7 Selección del satélite.

Debido a que no existe un satélite con transpondedores tanto en la banda Ku como en la Ka que tenga como área de cobertura a la República Mexicana, para el análisis de esta tesis se elige un satélite cuyas huellas de PIRE y G/T , al trasladarse ficticiamente a la geografía de México, se adapten mejor para tener la mayor cobertura del país. Nótese que esto se hace únicamente como ejercicio para demostrar la validez del programa de optimización de este trabajo.

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas, las huellas del ANIK F2 no son adecuadas al igual que las de los demás satélites con banda Ka, por ser muy pequeñas. El satélite que mejor cumple con estas características es el Hotbird6, del cuál se muestran a continuación cada una de las cuatro huellas, ya trasladadas a un mapa de nuestro país.

Para realizar los cálculos de enlace, así como los ángulos de elevación y rangos, se supondrá un satélite virtual y gemelo al Hotbird6 en la posición de 89.5° O. Se propone esta posición orbital debido a que se hizo el traslado tanto de las huellas como de la posición en la que estará el Hotbird6, a territorio mexicano.

4.7.1 Huellas de PIRE y G/T del satélite en la banda Ku.

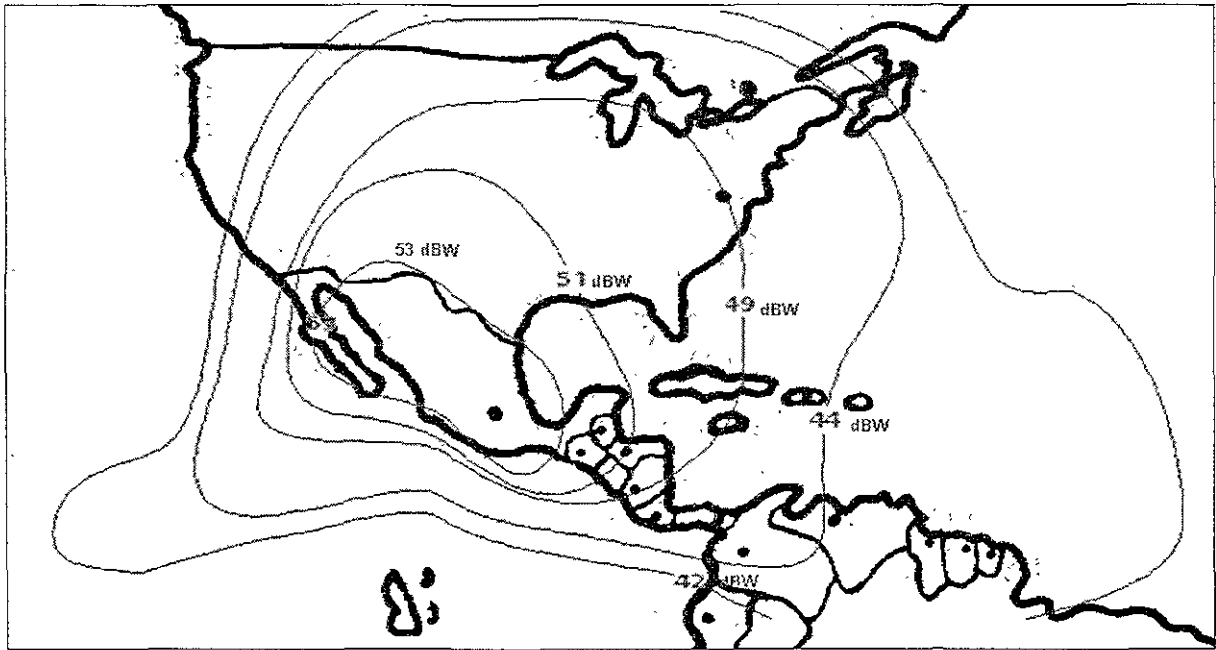


Figura 4.13 Huella trasladada de PIRE del satélite Hotbird6 en la banda Ku.

Es importante resaltar lo conveniente que fue trasladar esta huella, ya que el contorno de máximo PIRE envuelve de una manera casi perfecta al territorio nacional.

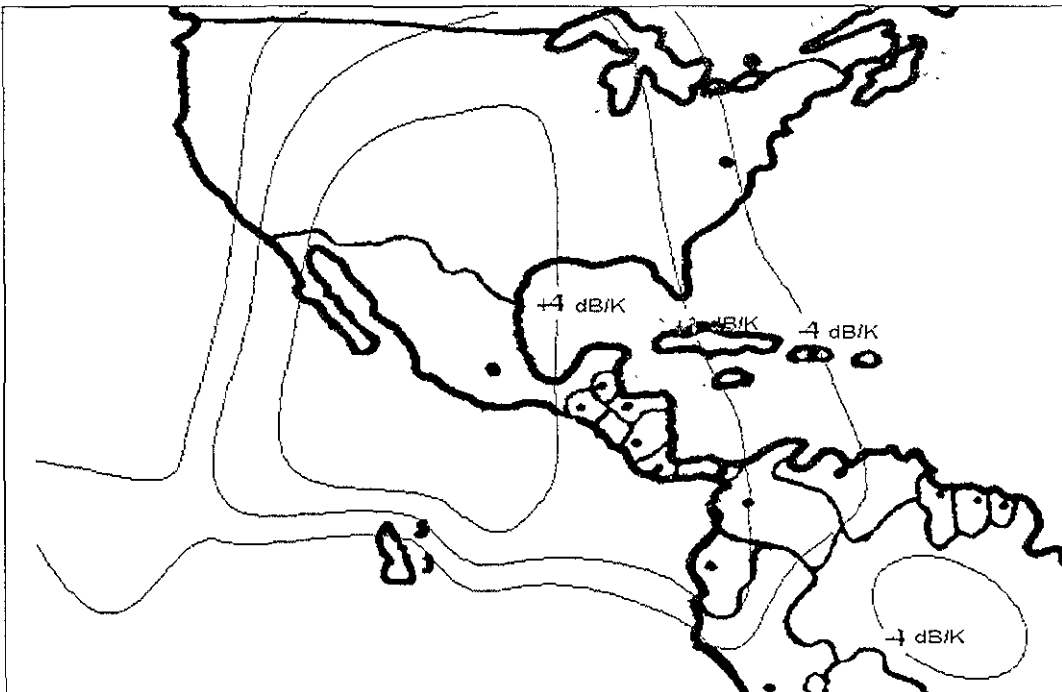


Figura 4.14 Huella trasladada de G/T del satélite Hotbird6 en la banda Ku.

4.7.2 Huellas de PIRE y G/T del satélite en la banda Ka.

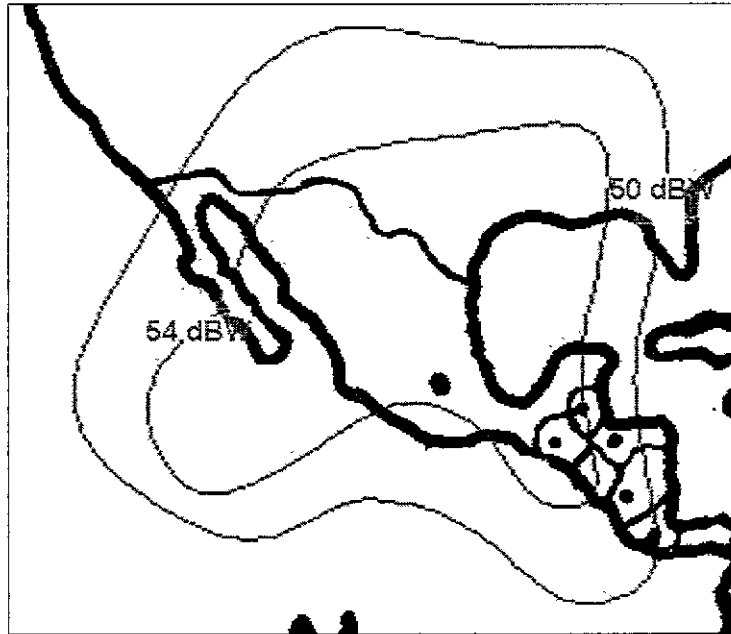


Figura 4.15 Huella trasladada de PIRE del satélite Hotbird6 en la banda Ka.

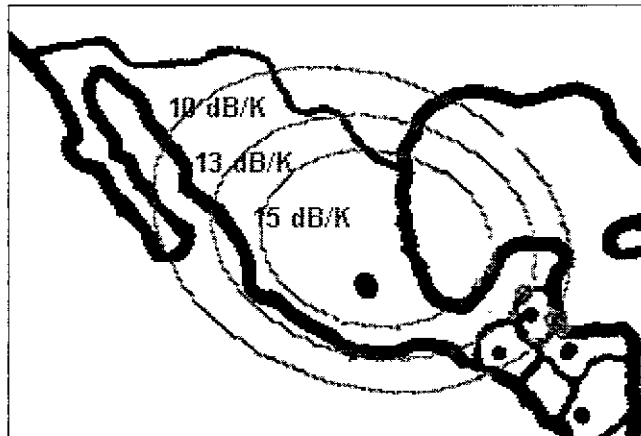


Figura 4.16 Huella de un solo haz trasladada de G/T del satélite Hotbird6 en la banda Ka.

4.7.3 Características de los transpondedores utilizados.

En la tabla 4.17 se listan los transpondedores utilizados en el cálculo de enlace, incluyendo el número de transpondedor, la polarización, la frecuencia central y el ancho de banda .

Tabla 4.17 Transpondedores a utilizar en las bandas Ku y Ka.

NUMERO DE TRANSPONDEDOR Y BANDA	POL. HORIZONTAL ASCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	POL. VERTICAL DESCENDENTE FRECUENCIA CENTRAL (GHZ)	ANCHO DE BANDA (MHZ)
123 / Ku	14.27141	10.99216	36
K153 / Ka	29.54800	19.74800	72

En el capítulo 6 definiremos el ejemplo de la red VSAT que usaremos para evaluar el programa propuesto en el capítulo 7. Los cálculos de enlace y costos se harán suponiendo la existencia de un satélite gemelo del Hotbird6 con las huellas trasladadas a nuestro país.

Referencias

Páginas de Internet:

<http://www.tbs-satellite.com> Enciclopedia de satélites

<http://www.satmex.com> Satélites mexicanos

<http://www.telesat.ca> Página de Telesat Canadá

<http://www.telesat.ca/news/speeches/00-02.html> Página del sistema del ANIK F2

CAPÍTULO 5

Desarrollo matemático de los cálculos de enlace

En esta tesis se tiene como objetivo comparar, cuantitativa y cualitativamente, el enlace entre dos estaciones VSAT. La comparación se basa en la utilización de dos bandas de frecuencias distintas, banda Ku y banda Ka; para esto se requiere llevar a cabo múltiples cálculos de enlace utilizando los parámetros del equipo y el satélite presentados en los capítulos 3 y 4. Debido a que un buen análisis exige la elaboración de una gran cantidad de combinaciones de los elementos considerados como variables en el cálculo de enlace (véase capítulo 2), es necesario diseñar un programa de computadora que sirva como herramienta de cálculo. Nuestro interés se enfoca en obtener la opción que resulte más eficiente, lo que significa que el enlace cumpla con especificaciones técnicas requeridas y el menor costo.

Un enlace satelital puede dividirse en dos secciones a su vez: enlace de subida y enlace de bajada (figura 5.1). A continuación se mostrará el procedimiento para desarrollar el cálculo de enlace en ambas secciones.

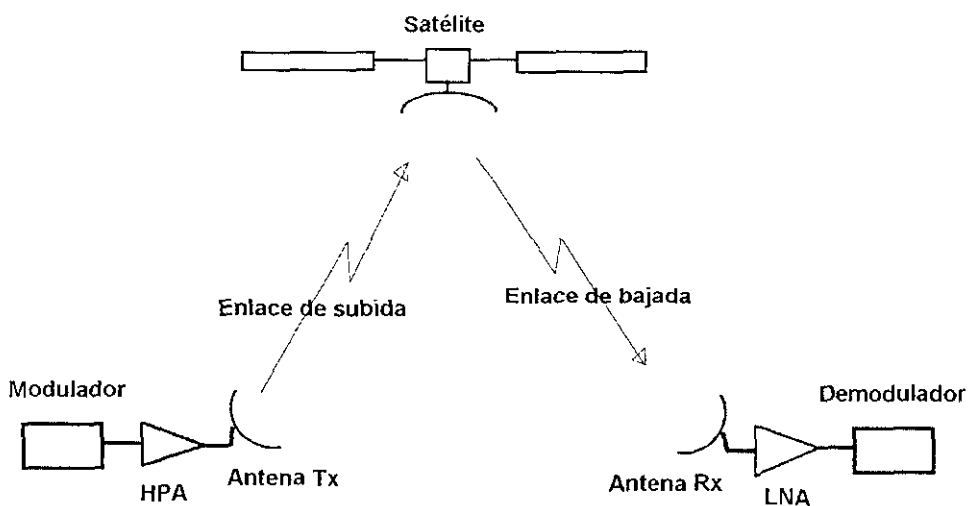


Figura 5.1 Enlace de subida y enlace de bajada

5.1 Cálculos fundamentales

Los cálculos de enlace, tanto para el enlace de subida como el de bajada, están constituidos por los siguientes parámetros:

- PIRE*
- Pérdidas de transmisión
- Figura de mérito

5.1.1 PIRE

Este parámetro se define como el producto de la potencia máxima otorgada por el HPA y la ganancia de la antena en la dirección de la transmisión, sin tomar en cuenta las pérdidas en la guía de ondas y conectores [RODY96].

$$PIRE = P_T \cdot G_T \quad [W] \quad (5 - 1)$$

donde P_T es la potencia máxima de transmisión en watts y G_T la ganancia de la antena en la dirección de la transmisión. Usualmente la PIRE es expresada en decibeles referidos a watts (dBW), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$[PIRE] = [P_T] + [G_T] \quad [dBW] \quad (5 - 2)$$

donde $[P_T]$ se encuentra en dBW y $[G_T]$ en dB.

5.1.2 Pérdidas de transmisión

A lo largo de la trayectoria que la señal recorre hasta llegar al satélite sufre atenuaciones por efectos de propagación en el medio, dentro de las cuales se consideran las siguientes [RODY96]:

- CL^\dagger , pérdidas en los conectores y guía de ondas, tanto en transmisión como en recepción
- FSL^\ddagger , pérdidas por propagación en el espacio libre
- AAL^\S , pérdidas por absorción atmosférica
- AML^{**} , pérdidas por desajuste de la antena
- RL^{**} , pérdidas por lluvia

* Potencia Isotrópica Radiada Efectiva

† Conector Losses

‡ Free Space Losses

§ Atmospheric Absorption Losses

** Antenna Misalignment Losses

** Rain Losses

Pérdidas en los conectores y guía de ondas (CL)

Entre el HPA o el LNA, y la antena existen guías de onda y conectores, los cuales producen pérdidas; entre mayor sea la distancia entre estos dos elementos dichas pérdidas serán mayores, por lo que se trata de hacer que esta distancia sea lo menor posible. Además, mientras mayores sean las pérdidas mayor es la cantidad de ruido que se introduce en el sistema.

El valor de estas pérdidas generalmente se aproximan en el siguiente rango:

$$0.5 \leq CL \leq 1 \quad [\text{dB}] \quad (5 - 3)$$

Esta consideración únicamente se hace en las estaciones terrenas, puesto que en el satélite no es necesario hacerlo. Esto debido a que las pérdidas en los conectores y guías de ondas están incluidas en las huellas de $[G_R/T_S]$ y PIRE, parámetros que serán usados para el cálculo de enlace en esta tesis.

Pérdidas por propagación en el espacio libre (FSL)

La mayor fuente de pérdidas en el enlace son las pérdidas en el espacio libre, pues su valor es de centenas de decibeles. El cálculo de este tipo de pérdidas se hace mediante la siguiente ecuación:

$$FSL = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 \quad (5 - 4)$$

donde r es el rango de la estación terrena al satélite, es decir, la distancia real entre ambos, en metros, y λ es la longitud de onda a la frecuencia de operación, en metros. Para el cálculo del rango se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$r = 35786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cdot \cos \theta'} \quad [\text{Km}] \quad (5 - 5)$$

donde θ' es el ángulo de cobertura y se calcula de la siguiente manera:

$$\theta' = \text{ang} \cos[\cos(\text{lat}) \cdot \cos(\text{longsat} - \text{longet})] \quad [^\circ] \quad (5 - 6)$$

donde lat es la latitud de la estación terrena, longsat es la longitud del satélite y longet es la longitud de la estación terrena, todas en grados.

Usualmente, el cálculo de las pérdidas por propagación en el espacio libre se hace en decibeles mediante la siguiente fórmula, que se obtiene de la ecuación (5- 4) mediante sustituciones simples.

$$[FSL] = 92.44 + 20 \cdot \log(r_{km}) + 20 \cdot \log(f_{GHz}) \quad [\text{dB}] \quad (5 - 7)$$

donde f_{GHz} es la frecuencia de operación.

Pérdidas por absorción atmosférica (AAL)

En la trayectoria que sigue la señal hacia el satélite sufre atenuaciones al pasar por la atmósfera, como resultado de la absorción de energía por gases que se encuentran en ella. Estas pérdidas tienen la característica de ser dependientes de la frecuencia, como se muestra en la figura 5.2.

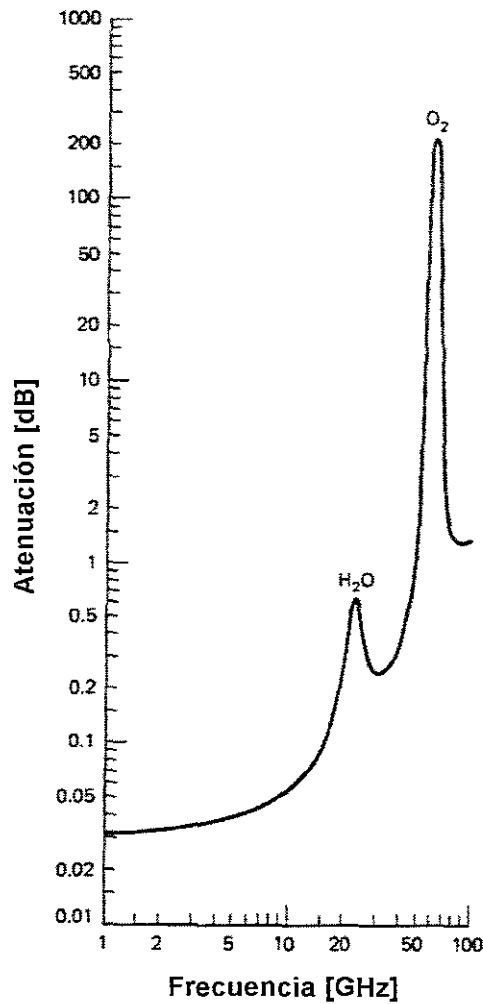


Figura 5.2 Absorción atmosférica en dirección al cenit.

La magnitud de estas pérdidas se aproximan por medio de la gráfica antes mostrada, es decir, no existe una forma analítica para realizar su cálculo [RODY96]. Pero cabe señalar que la gráfica está referida a

cenit de la antena, por lo que para calcular el valor real de las pérdidas es necesario multiplicar por la cosecante del ángulo de elevación de la antena, como se muestra a continuación:

$$[AAL]_{dB} = [L_{cent}]_{dB} \cdot \csc(\theta) \quad [dB] \quad (5 - 8)$$

El ángulo de elevación se calcula mediante la siguiente ecuación, y puede ser observado en la figura 5.3.

$$\theta = \text{ang tan} \left\{ \frac{[\cos(lat)][\cos(longsat - longet)] - \frac{Re}{Ro}}{\text{sen}[\text{ang cos}[\cos(lat)\cos(longsat - longet)]]} \right\} [^\circ] \quad (5 - 9)$$

donde Re es el radio de la tierra en kilómetros y Ro es el radio de la órbita del satélite en kilómetros. Aunque el cociente Re/Ro se puede aproximar, de manera práctica a 0.1512.

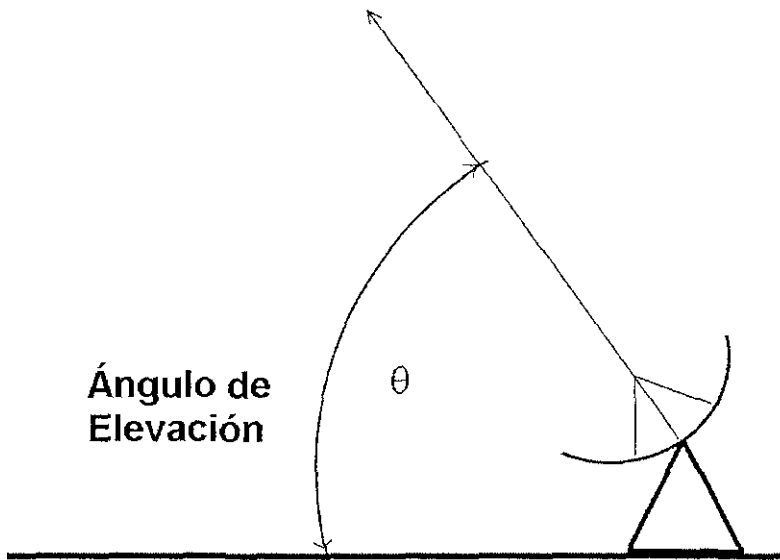


Figura 5.3 Ángulo de elevación de una antena

Pérdidas por desapuntamiento de la antena (AML)

Cuando se establece un enlace satelital, la situación ideal es tener el eje de máxima ganancia de las antenas del satélite y de la estación terrena perfectamente alineados, pero esto es regularmente muy difícil de lograr, por lo que se tienen pérdidas por desapuntamiento. Existen dos tipos de pérdidas por desapuntamiento, una en el satélite y la otra en la estación terrena (figura 5.4) [RODY96].

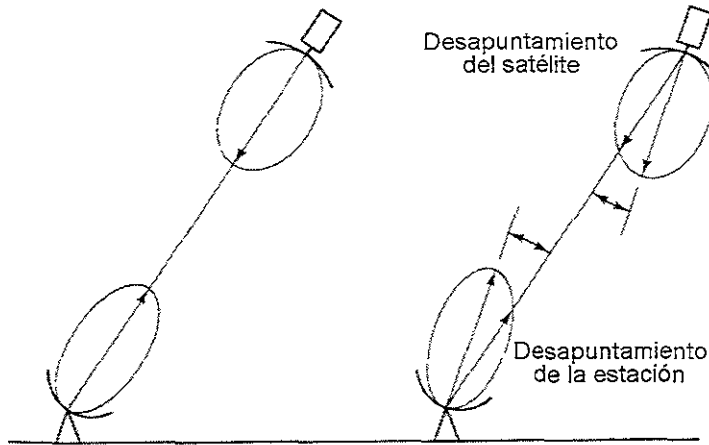


Figura 5.4 Apuntamiento perfecto y desapuntamiento en las antenas de satélite y estación terrena.

La pérdida por desapuntamiento en el satélite está considerada ya implícitamente según la ubicación de la estación terrena dentro del área de cobertura (huella), debido a que ésta tiene diferentes niveles de potencia, o PIRE, teniéndose el nivel máximo en el centro y un desvanecimiento gradual de la potencia hacia las orillas (figura 5.5) [RODY96].

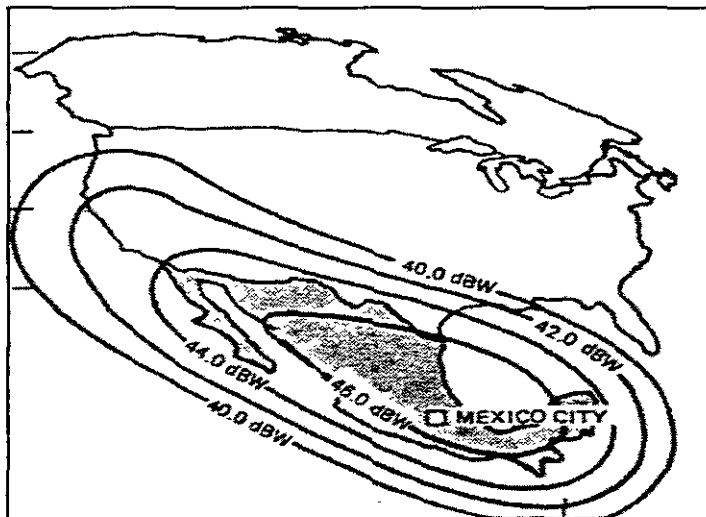


Figura 5.5 Área de cobertura del satélite Morelos I y huellas o contornos de PIRE.

Las pérdidas por desapuntamiento en la estación terrena se producen por una mala orientación de la antena hacia el satélite. Una deficiencia en la alineación de los ejes de máxima potencia, también producen pérdidas por despolarización, que usualmente son de valores pequeños, por lo que se asumen igual a cero en esta tesis.

Las pérdidas por desapuntamiento se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$AML = 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (5 - 10)$$

donde α es el ángulo de desapuntamiento y θ_{-3dB} es el ángulo en donde la potencia cae a la mitad, ambos en grados. Debido a que su valor es muy pequeño, dentro del programa no se considerarán este tipo de pérdidas, además de que están incluidas en la PIRE del satélite, suponiendo antenas terrenas bien orientadas.

Atenuación por lluvia(RL)

El cálculo de la atenuación por lluvia representa una etapa importante en el cálculo de enlace, sobre todo en las bandas Ku y Ka; debido a que en frecuencias mayores a 10 GHz. la longitud de onda es comparable con el diámetro de las gotas de lluvia, lo cual origina una atenuación mayor.

Existen diferentes métodos empíricos para su cálculo. En esta tesis utilizaremos el método propuesto por la CCIR (reporte 564-4, 1990), el cual se describe a continuación:

- Paso uno: Cálculo de la altura real de la lluvia.

$$hr = 3 + 0.028lat \quad [\text{Km.}] \quad 0 \leq lat \leq 36^\circ \quad (5 - 11)$$

$$hr = 4 - 0.075(lat - 36^\circ) \quad [\text{Km.}] \quad 36^\circ \leq lat \quad (5 - 12)$$

donde hr es la altura real de la lluvia.

- Paso dos: Cálculo del trayecto oblicuo.

$$d = \frac{hr - h_0}{\text{sen}\theta} \quad (5 - 13)$$

donde h_0 es la altura sobre el nivel del mar en kilómetros y θ es el ángulo de elevación, en grados.

El ángulo de azimut (ϕ) es también un parámetro de importancia en la orientación de la antena, y su cálculo se realiza como se describe a continuación [GORD93]:

Caso uno: Cuando la estación terrena se encuentra en el hemisferio norte al oeste del satélite.

$$\phi = 180^\circ - \phi' \quad (5 - 14)$$

Caso dos: Cuando la estación terrena se encuentra en el hemisferio norte al este del satélite.

$$\phi = 180^\circ + \phi' \quad (5 - 15)$$

Caso tres: Cuando la estación terrena se encuentra en el hemisferio sur al oeste del satélite.

$$\phi = \phi' \quad (5 - 16)$$

Caso cuatro: Cuando la estación terrena se encuentra en el hemisferio sur al este del satélite.

$$\phi = 360^\circ - \phi' \quad (5 - 17)$$

donde:

$$\phi' = \text{ang tan} \left[\frac{\tan \text{longsat} - \text{longet}}{\text{sen}(\text{lat})} \right] \quad [^\circ] \quad (5 - 18)$$

- Paso tres: Cálculo del factor reductor.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d}{35e^{-0.015R_{0.01}}} \right) \cos(\theta)} \quad [\text{Adimensional}] \quad (5 - 19)$$

donde $R_{0.01}$ es la intensidad de la lluvia con una disponibilidad de 99.99%, $R_{0.01}$ tiene valores diferentes dependiendo de la zona geográfica de interés. Estos valores son mostrados en la figura 5.6. Para realizar el cálculo con otra disponibilidad se utiliza un factor de ajuste (véase paso 6 : ecuación 5 - 22).

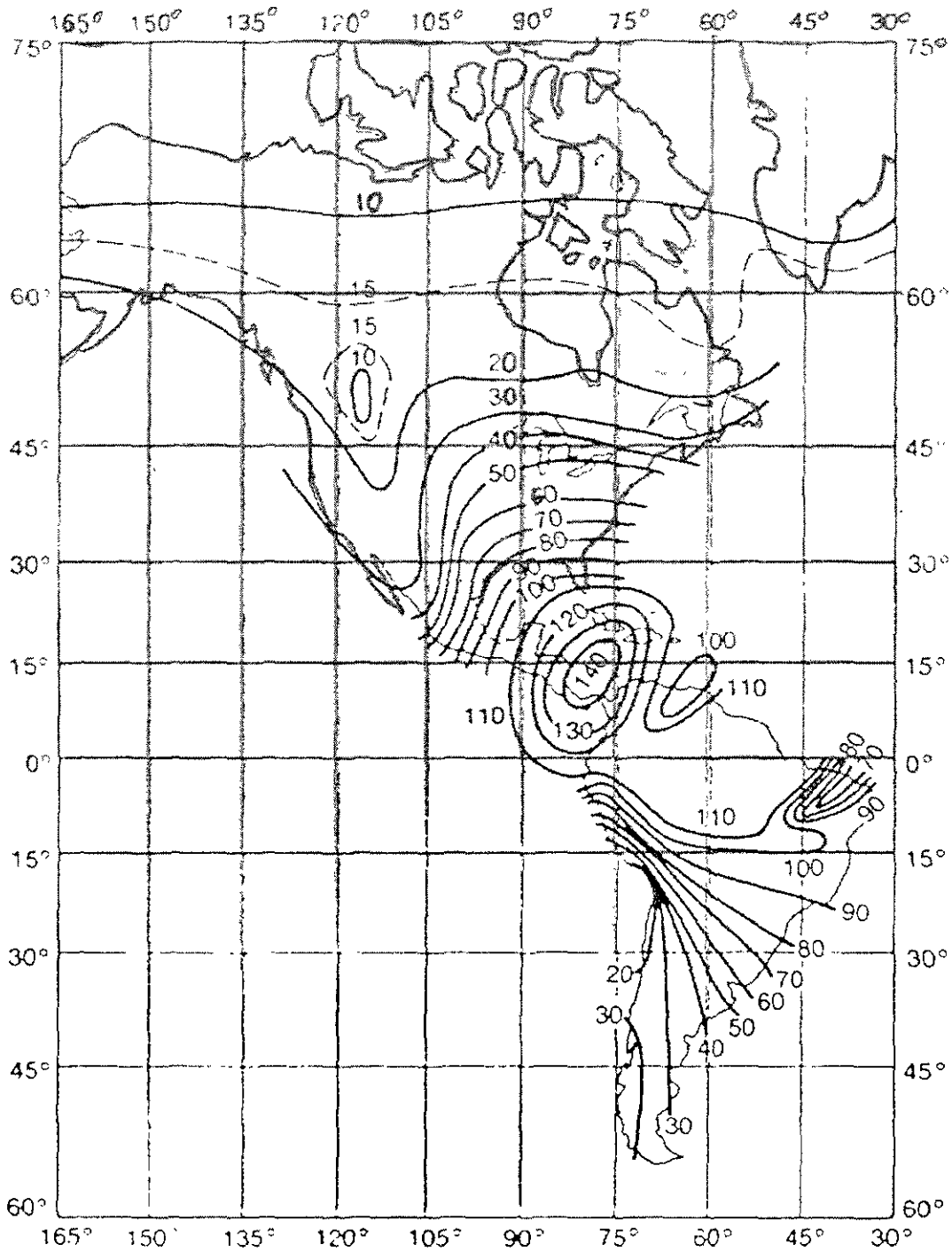


Figura 5.6 Intensidad de lluvia en mm/h para 99.99% en América [RECCIR82]

- Paso cuatro: Cálculo del coeficiente de atenuación por lluvia.

$$\gamma = aR_{0.01}^b \quad [\text{dB} / \text{Km}] \quad (5 - 20)$$

donde a y b son los coeficientes de atenuación específica (véase la tabla 5.1).

Tabla 5.1 Coeficientes de atenuación específica[RODY96].

FRECUENCIA [GHZ]	a (pol. Horizontal)	a (pol. Vertical)	b (pol. Horizontal)	b (pol. Vertical)
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.88
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.00065	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.2
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.03
30	0.187	0.167	1.021	1.0

- Paso cinco: Cálculo de la atenuación por lluvia con una disponibilidad de 99.99%

$$RL_{0.01} = \gamma \cdot d \cdot r_{0.01} \quad [\text{dB}] \quad (5 - 21)$$

- Paso seis: Para otra disponibilidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$RL_p = \left[0.12 \cdot p^{-(0.546+0.043 \cdot \log(p))} \right] RL_{0.01} \quad [\text{dB}] \quad (5 - 22)$$

donde p es el complemento a 100% de la disponibilidad deseada.

En esta tesis utilizaremos las disponibilidades de 99.8% y 99.5% para las bandas Ku y Ka respectivamente [TELESAT].

Es importante mencionar que existen otros métodos para calcular la atenuación por lluvia, entre los que se encuentra el método DAH, que se especializa principalmente en la banda Ka. Sin embargo, se ha decidido que el método a utilizar en esta tesis es el antes descrito para ambas bandas Ku y Ka (CCIR 564-4, 1990).

5.1.3 Figura de mérito

Los dos parámetros más importantes para el sistema de recepción son: la ganancia de la antena receptora G_R y la temperatura de ruido del sistema de recepción T_s . El cociente de estos dos parámetros G_R/T_s es llamado "Figura de Mérito". La ganancia de la antena es proporcionada por el fabricante y usualmente es dada en dBi. La temperatura de ruido del sistema T_s en Kelvin se define como la suma de todas las contribuciones de ruido producidas por cualquier elemento que se encuentre entre la antena y el LNA; el ruido generado por este último dispositivo es referido a su entrada.

Generalmente, la temperatura de ruido es expresada en dB, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{G_R}{T_s} = G_R - 10 \cdot \log_{10}(T_s) \quad [\text{dBi/K}] \quad (5 - 23)$$

En el caso del satélite la figura de mérito es proporcionada por la compañía propietaria. Ésta es presentada en un mapa o huella de G/T , el cual muestra los diferentes valores de este parámetro en función de la ubicación de las estaciones terrenas (figura 5.7).

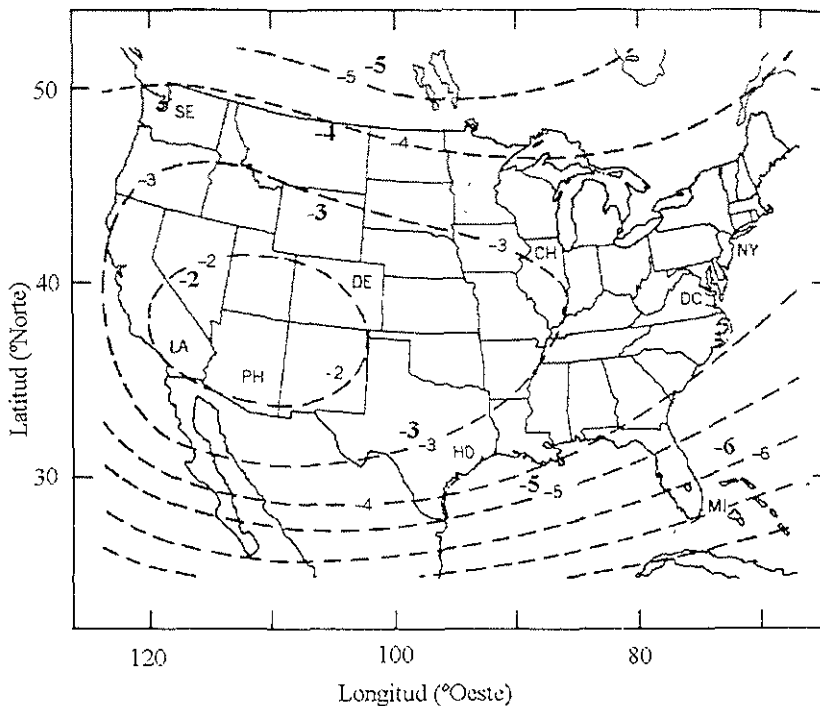


Figura 5.7 Líneas de contorno de G/T [dBi/K] para un satélite arbitrario en recepción

Los valores típicos de la figura de mérito para las estaciones terrenas se encuentran en el rango de -18 a 41 dBi/K, mientras que para el satélite están entre -20 y 10 dBi/K [GORD93]. Aunque para datos más específicos véase el capítulo 4.

En el caso de la estación terrena, el valor de la figura de mérito será calculado por el programa tomando en cuenta los parámetros descritos a continuación.

Temperatura de ruido del sistema *

El ruido del sistema es de origen térmico. Éste es producido por los dispositivos electrónicos, debido al movimiento aleatorio de los electrones. La potencia de ruido térmico se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$N = K \cdot T_S \cdot B \quad [\text{W}] \quad (5 - 24)$$

donde $K = 1.38 \times 10^{-23}$ [J/K] es la constante de Boltzmann, B es el ancho de banda del ruido [Hz] y T_S es la temperatura de ruido total del sistema [K].

La principal característica del ruido térmico es que tiene un espectro plano, es decir, que la potencia de ruido por unidad de ancho de banda es constante. La potencia de ruido por unidad de ancho de banda es llamada densidad espectral de potencia de ruido. Es representada por:

$$N_0 = \frac{N}{B} = K \cdot T_S \quad [\text{J}] \quad (5 - 25)$$

En el cálculo de enlace de bajada se tienen las siguientes contribuciones de ruido en la estación terrena:

- Temperatura de ruido de la antena.
- Temperatura de ruido de guía de ondas y conectores.
- Temperatura de ruido del amplificador de bajo ruido (LNA)
- Temperatura de ruido de la lluvia.

La temperatura total de ruido del sistema a cielo despejado se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$T_S = T_A + T_C + T_e \quad [\text{K}] \quad (5 - 26)$$

y, cuando hay presencia de lluvia en la zona de recepción se tendría la siguiente expresión:

$$T_S = T_A + T_C + T_e + T_R \quad [\text{K}] \quad (5 - 27)$$

* Es importante mencionar que todas las temperaturas aquí mencionadas serán referidas a la entrada del amplificador de bajo ruido.

donde T_A es la temperatura de ruido de la antena, T_C es la temperatura de ruido de guía de ondas y conectores, T_e es la temperatura de ruido del amplificador (LNA), y T_R es la temperatura de ruido de la lluvia, todas en Kelvin.

Temperatura de ruido de la antena

Para conocer el valor de la temperatura de ruido en una antena, es necesario hacer un análisis considerando si se trata de un enlace de subida o de bajada. Las fuentes de ruido para una antena varían con respecto al tipo de cobertura o apuntamiento que esté haciendo, lo que significa que las fuentes de ruido para una antena que está apuntando hacia el satélite, son muy diferentes en comparación con las que tiene aquella que apunta hacia la Tierra:

Una antena en la estación terrena además de apuntar hacia el satélite también apunta hacia múltiples fuentes de ruido (figura 5.8). Las fuentes de ruido más importantes para este tipo de apuntamiento son:

- La temperatura de ruido del Sol,
- La temperatura de ruido de la Luna,
- El ruido cósmico,
- El ruido galáctico,
- El ruido troposférico,
- La temperatura de ruido de la Tierra,
- Interferencias con enlaces terrestres y,
- La temperatura de ruido de la lluvia.

Debido a que muchos de los parámetros antes listados son difíciles de calcular, el valor de temperatura de ruido de la antena, con cielo despejado, es un dato que otorga el fabricante (véase las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 del capítulo 3). Este valor depende del ángulo de elevación, por lo que es muy importante conocerlo para hacer el cálculo de enlace. A este dato hay que añadir la temperatura de ruido de la lluvia, según sea el acaso; además, la temperatura de ruido de la antena debe dividirse por la atenuación por lluvia para que el efecto sea considerado completamente, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T_A = \frac{T'_A}{RL} \quad [\text{K}] \quad (5 - 28)$$

donde T'_A es la temperatura de ruido de la antena proporcionada por el fabricante, en Kelvin, y RL es la atenuación debida a la lluvia en valor absoluto. En el caso de cielo despejado tenemos:

$$T_A = T'_A \quad [\text{K}] \quad (5 - 29)$$

Por otro lado, una antena que apunta hacia una región específica en la Tierra se ve afectada básicamente por la temperatura de ruido de la Tierra (290 K), cuestión que ya está considerada dentro de las huellas de $[G/T]$ del satélite que otorga el fabricante para el enlace de subida.

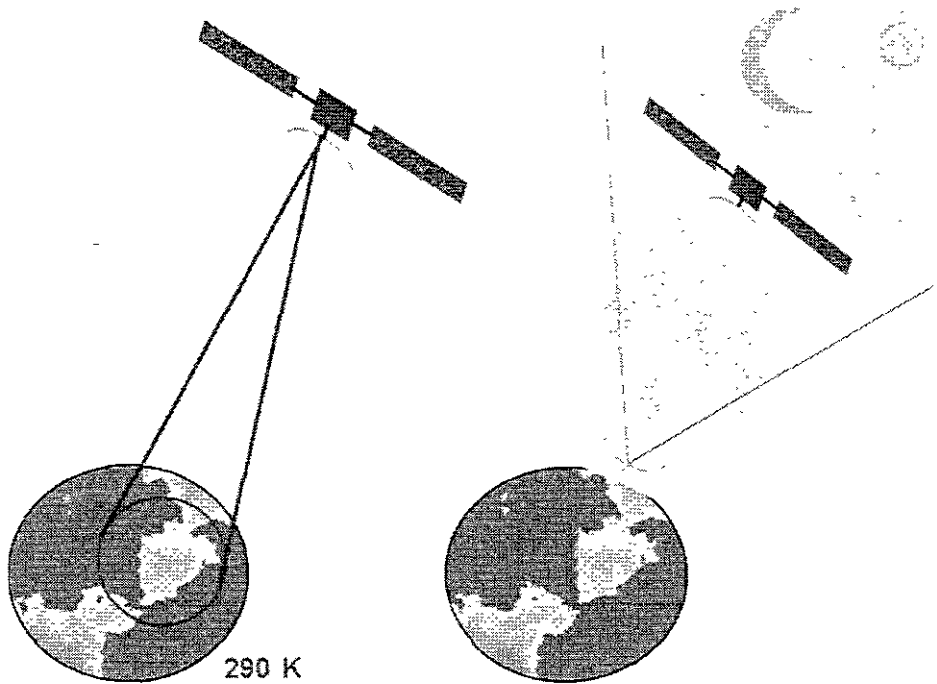


Figura 5.8 Tipos de apuntamiento y fuentes de ruido para una antena

Temperatura de ruido de guía de ondas y conectores

El cálculo de este parámetro se realiza mediante la siguiente ecuación*:

$$T_C = T_0 \left(1 - \frac{1}{L_C} \right) \quad [\text{K}] \quad (5-30)$$

donde T_0 es la temperatura exterior y, L_C es la atenuación producida por la guía de ondas y por los conectores.

Temperatura de ruido de la lluvia

Hasta este momento, los cálculos se han realizado considerando condiciones de cielo despejado, pero si la lluvia está presente se deben tomar ciertas consideraciones. Existe atenuación debida a este fenómeno y un incremento en la temperatura de ruido. Sin embargo, el incremento de la temperatura de ruido no es un factor importante en el enlace de subida, esto debido a que la antena del satélite está apuntando hacia un

* La temperatura que se obtiene de esta ecuación esta referida a la salida del conector o de la guía de onda, según sea el caso.

región amplia de la Tierra, por lo que la existencia de lluvia en una pequeña sección no afectará la temperatura de ruido general de toda la región, por lo tanto, sólo se utilizarán los contornos de $[G/T]$ en el enlace de subida.

Por otro lado, en el enlace de bajada sí es necesario conocer el valor de la temperatura de ruido de la lluvia, debido a que su efecto en el enlace es considerable. Esto es debido a que la presencia de lluvia en la zona de recepción afecta completamente la temperatura de ruido de la antena, y por consecuencia la del sistema. Para conocer su valor se utiliza la ecuación siguiente*:

$$T_R = T_{0R} \left(1 - \frac{1}{RL} \right) \quad [\text{K}] \quad (5 - 31)$$

donde T_{0R} es la temperatura de ruido ambiente cuando existe lluvia, en Kelvin y RL , en valor absoluto.

Temperatura de ruido del amplificador

En el sistema de recepción generalmente se tienen varios amplificadores para darle el tratamiento adecuado a la señal recibida. Pero en realidad la contribución más significativa la hace el primer amplificador que encuentra la señal, que para este caso es el LNA, como se puede observar en la ecuación (5 - 32).

$$T_e = T_{LNA} + \frac{T_{AMP1}}{G_{LNA}} + \frac{T_{AMP2}}{G_{LNA} \cdot G_{AMP1}} + \dots + \frac{T_{AMPn}}{G_{LNA} \cdot \dots \cdot G_{AMP(n-1)}} \quad [\text{K}] \quad (5 - 32)$$

Entonces, la temperatura que es importante para realizar el cálculo es la del LNA, que usualmente la otorga el fabricante, aunque en ocasiones el parámetro que nos da es la Figura de Ruido; por lo que es necesario hacer uso de la siguiente ecuación para conocer la temperatura de ruido en función de la figura de ruido [RODY96].

$$T_e = T_0 (F - 1) \quad [\text{K}] \quad (5 - 33)$$

donde T_e es la temperatura de ruido del LNA, en Kelvin; T_0 es la temperatura ambiente [K] y F es la figura de ruido del dispositivo en valor absoluto [adimensional], aunque usualmente se da en decibeles:

$$[F] = 10 \cdot \log(F) \quad [\text{dB}] \quad (5 - 34)$$

* El cálculo de la temperatura de ruido de la lluvia se obtiene considerandola como un conector o atenuador, por lo que la ecuacion es similar a la (5-30)

5.1.4 Relación Portadora a Ruido

Una medida de la calidad del enlace satelital es la relación Portadora a Ruido en la entrada del receptor (LNA). Convencionalmente, dicha relación está atribuida a C/N_0 , la cual se define mediante la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{C}{N_0} \right] = [PIRE] + \left[\frac{G_R}{T_S} \right] - [\sum Pérdidas] - 10 \cdot \log(k) \quad [\text{dBHz}] \quad (5 - 35)$$

En el cálculo de enlace se tienen tres tipos diferentes de relación portadora a ruido, los cuales definen una relación portadora a ruido total mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_T = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_S} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_I} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_B}} \quad [\text{Hz}] \quad (5 - 36)$$

donde $(C/N_0)_S$ es la relación portadora a ruido del enlace de subida, $(C/N_0)_B$ es la relación portadora a ruido del enlace de bajada y, $(C/N_0)_I$, se define como la relación portadora a ruido de intermodulación, parámetro que a continuación se describe.

Ruido de Intermodulación

La intermodulación ocurre cuando existen múltiples portadoras en un dispositivo con características no lineales. En sistemas de comunicación satelital esto sucede con mayor frecuencia en los TWT, que se ubican a bordo del satélite. Cuando un gran número de portadoras están presentes en un transpondedor, los productos de la intermodulación no son distinguibles por separado; sin embargo, se aprecian como una especie de ruido llamada ruido de intermodulación.

La razón portadora a ruido de intermodulación es un parámetro que usualmente es calculado de manera experimental, o en algunos casos con herramientas de cómputo. Además, debido a su complejidad de cálculo, es un parámetro proporcionado por el fabricante del satélite.

Para reducir el ruido de intermodulación, los TWT deben operar con un *backoff* como se describió en el capítulo 2. La figura 5.11, muestra como la relación $(C/N_0)_I$ mejora conforme el *backoff* de entrada se incrementa. Al mismo tiempo, el incrementar el *backoff* decrementa a las relaciones $(C/N_0)_S$ y $(C/N_0)_B$. El resultado es la existencia de un valor óptimo de *backoff* donde la relación portadora a ruido total es máxima, como se muestra en la figura 5.12. En esta tesis, el programa se encargará de variar el valor de *back-off* hasta encontrar el valor óptimo de $(C/N_0)_T$.

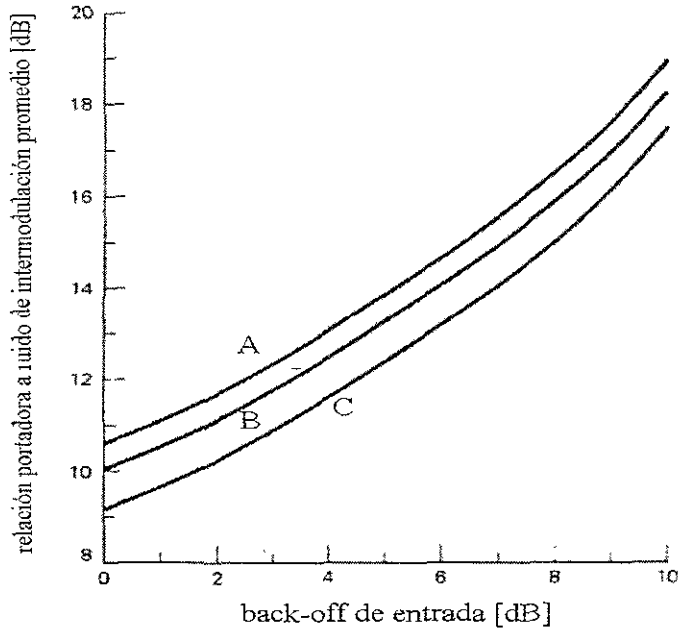


Figura 5.11 Curvas típicas de (C/N_0) , de un TWT para 6, 12 y 500 portadoras; A, B y C respectivamente.

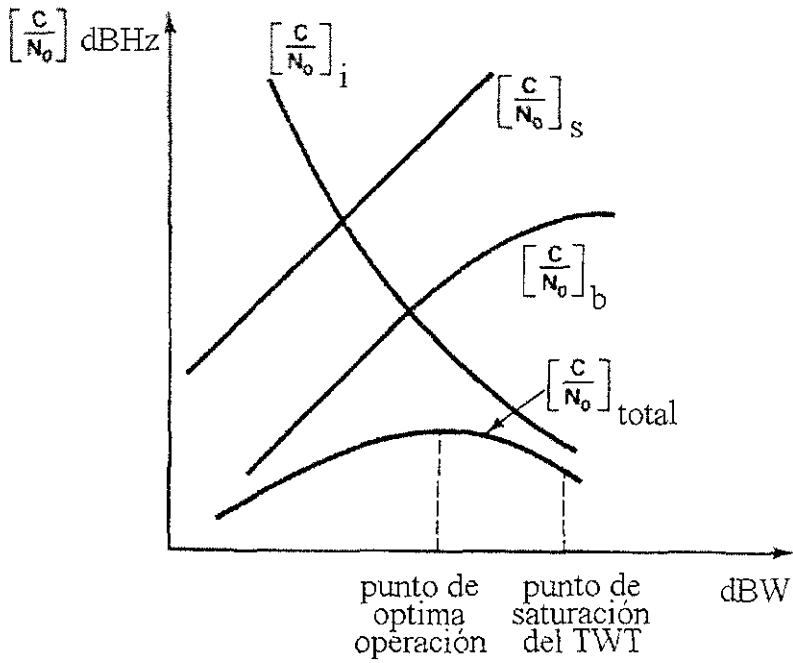


Figura 5.12 Curvas de $(C/N_0)_s$, $(C/N_0)_i$, $(C/N_0)_B$ y $(C/N_0)_t$ en función del back-off de entrada.

5.2 Enlace de subida

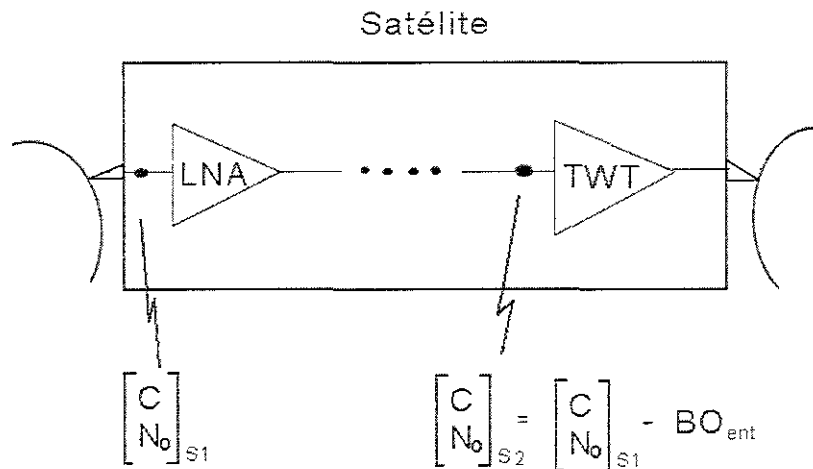
Una vez definidos los cálculos fundamentales, resulta bastante sencillo realizar el cálculo de enlace, tanto para el enlace de subida como para el enlace de bajada. Para poder realizar esto es necesario haber calculado previamente los parámetros antes descritos, expresándolos en decibeles, ya que con este cálculo se reduce a sumas y restas como se observa en la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{C}{N_0} \right]_S = [PIRE]_S + \left[\frac{G_R}{T_S} \right]_S - [\sum \text{pérdidas}]_S - [k] \quad [\text{dBHz}] \quad (5 - 37)$$

Como ya se mencionó, cuando un número de portadoras están simultáneamente presentes en el TWT del satélite se produce distorsión por lo efectos de la intermodulación. Para reducir estos efectos es necesario disminuir la PIRE en la estación terrena unos cuantos decibeles por debajo del punto de saturación, para que el TWT trabaje en una zona lineal. A esto se le conoce como back-off.

$$[PIRE]_S = [PIRE_{SAT}]_S - [B.O.]_{ENT} \quad [\text{dBW}] \quad (5 - 38)$$

donde $[PIRE_{SAT}]_S$ es la PIRE de saturación del HPA de la estación terrena con una sola portadora, y $[B.O.]_{ENT}$ es el back-off de entrada proporcionado por los atenuadores presentes en el satélite y que son ajustados desde la Tierra para evitar que el TWT del satélite trabaje en saturación. El integrar aquí el back-off de entrada a los TWT del satélite (figura 5.13) y restárselo a la PIRE de la estación terrena permite obtener el cociente C/N_0 a la entrada del TWT.



5.13 El back-off de entrada se realiza antes de entrar al TWT del satélite

5.3 Enlace de bajada

Al igual que en el enlace de subida, el cálculo para el enlace de bajada también puede realizarse de manera simple cuando los parámetros necesarios han sido calculados y expresados convenientemente. Con esto se obtiene una ecuación similar a la antes descrita y que se muestra a continuación:

$$\left[\frac{C}{N_0} \right]_B = [PIRE]_B + \left[\frac{G_R}{T_S} \right]_B - [\sum \text{pérdidas}]_B - [k] \quad [\text{dBHz}] \quad (5 - 39)$$

donde $[PIRE]_B$ es:

$$[PIRE]_B = [PIRE_{SAT}]_B - [B.O.]_{SAL} \quad [\text{dBW}] \quad (5 - 40)$$

Como ya se mencionó en el enlace de subida, se tiene un back-off de entrada, que producirá una disminución en la potencia de salida del satélite (back-off de salida). No existe una relación lineal entre ambos back-off por lo que el cálculo del back-off de salida se lleva a cabo mediante la siguiente regla empírica [RODY96]:

$$[B.O.]_{SAL} = [B.O.]_{ENI} - 5 \quad [\text{dB}] \quad (5 - 41)$$

Al llegar la portadora o las portadoras al satélite, se debe tener un nivel de potencia adecuado; sin embargo, en algunas ocasiones este nivel puede ser mayor al requerido, lo que produciría que los HPA del satélite se saturarán y el $(C/N_0)_T$ presentara una disminución. Para contrarrestar este problema, existen atenuadores en el transpondedor ubicados a la entrada de los amplificadores de potencia. Los atenuadores tienen como función disminuir la potencia en un valor óptimo (back-off de entrada) para tener un máximo valor de $(C/N_0)_T$.

5.4 Enlace total.

Una vez obtenidas las relaciones $(C/N_0)_S$, $(C/N_0)_B$ y conociendo la relación $(C/N_0)_n$, se puede calcular la relación portadora a ruido total del enlace mediante la ecuación (5 - 36), donde $(C/N_0)_S$, $(C/N_0)_n$ y $(C/N_0)_B$ están en valor absoluto, una vez obtenido $(C/N_0)_T$ es importante convertirlo a decibeles (ecuación 5 - 41) para obtener la relación Energía-bits a ruido (E_b/N_0) con la ecuación (5 - 42), en caso en que la modulación del enlace sea digital. (En esta tesis se analizan enlaces con modulación digital QPSK).

$$\left[\frac{C}{N_0} \right]_{\text{dBHz}} = 10 \cdot \log \left(\frac{C}{N_0} \right)_I \quad [\text{dBHz}] \quad (5 - 41)$$

$$\left[\frac{C}{N_o} \right]_{dBHz} = \left[\frac{E_b}{N_o} \right] + [T.T]_{dB} \quad [dBHz] \quad (5 - 42)$$

donde $[T.T.]$ es la tasa de transmisión en dB.

La relación energía-bits a ruido es de mucha importancia, debido a que el demodulador exige un valor mínimo para poder recuperar la señal transmitida a un BER deseado véase la sección 3.4 del capítulo 3.

Referencias

- [RODY96] "Satellite Communications" D. Roddy, McGraw Hill, 1996.
- [GORD93] "Principles of Communications Satellite" D Gordon, John Wiley & Sons, 1993.
- [RECCIR82] "Recomendación CCIR 1982 Volumen V" ITU, Ginebra 1982.
- [TELESAT] "ANIK F2 Ka-Band system: High speed Internet access", A. Grami, K. Gordon y A. Shoamanesh, Telesat Canadá, Abril del 2000.

CAPÍTULO 6

Ejemplo de una red estrella típica

En este capítulo definimos el ejemplo que resolverá el programa descrito en el capítulo 7. El motivo de definir un ejemplo es mostrar la utilidad del programa con un caso real, el cual puede estar constituido por una red típica para VSAT, cuyas características se mostrarán a continuación.

6.1 Configuración de la red

La configuración elegida para este ejemplo es la estrella, debido a que es la más utilizada en las redes VSAT. El propósito es tener una estación maestra situada en la Ciudad de México, de tal forma que pueda establecer comunicación con cualquiera de las estaciones esclavas ubicadas en el interior de la República.

Para realizar el cálculo de enlace elegimos la posición de la estación esclava, en donde cuente con condiciones adversas para establecer comunicación con la estación maestra. Esto significa que la estación esclava debe encontrarse en un lugar donde se tenga la mayor atenuación por lluvia en el área de cobertura; además, debe ubicarse lo más cercano posible al contorno de las huellas de PIRE y G/T provistas por el fabricante del satélite. Estas condiciones garantizan que el enlace, en otro sitio dentro del área de cobertura, pueda realizarse de manera exitosa, pues las condiciones serán menos desfavorables.

Por lo tanto, la ubicación de la estación esclava será la Isla de Cozumel, por contar con las condiciones antes mencionadas. Entonces, el enlace que será tratado dentro del programa quedará como se muestra en la figura 6.1.



Figura 6.1 Ubicación de la estación maestra y la estación esclava (México D.F. – Cozumel)

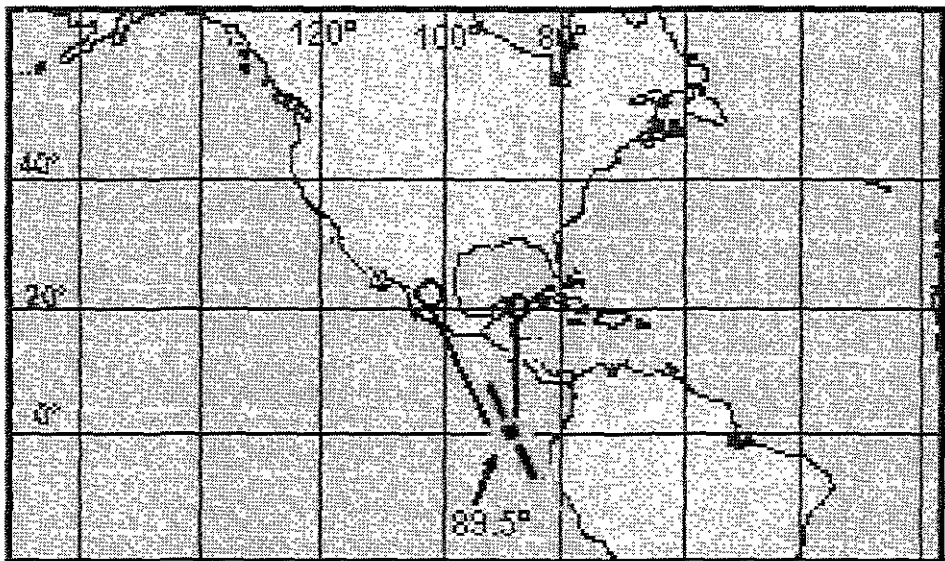


Figura 6.2 Enlace Satelital y ubicación del satélite trasladado ficticiamente.

6.2 Características técnicas de la red

Los parámetros más importantes, para definir la operatividad de la red son los siguientes:

- Dimensión de la red
- Técnica de acceso
- Tipo de asignación
- Modalidad de operación
- Velocidad de transmisión
- Modulación
- Disponibilidad
- Codificación (FEC)
- Polarización
- BER

6.2.1 Dimensión de la red

La determinación de la dimensión de la red se hace en base a las necesidades de cobertura que tenga el usuario para su sistema. En este ejemplo se propone una dimensión igual a 50 estaciones esclavas, que en la práctica es una dimensión común.

6.2.2 Técnica de acceso

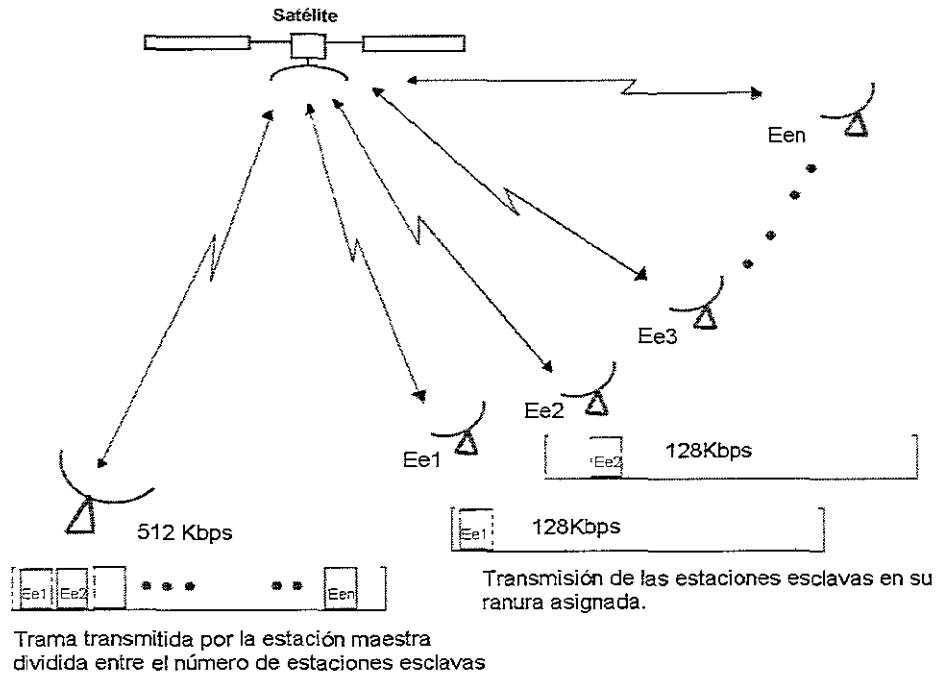
La técnica de acceso propuesta en nuestro ejemplo es, el Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA), debido a que es la más usada en redes VSAT; además, de ser conveniente para la dimensión de la red antes descrita. Usualmente, en una red VSAT tipo estrella las estaciones esclavas transmiten esporádicamente, por lo que no es necesario utilizar un enlace dedicado; además, de que resultaría impráctico y muy costoso, puesto que la demanda de ancho de banda en el satélite sería muy grande y el costo por el servicio se incrementaría demasiado. Por este motivo, es preferible invertir en equipo que pueda manejar esta técnica de acceso, a pesar de que sea más costoso en comparación al que se usa en otras técnicas de acceso, como sería FDMA. En la práctica se puede decir que el equipo en TDMA es 40% o 50% más costoso que el utilizado en otras técnicas.

6.2.3 Tipo de asignación

El tipo de asignación propuesto en este ejemplo es, Asignación Fija (FA), pues además estamos proponiendo una transmisión y recepción uniforme en las estaciones esclavas.

6.2.4 Modalidad de operación

Para la configuración de la red hasta ahora propuesta la modalidad de operación es MCPC en el enlace de maestra a esclavas, y SCPC para el de esclava-maestra. Esto debido a que la maestra se comunica con las esclavas mediante una multiplexación en tiempo, manejando tantos canales como estaciones esclavas haya en la red, pero con una sola portadora. En cambio, las estaciones esclavas mandan un solo canal con información en su ranura de tiempo asignada sobre una portadora compartida entre todas las esclavas.



6.3 Red típica TDMA donde la estación maestra le transmite a todas las estaciones esclavas.

6.2.5 Velocidad de transmisión

En este ejemplo hemos propuesto velocidades de transmisión que suelen ser estándares en las redes VSAT. Para el enlace maestra-esclava tenemos una velocidad de transmisión de 512 Kbps y para el enlace esclava-maestra usamos una velocidad de transmisión de 128 Kbps [UIT94]. Cabe señalar que la velocidad de transmisión efectiva que recibe y emite cada estación esclava resulta una porción de la propuesta, esto es, la velocidad a la que se comunica la estación maestra se divide entre las cincuenta estaciones esclavas, teniendo así, para este caso, una velocidad real de 10.24 Kbps. Así mismo la velocidad de transmisión efectiva por estación esclava, de la propuesta para el enlace esclava-maestra resulta de 2.56 Kbps. Además, debe considerarse la estructura de la trama a utilizar, pero para este ejemplo suponemos una trama continua en donde la información de cada esclava va seguida una de otra es decir, que no contiene bits agregados para control y señalización.

6.2.6 Modulación

Como ya se había explicado en el capítulo 2, la modulación QPSK es la más utilizada en redes VSAT. Por esta razón se ha decidido usar la misma en esta tesis.

6.2.7 Disponibilidad

Las disponibilidades más usuales en la banda Ku y Ka son 99.8% y 99.5% [TELESAT] respectivamente. Debido a esto son las disponibilidades utilizadas en esta tesis.

6.2.8 Codificación (FEC)

En la práctica es más frecuente encontrar que los enlaces satelitales se lleven a cabo utilizando un FEC de 7/8. Además, como se puede observar en la tabla 1.2, la relación energía-bits a ruido que exige este valor de FEC es más alto que los demás valores, por lo tanto, al elegir dicho valor se garantiza que el enlace puede operara para valores menores de FEC. Por esta razón se ha decidido utilizar este valor en la tesis.

6.2.9 Polarización

Aunque existen algunas polarizaciones que se ven menos afectadas por la lluvia, nos hemos visto limitados a usar las polarizaciones indicadas en las características del satélite, las cuales son, polarización horizontal para los enlaces de subida y vertical para los enlaces de bajada del transpondedor elegido.

6.2.10 BER

La elección de este parámetro para nuestro ejemplo se hizo en base a los datos mostrados en la tabla 1.2. Como se ha mencionado anteriormente, buscamos las condiciones adversas para este ejemplo, ya que así garantizamos que cualquier enlace funcionaría en la zona de cobertura (bajo las mismas características de la red). Por lo tanto, el BER que recibe mayor atenuación es el de 10^{-5} . Cabe mencionar que el programa puede hacer el cálculo para un BER de hasta 10^{-8} , pero para un enlace satelital el BER elegido es suficiente para una transmisión normal como lo muestra la tabla 1.2, puesto que el usar un BER más pequeño significa una transmisión de datos de muy alta velocidad, como sería una transmisión de 2.048 Mbps o mayor.

6.3 Parámetros considerados en el cálculo de enlace

En este ejemplo los parámetros importantes de las estaciones consideradas, y que se utilizan como datos en el programa, son los siguientes:

- Ubicación geográfica
- Ángulos de elevación y azimut
- Rango
- Atenuación por lluvia
- Pérdidas
- PIRE del satélite
- G/T del satélite
- Frecuencias de operación

Tabla 6.1 Parámetros calculados que permanecen relativamente constantes en el cálculo de enlace.

PARAMETRO	CIUDAD DE MÉXICO	CIUDAD DE COZUMEL		
Ubicación geográfica	19.24° N Latitud 99.09° O Longitud	20.52° N Latitud 86.92° O Longitud		
Altitud	2,240 [m]	0 [m]		
Ángulos	$\theta = 64.9^\circ$ elevación $\phi = 152.85^\circ$ azimut	$\theta = 65.95^\circ$ elevación $\phi = 188.44^\circ$ azimut		
Rango	36301.07 [Km]	36259.32 [Km]		
Frecuencias de operación*	14.27141 [GHz] subida en banda Ku polarización horizontal 10.99216 [GHz] bajada en banda Ku polarización vertical 29.54800 [GHz] subida en banda Ka polarización horizontal 19.74800 [GHz] bajada en banda Ka polarización vertical	14.27141 [GHz] subida en banda Ku polarización horizontal 10.99216 [GHz] bajada en banda Ku polarización vertical 29.54800 [GHz] subida en banda Ka polarización horizontal 19.74800 [GHz] bajada en banda Ka polarización vertical		
Ubicación del satélite	89.5 °O			
PIRE del satélite†	53 [dBW] en banda Ku 54 [dBW] en banda Ka	51 [dBW] en banda Ku 50 [dBW] en banda Ka		
G/T del satélite	+ 4 [dB/K] en banda Ku 13 [dB/K] en banda Ka	+ 1 [dB/K] en banda Ku 10 [dB/K] en banda Ka		
Disponibilidad	99.8 % para banda Ku 99.5 % para banda Ka	99.8 % para banda Ku 99.5 % para banda Ka		
Tasa de transmisión	512 [Kbps]	128 [Kbps]		
Coefficiente de atenuación R_{0.01} %	85 [mm/hr]	115 [mm/hr]		
Pérdidas por Absorción Atmosférica	Ku	Ka	Ku	Ka
	0.07 [dB]	0.44 [dB]	0.07 [dB]	0.44 [dB]
Pérdidas en los conectores	0.5 [dB]		0.5 [dB]	
Pérdidas por desapuntamiento	0 [dB]		0 [dB]	
Atenuación por lluvia	Ku	Ka	Ku	Ka
	2.10 [dB]	3.94 [dB]	7.24 [dB]	12.88 [dB]
<i>Enlace de subida</i>	2.10 [dB]	3.94 [dB]	7.24 [dB]	12.88 [dB]
<i>Enlace de bajada</i>	1.71 [dB]	2.61 [dB]	2.47 [dB]	3.99 [dB]

* Estas frecuencias son las centrales del transpondedor utilizado. Para el cálculo de enlace cambian según el ancho de banda del canal y su banda de guarda, tanto para el enlace CD. de México - Cozumel como para el de Cozumel - CD. de México

† Estos valores corresponden al contorno más cercano a la ciudad en cuestión. Además, se debe obtener una relación con el ancho de banda utilizado del transpondedor por la señal, pues dependiendo de esto sólo se utiliza una fracción proporcional de este parámetro

6.4 Técnicas de mitigación de la atenuación por lluvia

Debido a que la atenuación por lluvia en la propagación de señales de la banda Ka es muy severa, es conveniente combatirla de algún modo, y desde hace ya varios años se han estado realizando investigaciones al respecto.

En las especificaciones del satélite ANIK F2 se sugiere que las terminales empleen un control de potencia del enlace de subida (UPC*) de lazo abierto y rango dinámico de 3 dB. El funcionamiento se basa en la estimación del desvanecimiento del enlace de subida usando la señal de prueba (*beacon* operando en 20.195 GHz) del enlace de bajada, y en el incremento de la potencia de la portadora para compensar el desvanecimiento del enlace de subida. Además de esta técnica también se sugiere reducir el FEC, ya que a valores más altos de este parámetro la atenuación de la señal es mayor, la mejora producida por estas técnicas se suma con aquellas que provienen del diseño del satélite, como los son: utilización de haces puntuales que proporcionan mayor ganancia en el área de cobertura y distribución estratégica de los valores de PIRE, proporcionado un valor mayor de este parámetro en regiones con mayor densidad de lluvia.

El control de potencia del enlace de subida se presenta en tres modalidades, las cuales son:

- Lazo Abierto: una estación recibe su propia transmisión y debe confiar en el valor del desvanecimiento medido de la señal de prueba (*beacon* en el enlace de bajada) para realizar el control de potencia, mediante una estimación para el enlace de subida.
- Lazo cerrado: dos estaciones se encuentran en la misma área de cobertura y una de ellas puede recibir su propia transmisión, pero el UPC basado en esta portadora, es erróneo debido a los cambios en el back-off de entrada y de salida. El UPC debe estar basado en la recepción de una portadora que provenga de otra estación, para así hacer la estimación correcta para el enlace de subida basándose en ella.
- Lazo con retroalimentación: una estación central monitorea los niveles de todas las portadoras que recibe y le indica a las estaciones afectadas que ajusten sus niveles de potencia.

Además de estas técnicas, también es posible utilizar medidas como el incremento de la duración de las ranuras de tiempo en TDMA, aumentar diámetros de antenas, o usar lo que se llama diversidad de ubicación, que significa tener dos estaciones separadas entre sí, de tal manera que siempre se elija la que se vea menos afectada por la lluvia en ese momento. [ACOSTA97]

La técnica más reciente y que promete mejores resultados es la utilización de satélites inteligentes. Esto significa que los satélites de próximas generaciones contendrán procesadores abordo, para que éstos se encarguen de procesar la señal y regenerarla, y así contrarrestar los efectos producidos por la lluvia. Además, los satélites tendrán la capacidad de enviar comandos a las estaciones terrenas, para indicarles los ajustes necesarios que deban aplicar a la potencia de sus portadoras para mitigar la atenuación por lluvia.

* Uplink Power Control

Referencias

[UIT94] "Manual Sobre Sistemas y Estaciones Terrenas VSAT" Suplemento No. 3 UIT, Ginebra, 1994.

[TELESAT] "ANIK F2 Ka-Band system: High speed Internet access", A. Grami, K. Gordon y A. Shoamanesh, Telesat Canadá, Abril del 2000.

[ACOSTA97] "Rain fade compensation alternatives for Ka band communication satellites" Acosta, Roberto, NASA Lewis Research Centre, 1977.

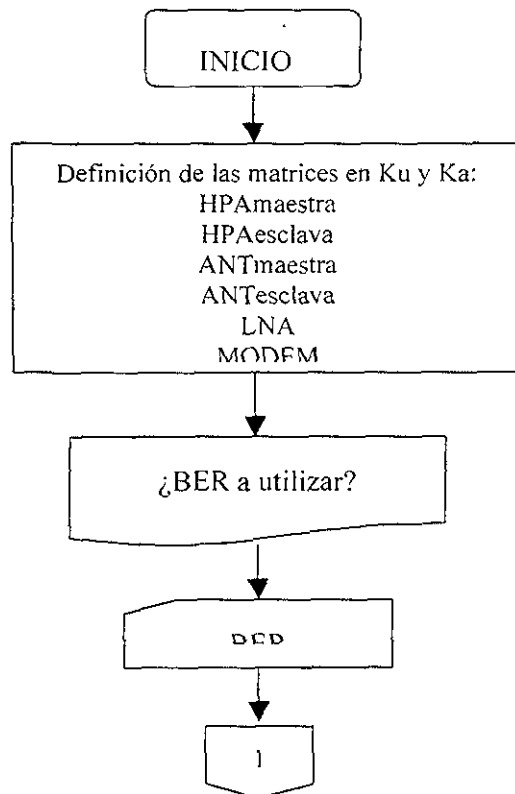
CAPÍTULO 7

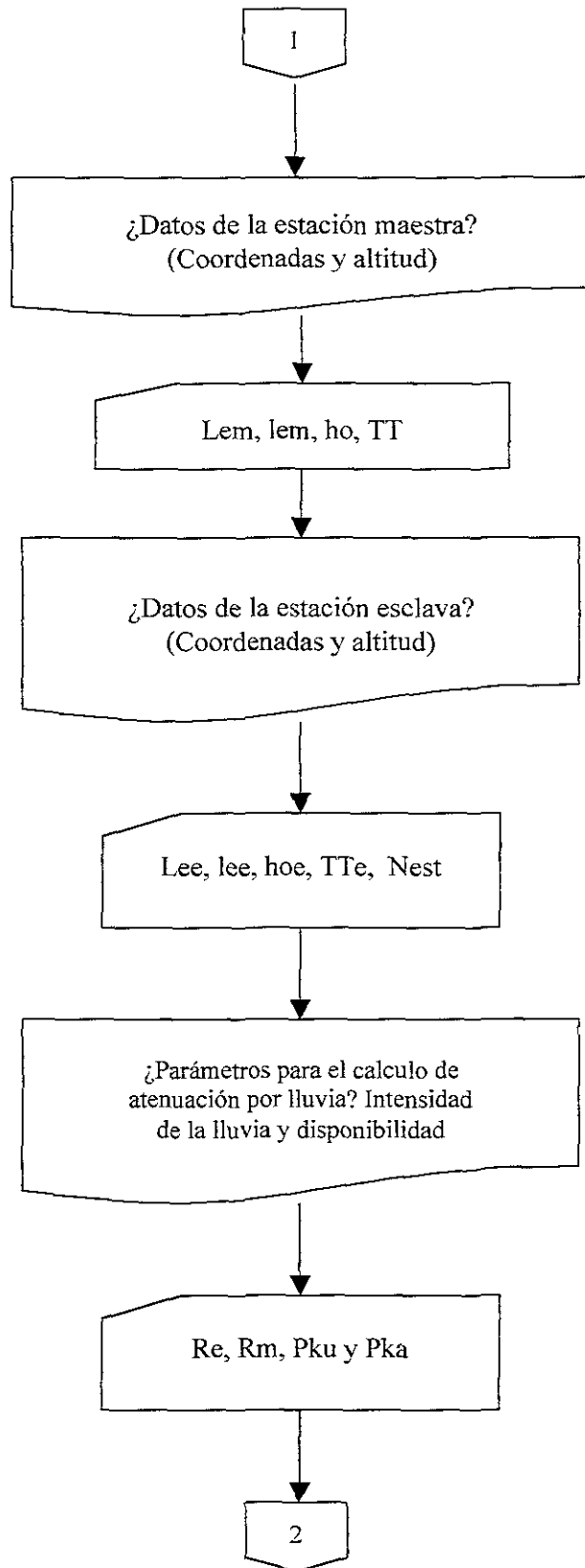
Diagrama de flujo y programa

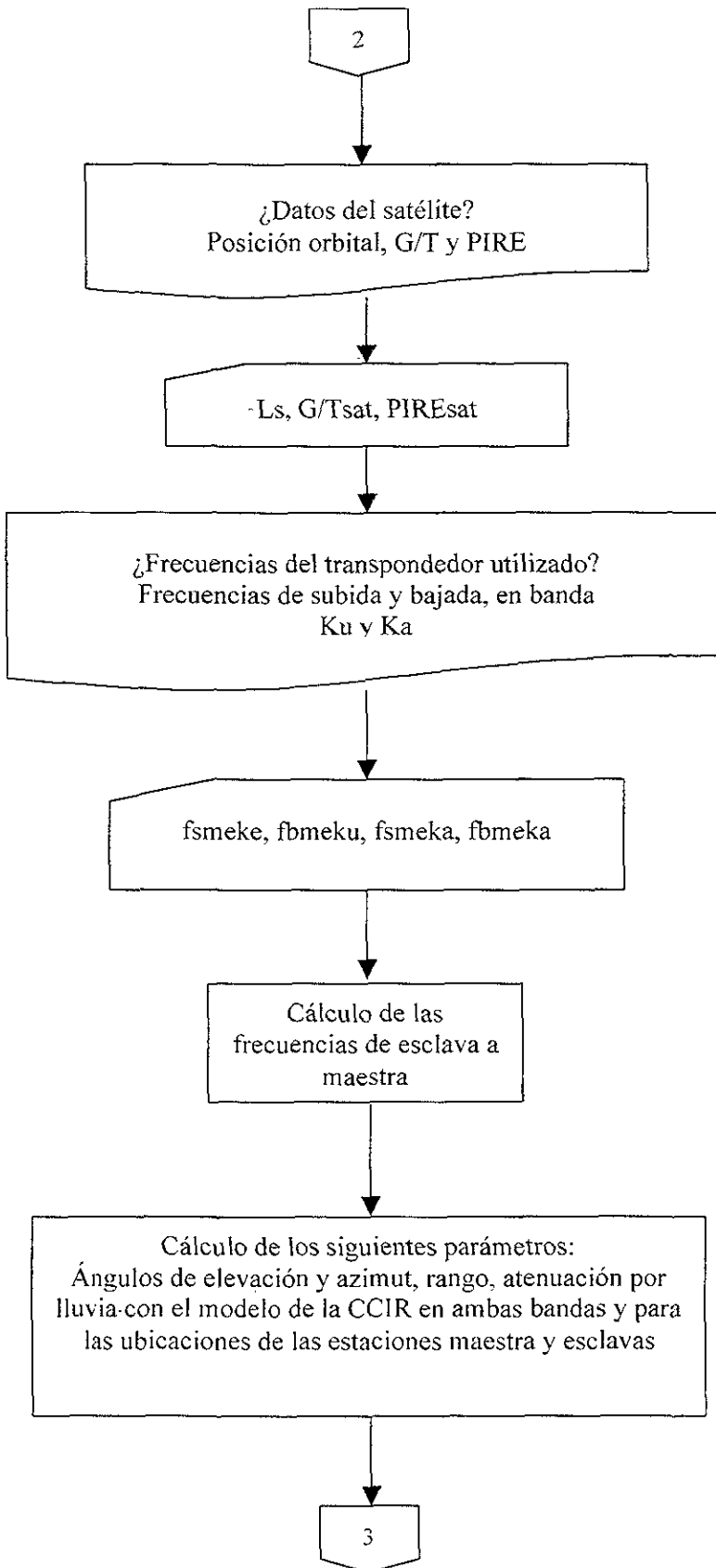
Una vez que en el capítulo 5 se ha definido como realizar el cálculo de enlace, en este capítulo se desarrollará un programa de computadora, que nos ayude a calcular las múltiples combinaciones con los diferentes equipos y el transpondedor presentados en los capítulos 3 y 4, respectivamente.

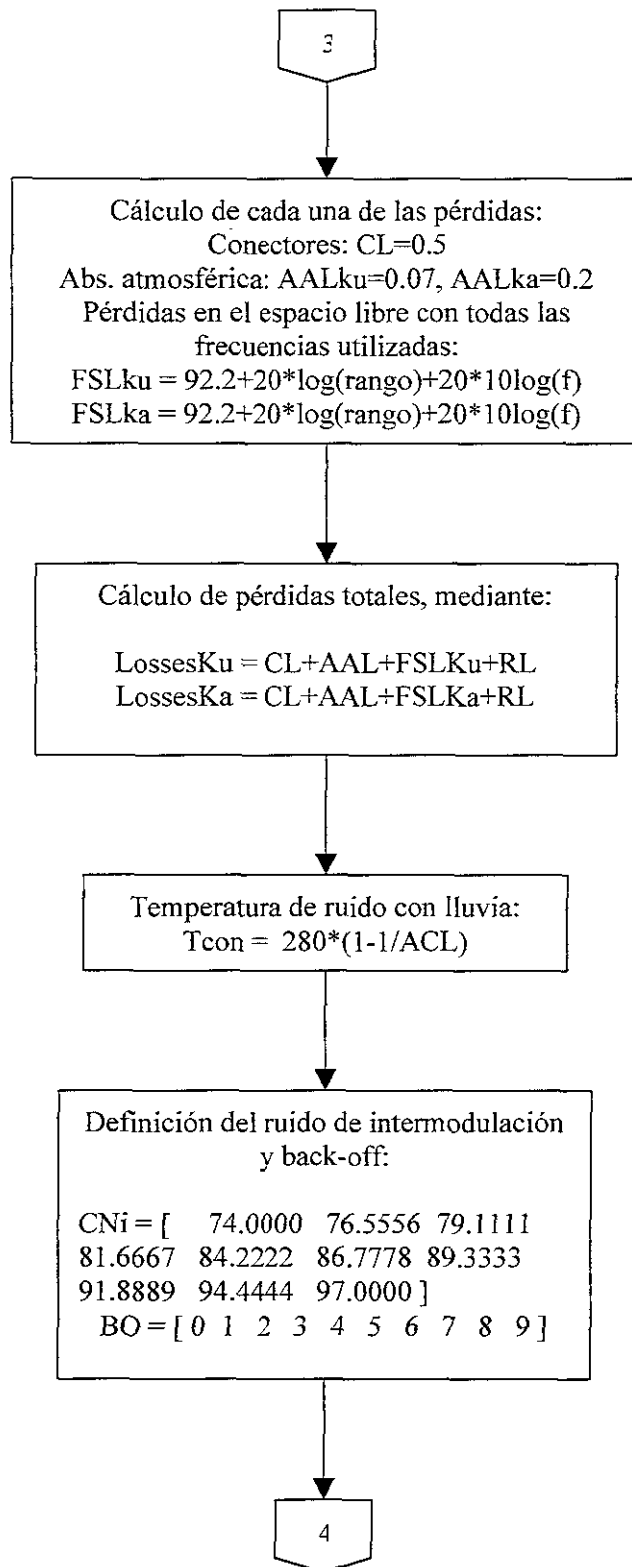
7.1 Diagrama de flujo.

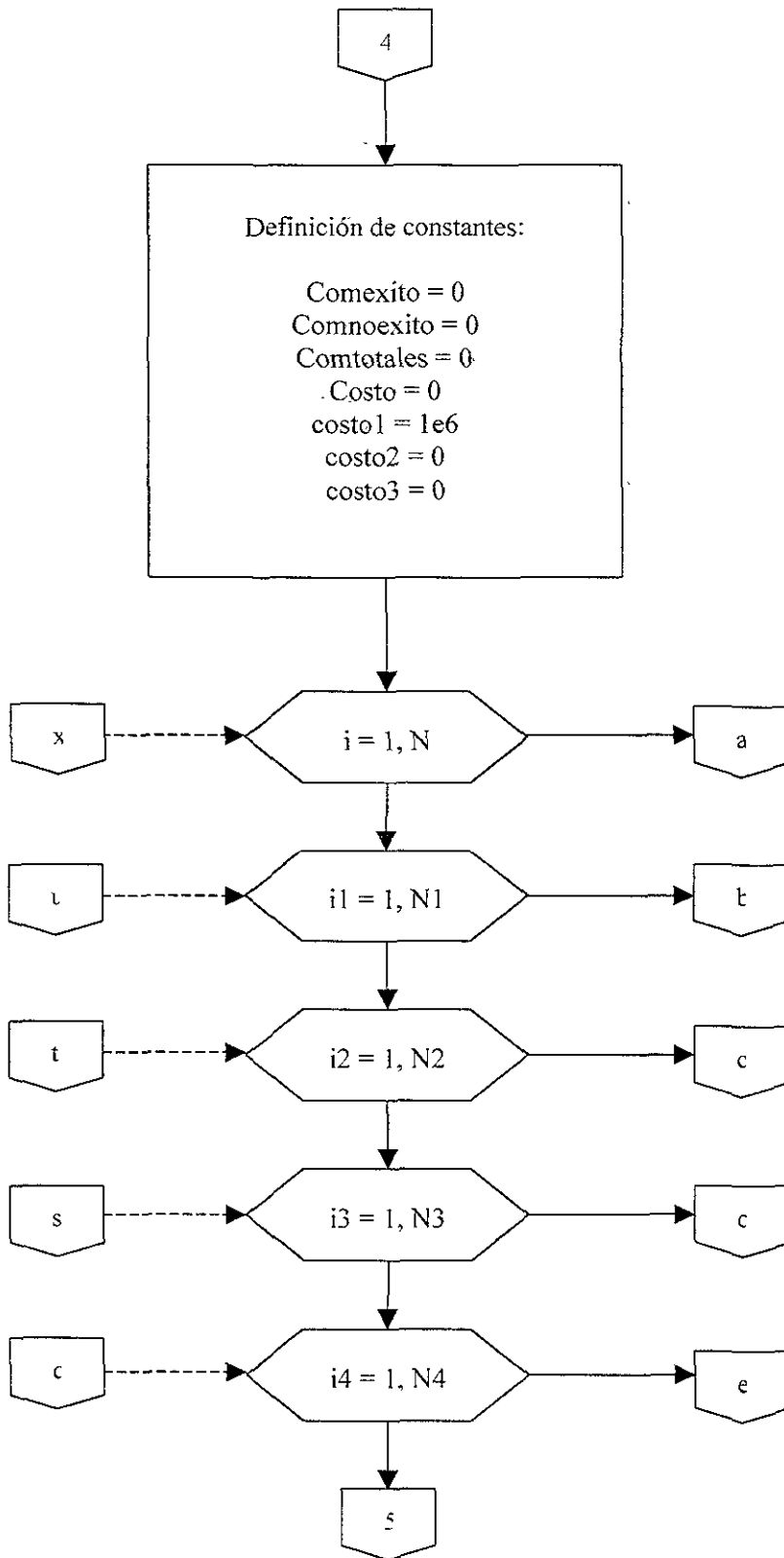
A continuación se presenta el diagrama de flujo, que nos ayudará a desarrollar el programa de computadora.

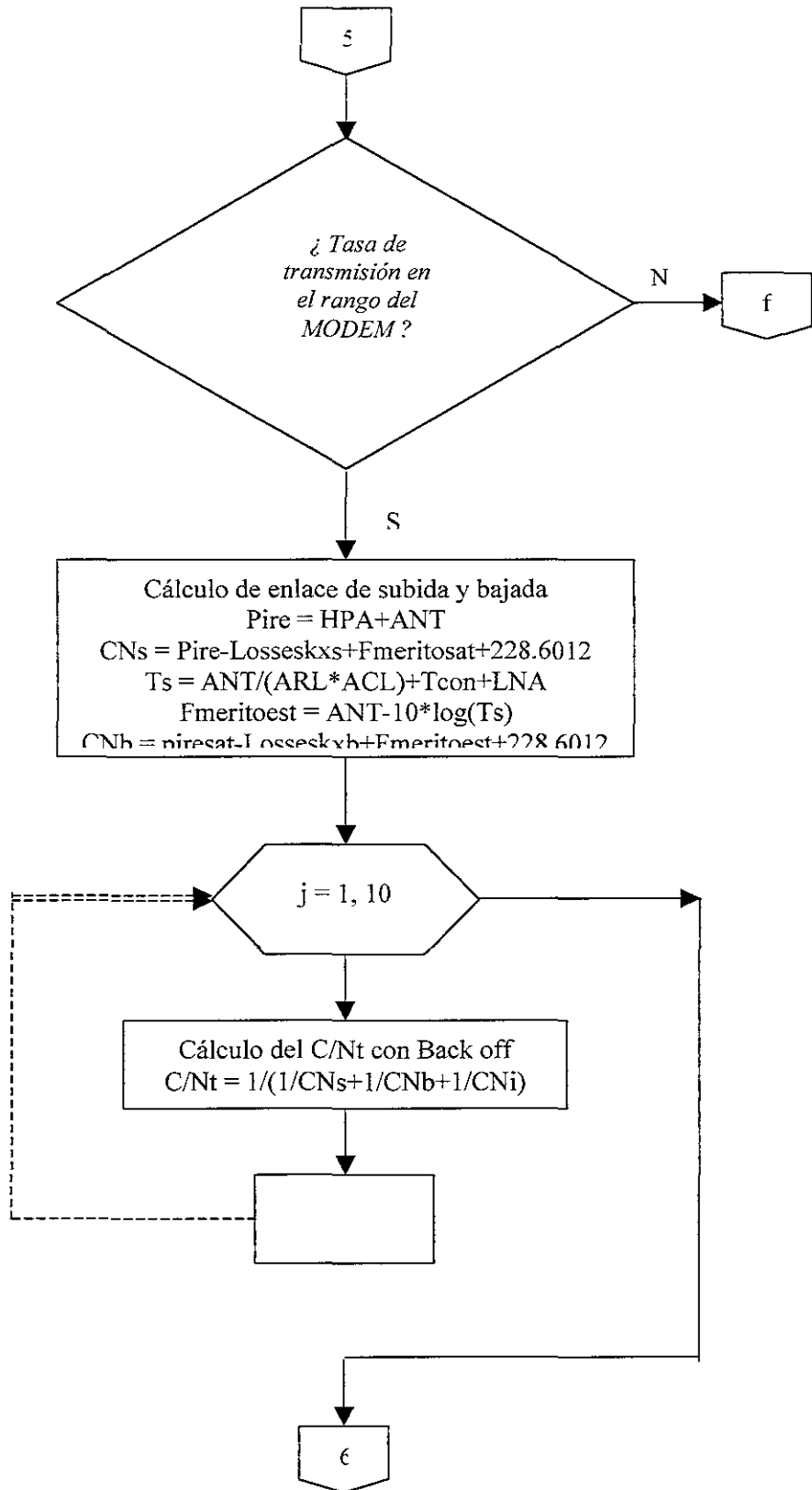


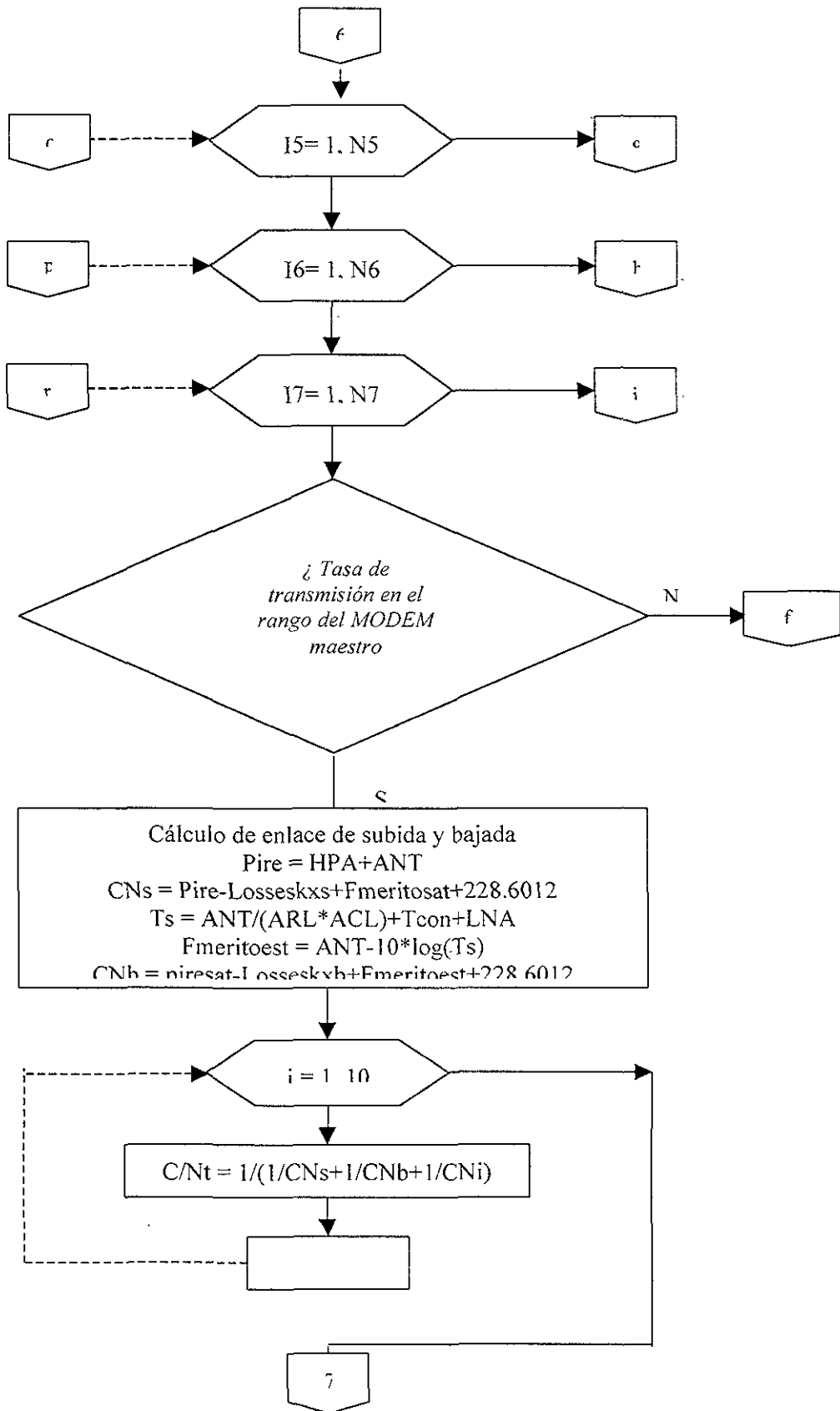


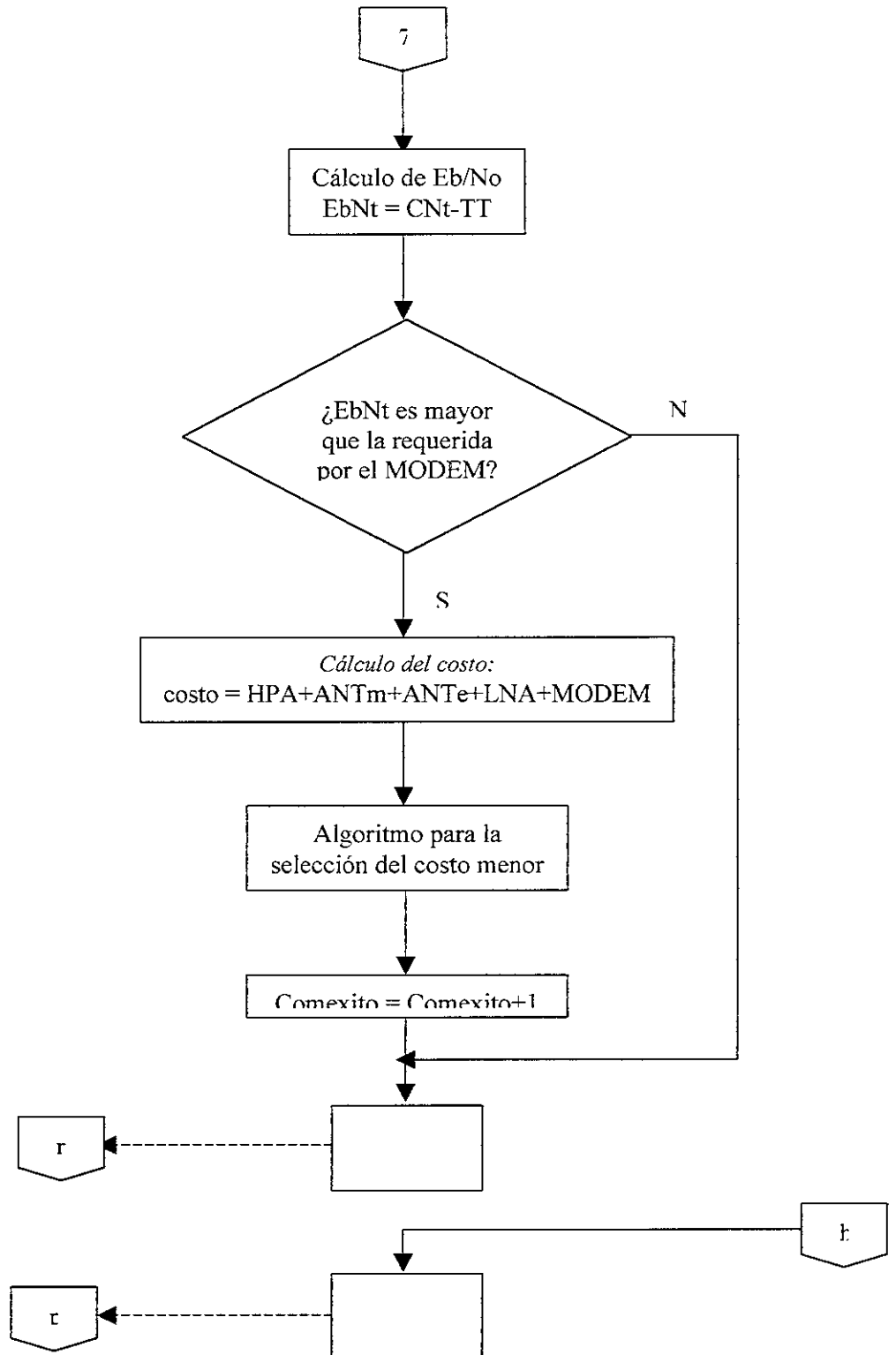


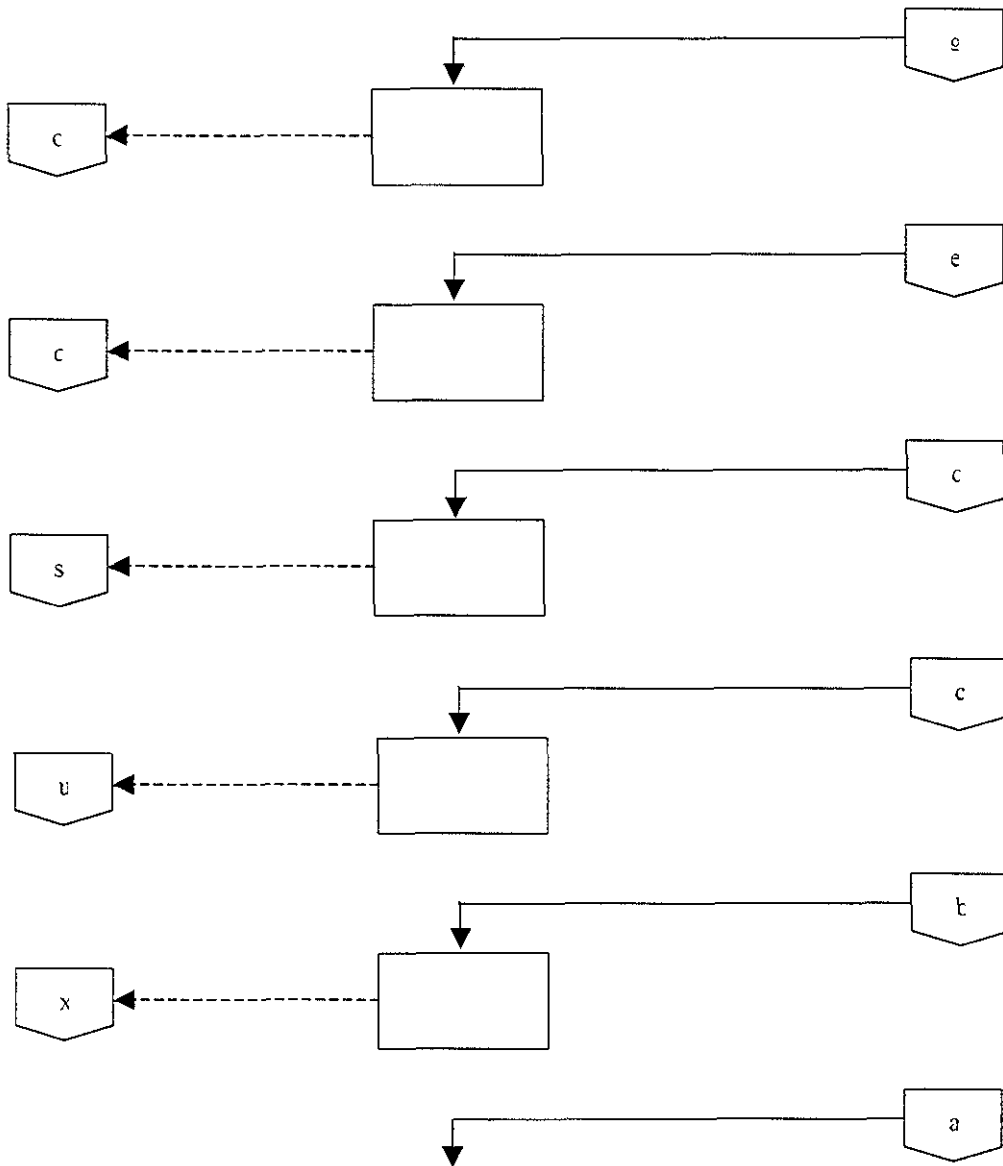


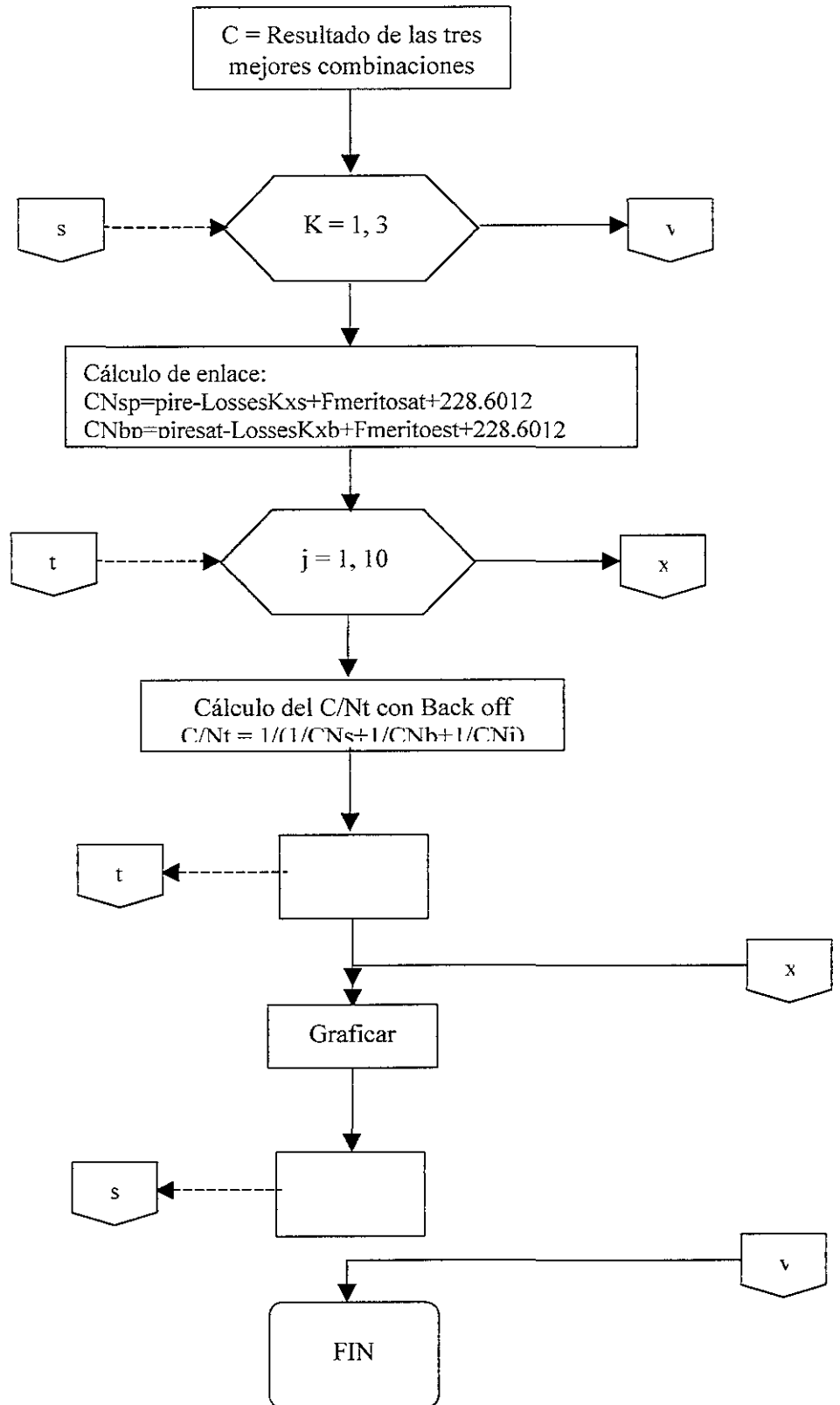












7.2 Selección del lenguaje de programación

El desarrollo del programa requiere de un lenguaje de programación que facilite el manejo algebraico de matrices, así como también, una velocidad aceptable para poder realizar las múltiples combinaciones; de tal forma, el lenguaje sobre el que se desarrolla el programa de computo es MATLAB®.

7.3 Variables del programa.

Las variables consideradas en el programa de computadora para el cálculo de enlace, como se mencionó en el capítulo 2, son las siguientes:

- HPA de la estación maestra y esclava.
- Antenas maestras y esclavas.
- LNA
- MODEM

En este programa se definirán las características de las variables en matrices de $N \times M$, donde N es el número de equipos disponibles y M es el número de características de cada uno de ellos.

Las matrices que se definirán son las siguientes:

- HPA de la estación maestra y esclava: se definirán cuatro matrices de $N \times 3$; dos para estaciones maestras y dos para estaciones esclavas en la banda Ku y Ka. La primera columna tiene la potencia de transmisión, la segunda el costo del HPA proporcionado por el fabricante y la tercera el ancho de banda de operación del amplificador.
- Antenas maestras y esclavas: se definirán cuatro matrices de $N \times 6$: dos para estaciones maestras y dos para estaciones esclavas en las bandas Ku y Ka. La primera columna tiene la ganancia de transmisión en dB, la segunda tiene la ganancia de recepción en dB, la tercera es la temperatura de ruido, la cuarta tiene el costo de cada una de las antenas, mientras que las dos últimas tienen la pendiente y la ordenada al origen de una recta que se ajusta al comportamiento de la temperatura de cada una de las antenas.
- LNA: en este caso se definen dos matrices de $N \times 2$; una para Ku y otra para Ka. La primera columna tiene la temperatura de ruido y la segunda el costo.
- MODEM: para este caso se define solo una matriz de $N \times 9$; las primeras 6 columnas contienen los valores de E_b/N_0 para un BER dado, en este caso desde 10^{-3} a 10^{-8} ; las columnas 7 y 8 tienen la tasa de transmisión mínima y máxima que aceptan cada uno de los MODEM, y la última el costo del MODEM.

Una vez definidas las matrices se realizará el cálculo de enlace, para las múltiples combinaciones con los diferentes equipos y el transpondedor presentados en los capítulos 3 y 4, respectivamente.

7.4 Criterios de selección.

En este programa se realiza el cálculo de enlace tomando en consideración que está lloviendo en los sitios donde se encuentra la estación maestra y esclava mencionados en el capítulo 6.

Los criterios de selección de este programa son: el costo, el BER, la tasa de transmisión y que cumpla con el cálculo de enlace ya mencionado. Dentro de este cálculo se seleccionarán las tres mejores combinaciones.

Para elegir qué equipo cumple con los criterios de selección, basta con cumplir el enlace con lluvia intensa, ya que es el que menor C/N tiene al final de todo el recorrido.

7.5 Programa.

El programa realizará todos los cálculos para los parámetros que se introduzcan al programa. Este programa tiene como finalidad realizar las múltiples combinaciones generadas por todos los diferentes equipos propuestos en el capítulo 3, así como también el satélite elegido en el capítulo 4.

7.5.1 Descripción del programa.

El programa consta de pantallas de captura para la recopilación de los datos del problema que quiere resolverse. Las pantallas son las siguientes:

BER a utilizar.

En el siguiente menú se selecciona el BER a utilizar en el cálculo:

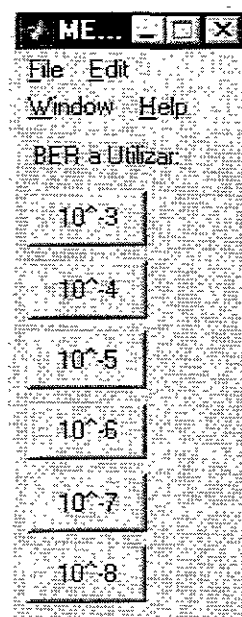


Figura 7.1 Opciones del BER

Datos de la estación maestra.

En la siguiente pantalla de captura se introducen los datos de la estación maestra, tales como: longitud de la ubicación en ($^{\circ}$), latitud de la ubicación en ($^{\circ}$), altitud en Km. y la velocidad de transmisión a la que la estación maestra va a transmitir hacia las esclavas.

Datos de la estación maestra	
Longitud de la ubicación de la estación maestra($^{\circ}$)	99.09
Latitud de la ubicación de la estación maestra($^{\circ}$)	19.24
Altitud de la ubicación de la estación maestra en Km.	2.240
Tasa de transmisión en kbps[Maestra-Esclavas]	512
Cancel	OK

Figura 7.2 Datos de la estación maestra.

Datos de la estación esclava.

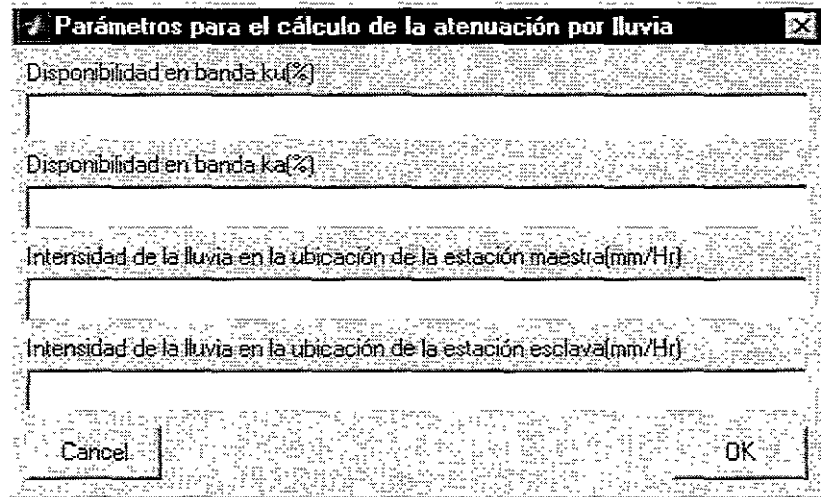
En la siguiente pantalla de captura se introducen los datos de la estación esclava, tales como: longitud de la ubicación en ($^{\circ}$), latitud la ubicación en ($^{\circ}$), altitud en Km., la velocidad de transmisión a la que las estaciones esclavas van a transmitir hacia la maestra y el número de estaciones esclavas de nuestra red.

Datos de la estación esclava	
Longitud de la ubicación de la estación esclava($^{\circ}$)	86.92
Latitud de la ubicación de la estación esclava($^{\circ}$)	20.52
Altitud de la ubicación de la estación esclava en Km.	0
Tasa de transmisión en Kbps (Esclavas-Maestra)	128
Numero de estaciones	50
Cancel	OK

Figura 7.3 Datos de la estación esclava.

Parámetros para el cálculo de atenuación por lluvia.

En la siguiente pantalla de captura se introducen los parámetros necesarios para realizar el cálculo de la atenuación por lluvia, los cuales son: la disponibilidad en banda Ku en %, la disponibilidad en banda ka en %, la intensidad de lluvia en la ubicación de la estación maestra en (mm/hr) y la intensidad de lluvia en la ubicación de la estación esclava en (mm/hr).



Parámetros para el cálculo de la atenuación por lluvia

Disponibilidad en banda ku(%)

Disponibilidad en banda ka(%)

Intensidad de la lluvia en la ubicación de la estación maestra(mm/Hr)

Intensidad de la lluvia en la ubicación de la estación esclava(mm/Hr)

Cancel OK

Figura 7.4 Parámetros para el cálculo de la atenuación por lluvia.

Datos del satélite.

En la siguiente pantalla de captura se introducen los parámetros del satélite, los cuales son: longitud del satélite, figura de mérito del satélite en banda Ku en (dB/°K) para la estación maestra, PIRE del satélite en banda Ku en (dBW) para la estación maestra, figura de mérito del satélite en banda Ka en (dB/°K) para la estación maestra, PIRE del satélite en banda Ka en (dBW) para la estación maestra, figura de mérito del satélite en banda Ku en (dB/°K) para la estación esclava, PIRE del satélite en banda Ku en (dBW) para la estación esclava, figura de mérito del satélite en banda Ka en (dB/°K) para la estación esclava, PIRE del satélite en banda Ka en (dBW) para la estación esclava.

Datos del satélite	
Longitud del satélite(°)	89.5
Figura de mérito del satélite en banda Ku(dB/k), estación maestra	4
PIRE del satélite en banda ku(dBW), estación maestra	53
Figura de mérito del satélite en banda Ka(dB/k), estación maestra	13
PIRE del satélite en banda ka(dBW), estación maestra	54
Figura de mérito del satélite en banda Ku(dB/k), estación esclava	1
PIRE del satélite en banda ku(dBW), estación esclava	51
Figura de mérito del satélite en banda Ka(dB/k), estación esclava	10
PIRE del satélite en banda ka(dBW), estación esclava	50
Cancel	OK

Figura 7.5 Datos del satélite.

Datos del satélite.

En la siguiente pantalla de captura se introducen las frecuencias de operación del transpondedor seleccionado de nuestro satélite, las cuales son: frecuencia de subida en banda Ku, frecuencia de bajada en banda Ku, frecuencia de subida en banda Ka y frecuencia de bajada en banda Ka, todas en GHz.

Frecuencias de operación	
Frecuencia de subida en banda Ku del transpondedor(GHz)	14.27141
Frecuencia de bajada en banda Ku del transpondedor(GHz)	10.99216
Frecuencia de subida en banda Ka del transpondedor(GHz)	29.54800
Frecuencia de bajada en banda Ka del transpondedor(GHz)	19.74800
Cancel	OK

Figura 7.6 Frecuencias de Operación

Una vez que se han introducido todos los datos y parámetros en las pantallas mostradas, el programa procede a realizar todos los cálculos correspondientes.

Debido a la gran cantidad de cálculos que realiza el programa es necesario esperar unos cuantos minutos para consultar los resultados, a continuación se muestran y explican las ventanas de resultados.

Graficas de las relaciones portadora a ruido.

La siguiente figura es un ejemplo de las primeras seis graficas que muestra el programa después de realizar todos los cálculos necesarios, corresponden a las relaciones portadora a ruido de subida (líneas rojas), de bajada (líneas azules), de intermodulación (línea turquesa) y total (líneas verdes), tanto para el enlace de maestra - esclava (líneas continuas) como para el esclava - maestra (líneas punteadas), tres de ellas muestran las tres opciones más baratas en la banda Ku y las siguientes tres, las de la banda Ka.

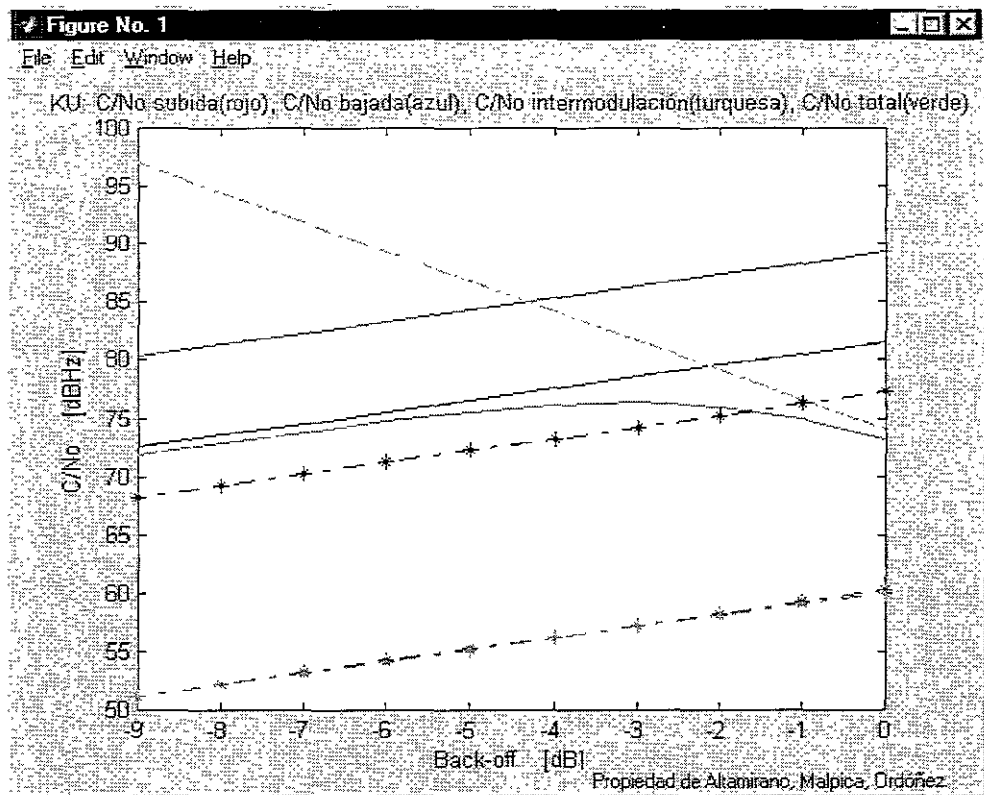


Figura 7.7 Gráfica de resultados de la primera opción en la banda Ku.

Tabla de resultados

La siguiente figura muestra la séptima pantalla mostrada por el programa después de realizar los cálculos, en ella se enlista el número correspondiente al renglón de las matrices de equipo definidas en el código fuente, además del costo total de la red en las tres opciones de menor costo, en ambas bandas.

RESULTADOS EN BANDA KU

Equipo	Opción 1	Opción 2	Opción 3
HPA MAESTRO	2	3	2
ANTENA MAESTRA	1	1	1
ANTENA ESCLAVA	1	1	1
LNA ESCLAVA	1	1	1
MODEM ESCLAVA	4	4	4
HPA ESCLAVA	3	3	3
LNA MAESTRO	1	1	2
MODEM MAESTRO	4	4	4
COSTO EN DOLARES	235750	237350	237740

RESULTADOS EN BANDA KA

Equipo	Opción 1	Opción 2	Opción 3
HPA MAESTRO	2	2	2
ANTENA MAESTRA	1	1	1
ANTENA ESCLAVA	2	2	2
LNA ESCLAVA	1	1	1
MODEM ESCLAVA	4	4	4
HPA ESCLAVA	3	3	3
LNA MAESTRO	1	1	1
MODEM MAESTRO	4	5	3
COSTO EN DOLARES	464370	464470	464520

Propiedad de Altamirano, Malpica, Ordóñez

Figura 7.7 Pantalla de resultados en banda Ku y Ka.

Descripción del equipo seleccionado.

En la siguiente figura se muestra a manera de ejemplo una de las seis pantallas mostradas por el programa después de desplegar la Tabla de resultados, en ella se presenta la descripción del equipo seleccionado, las primeras tres corresponden a las mejores opciones de la banda Ku y las siguientes tres son de la banda Ka. En dicha pantalla se enlista el fabricante, modelo, características principales de cada equipo y costo.

Además de esto se presenta, el número de estaciones, el costo total de la red y la relación portadora a ruido total $(C/N_0)_T$, la relación energía-bits a ruido (E_b/N_0) y la relación energía-bits a ruido (E_b/N_0) requerida por el Modem para los enlaces de maestra-esclava y esclava-maestra.

Figure No. 8

PRIMERA OPCION EN BANDA KU

Equipo	Fabricante	Modelo	Características	Costo [Dls.]
HPA MAESTRO	NEC	LD7213	TWT de 300 Watts	15000
ANTENA MAESTRA	Prodelin	1255 Offset	2.4 metros	2000
ANTENA ESCLAVA	Prodelin	1184 Offset	1.8 metros	671
LNA ESCLAVA	Microwave Amplifiers	AL16	170 K	1450
MODEM ESCLAVA	Comtech	SLM-7650	9.6 Kbps a 20.0 Mbps	3600
HPA ESCLAVA	Advantech	ARSA-K30	SSPA de 30 Watts	9000
LNA MAESTRO	Microwave Amplifiers	AL16	170 K	1450
MODEM MAESTRO	Comtech	SLM-7650	9.6 Kbps a 20.0 Mbps	3600
Número de estaciones	50		Costo Total de la red [Dls.]	235750
		Enlace Maestra-Esclava	Enlace Esclava-Maestra	
C/No[dBHz]		76.3672	59.9638	
Eb/No[dBHz]		19.2745	8.8917	
Eb/No[dBHz]modem		9.9	9.9	

Propiedad de Altamirano, Malpica, Qrdóñez

Figura 7.8 Descripción del equipo en banda Ku y Ka.

7.5.2 Actualización del Programa

El programa realizado en esta tesis, contiene las características y el costo del equipo necesario para realizar un enlace satelital (Antenas, HPA, LNA, Modems), estas listas se encuentran basadas en la investigación presentada en el capítulo 3, pero esto no significa que no se pueda realizar una actualización de costos y/o equipo en el programa.

Para realizar esta actualización es necesario ingresar los datos utilizados por el programa de la siguiente manera:

Actualización de Antenas.

Como ya se mencionó en la sección 7.3 las matrices definidas para las antenas son de NX6, para realizar su actualización basta con sustituir en la primera y segunda columnas la potencia de transmisión y recepción, ambas en dBi, en la tercera columna se tiene la temperatura de ruido, este valor puede llenarse con un valor arbitrario, ya que el programa se encargará de calcularlo para el ángulo de elevación que tenga la antena en la ubicación dada. Esto lo hace con los valores de la columna 5 y 6, que son la pendiente y la ordenada al origen respectivamente, de la recta que describe mejor el comportamiento de la temperatura de ruido en función del ángulo de elevación; estos datos deben ser calculados por el usuario basándose en las especificaciones técnicas que obtenga de las antenas. Finalmente, la columna 4 contiene el costo del equipo.

```

ANTmku=[47.6 49.2 28 2000 -.57 49.67;
         47.6 49.2 28 2571 -.4 40;
         .
         .
         .
         51.9 53.1 27 22300 -.4 45;
         51.6 52.7 39 21950 -.375 55.75];

```

Por otra parte se tiene una matriz de cadenas de caracteres que contiene los siguientes datos: fabricante en la primera columna, modelo en la segunda y características de importancia en la tercera, que para nuestro caso es el diámetro de la antena. Cabe señalar que los datos deben ser ingresados como se muestra en el siguiente ejemplo (entre apóstrofes):

```

ANTMKU={'Prodelin','1256 Offset','2.4 metros';
        'Prodelin','1244 Offset','2.4 metros';
        .
        .
        .
        'Andrew','ES39MPJK-1 Gregorian','3.9 metros';
        'Andrew','EES37MPJK-1 Gregorian','3.7 metros'};

```

Actualización de HPA's

En este caso las matrices que se definen para los amplificadores son de NX3. La primera columna corresponde a la potencia promedio (en watts) de equipo que se piense ingresar; la segunda, tienen el costo del equipo y por último la tercera columna contiene el ancho de banda del dispositivo. Esto se puede observar en la siguiente matriz del código usado en el programa:

```

HPAmku=[130 35410 500;
         300 44850 500;
         .
         .
         .
         650 64286 750;
         2500 68357 80];

```

Al igual que las antenas, también los amplificadores tienen una matriz de datos del mismo número de columnas, con la misma clase de datos, es decir, fabricante, modelo y características. En este caso, las características importantes del dispositivo son el tipo de amplificador y la potencia promedio.

```

HPAMKU={'NEC','LD4447','TWT de 130 Watts';
        'NEC','LD7213','TWT de 300 Watts';
        .
        .
        .
        'VERTEXrsi','2100TK','TWT de 650 Watts';
        'VERTEXrsi','2100KKU','Klystron de 2500 Watts'};

```

Actualización de LNA's

Para este tipo de dispositivos las matrices están constituidas por 2 columnas; la primera de temperatura de ruido y, la segunda de costo del equipo. Por lo tanto, resulta aún más sencillo actualizar estas matrices. Pero cabe señalar que en caso de que el fabricante no otorgue la temperatura de ruido sino la figura de ruido, se debe obtener la primera mediante la ecuación (5 - 33).

```
LNAku=[170 1450;
        120 1500;
        .
        .
        .
        473 1220;
        473 1230];
```

Como ya se ha mencionado la matriz de datos contiene en su primera columna el fabricante, en la segunda el modelo y en la tercera sus características más importantes; para el caso de los LNA la característica fundamental es la temperatura de ruido.

```
LNAKU={'Microwave Amplifiers','AL16','170 K';
        'Microwave Amplifiers','AL18','120 K';
        .
        .
        .
        'JCA','JCA816-502','473 K';
        'JCA','JCA816-503','473 K'};
```

Actualización de MODEM's

La matriz definida para los MODEM's está formada por 9 columnas. Las primeras seis contienen el valor de la relación Energía-bits a ruido exigida por el modem, a un FEC de 7/8, para BER's desde 10^{-3} hasta 10^{-8} , distribuidos uno a uno en cada columna, todas en dB. En la séptima y octava columna se tiene las velocidades de transmisión mínima y máxima, respectivamente, en Kbps. Y finalmente, la columna 9 tiene el costo del equipo.

```
MODEM=[6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 9.6 20000 35700;
        6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 2.4 5000 4015;
        .
        .
        .
        5.7 6.2 6.9 7.5 8.0 8.8 9.6 4375 4050;
        6.0 6.9 7.5 8.0 8.6 9.1 9.6 4375 4200];
```


La tercera columna para la matriz de datos tiene como características esenciales las velocidades de transmisión, mínima y máxima, como se muestra a continuación.

```
MODEME={'Comtech','VLM-7650','9.6 Kbps a 20.0 Mbps';  
        'Comtech','VLM-3650','2.4 Kbps a 5 Mbps';  
        .  
        .  
        .  
        'Radyne ComStream','CM701A','9.6 Kbps a 4.375 Mbps';  
        'Radyne ComStream','CM2401A','9.6 Kbps a 4.375 Mbps'};
```

7.5.3 Código Fuente del programa.

El código fuente se muestra en el Apéndice.

CAPÍTULO 8

Resultados y Conclusiones

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos después de ejecutar el programa descrito en el capítulo 7, para resolver el ejemplo propuesto en el capítulo 6. Además, se presentarán algunas gráficas que muestran el comportamiento del costo total de la red en función de algunos parámetros, como lo son: Tasa de transmisión y número de estaciones. Cabe mencionar que el programa está diseñado para variar otros parámetros con los cuales se podrían obtener resultados adicionales del comportamiento del costo total de la red.

8.1 Resultados del problema propuesto.

8.1.1 Gráficas de relación portadora a ruido.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas después de ejecutar el programa, que describen el comportamiento del enlace para las tres mejores opciones de cada banda de frecuencias.

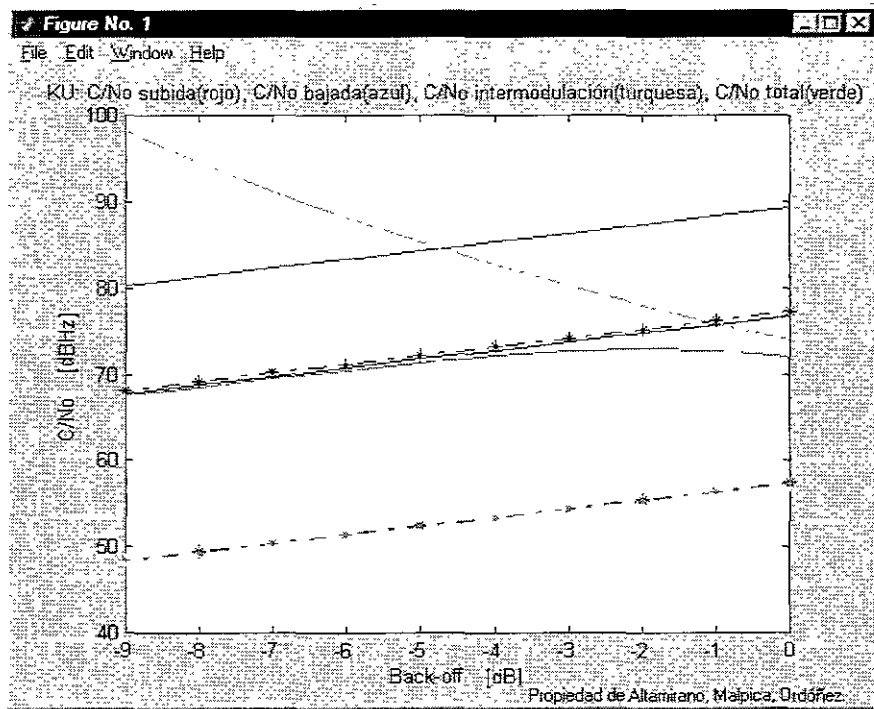


Figura 8.1 Relaciones portadora a ruido para la mejor opción de la banda Ku.

En la figura 8.1 podemos observar las relaciones portadora a ruido de subida $[C/N_0]_S$ (líneas rojas), de bajada $[C/N_0]_B$ (líneas azules), de intermodulación $[C/N_0]_I$ (línea turquesa) y total $[C/N_0]_T$ (líneas verdes) para el enlace maestra – esclava (líneas continuas) y esclava – maestra (líneas punteadas) en función de Back-off de entrada. Esta misma distribución de curvas se presenta en las siguientes cinco graficas.

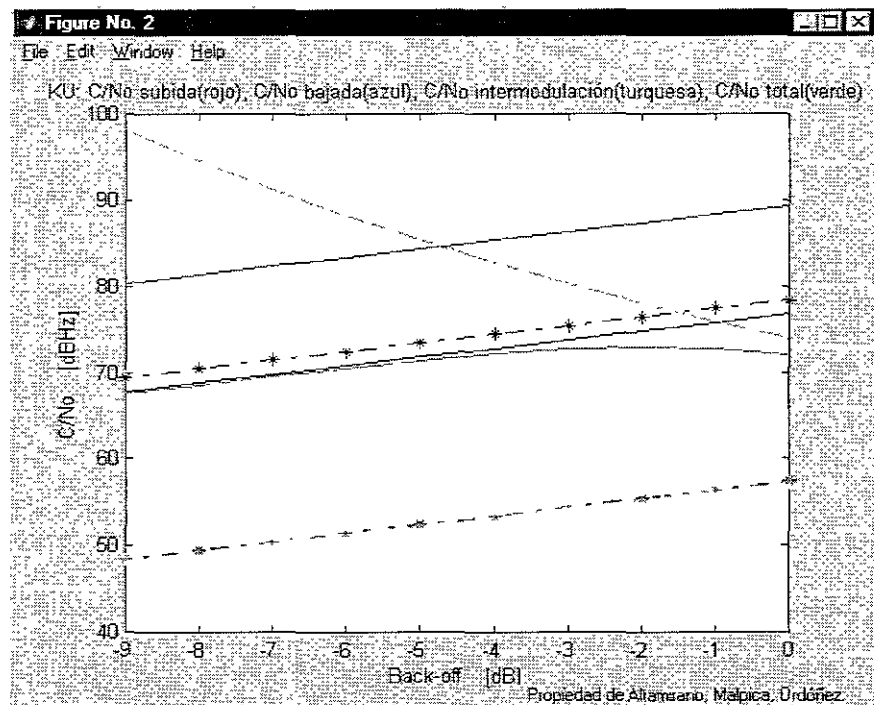


Figura 8.2 Relaciones portadora a ruido para la segunda opción de la banda Ku.

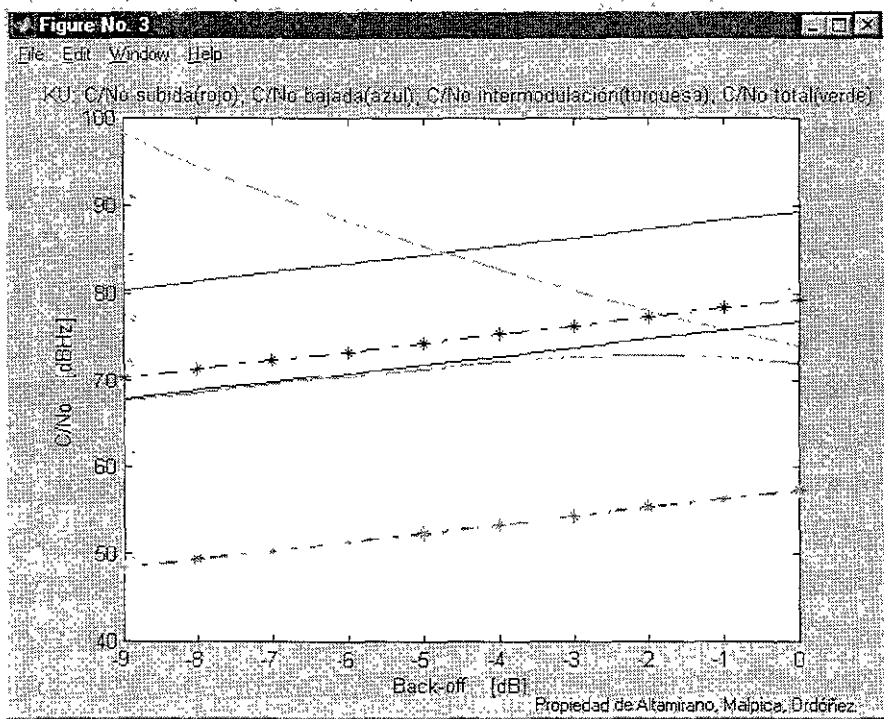


Figura 8.3 Relaciones portadora a ruido para la tercera opción de la banda Ku.

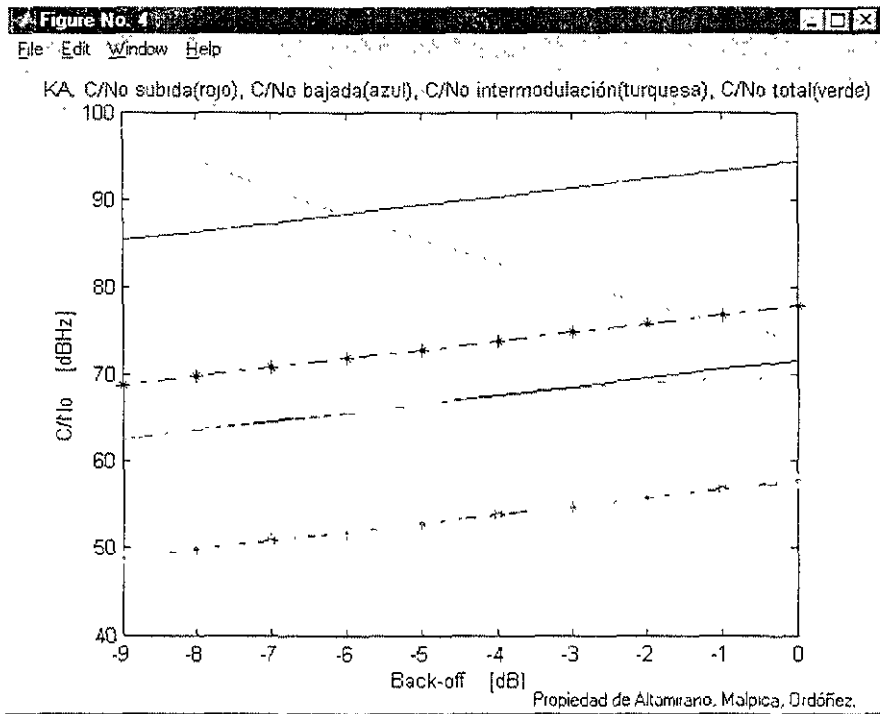


Figura 8.4 Relaciones portadora a ruido para la mejor opción de la banda Ka.

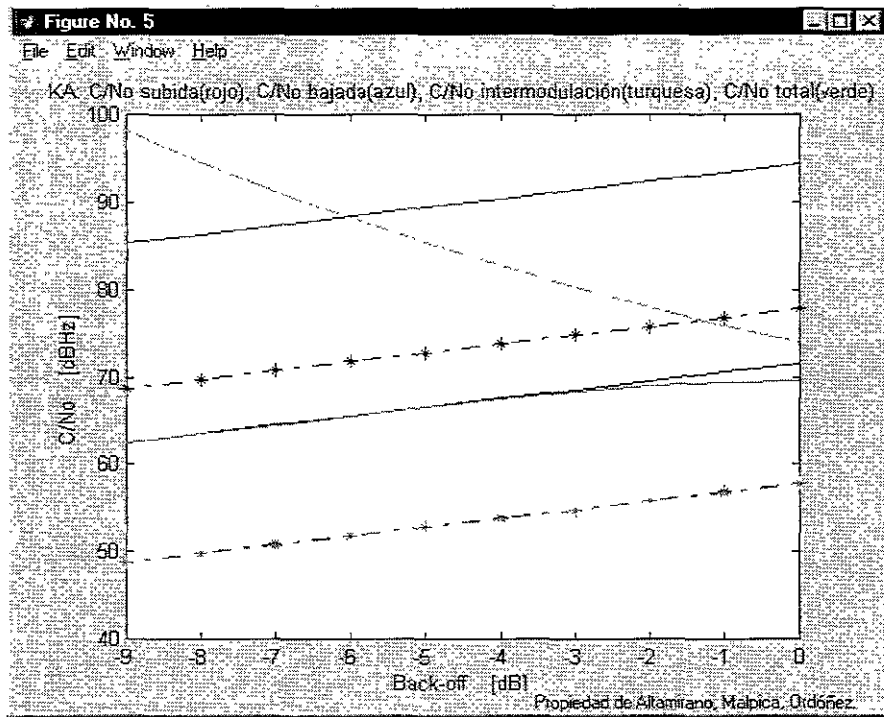


Figura 8.5 Relaciones portadora a ruido para la segunda opción de la banda Ka.

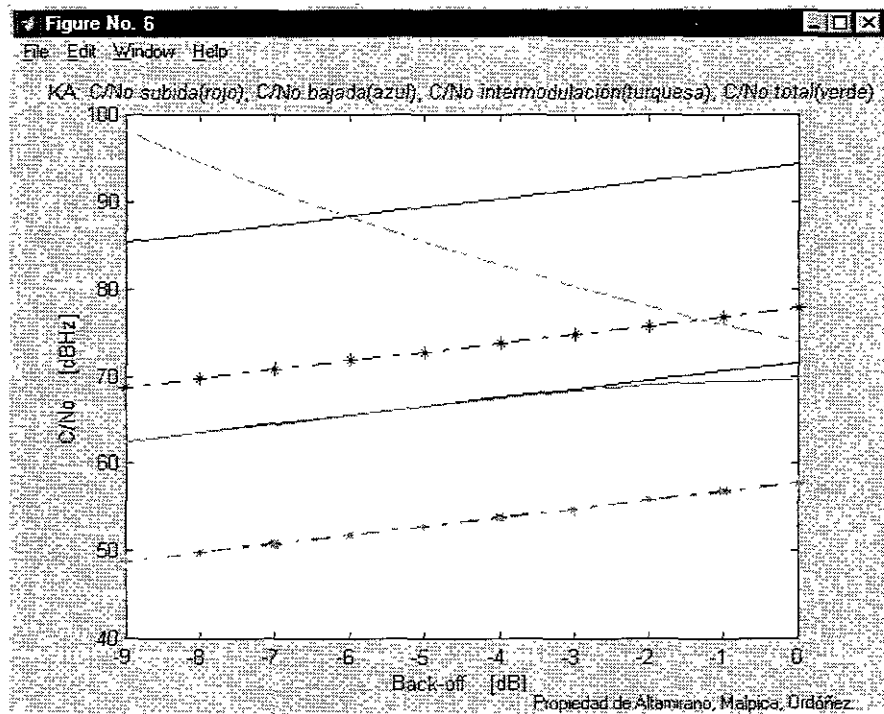


Figura 8.6 Relaciones portadora a ruido para la tercera opción de la banda Ka.

En las seis gráficas anteriores podemos observar el comportamiento de la relación C/N_0 total de los enlaces con respecto al Back-off de entrada en el satélite. Es notorio que la relación C/N_0 del enlace maestra-esclava para la banda-Ku (figuras 8.1, 8.2 y 8.3) presenta un Back-off de aproximadamente 2 dB, que produce un máximo en esta relación. Por otro lado, la misma relación, pero en el enlace esclava-maestra, no presenta un máximo al incrementar el Back-off, esto es debido a que el C/N_0 de subida de dicho enlace es muy pequeño, lo que origina que el valor de la relación C/N_0 total tienda a este valor ya que el cálculo es de tipo recíproco, y aunque con el Back-off el valor de la relación C/N_0 de intermodulación aumente de nada sirve al enlace por el valor pequeño del enlace de subida, esto debido a la baja potencia con que transmiten las estaciones esclavas y el tamaño de las antenas.

El enlace de bajada también presenta comportamientos distintos dependiendo el enlace en cuestión. Es decir, para el enlace maestra-esclava la relación C/N_0 de bajada tiene un valor menor que el del enlace esclava-maestra, esto es por los diámetros de las antenas que realizan la recepción de la señal en las estaciones terrenas. También podemos observar que para el enlace esclava-maestra se tiene un comportamiento distinto al del enlace maestra-esclava entre sus relaciones C/N_0 de subida y bajada. En el enlace maestra-esclava la relación C/N_0 de subida es mayor que la relación C/N_0 de bajada, esto debido a que la estación maestra posee un amplificador con mayor potencia y una antena con mayor ganancia debido a su diámetro, pero la estación esclava tiene una antena de diámetro pequeño lo que no ayuda al enlace de bajada. Por otro lado, para el enlace esclava-maestra la situación es la opuesta a la anterior descrita, pues el enlace de subida no se ve beneficiado por la pequeña potencia que poseen los amplificadores en las estaciones esclavas, además de los diámetros de sus antenas, en cambio, el enlace de bajada se ve muy favorecido por la alta ganancia de la estación maestra, y por esto su valor es más alto que el del enlace de subida.

De la misma forma, en la banda Ka observamos un comportamiento completamente similar al descrito para la banda Ku.

8.1.2 Equipo seleccionado.

En la figura 7 se proporciona una tabla que presenta las tres mejores opciones de cada banda, y el costo total de la red.

RESULTADOS EN BANDA KU			
Equipo	Opción 1	Opción 2	Opción 3
HPA MAESTRO	10	10	10
ANTENA MAESTRA	1	1	1
ANTENA ESCLAVA	1	1	1
LNA ESCLAVA	13	13	13
MODEM ESCLAVA	14	14	14
HPA ESCLAVA	13	13	13
LNA MAESTRO	1	2	3
MODEM MAESTRO	15	15	15
COSTO EN DOLARES	293250	293300	293571

RESULTADOS EN BANDA KA			
Equipo	Opción 1	Opción 2	Opción 3
HPA MAESTRO	11	11	11
ANTENA MAESTRA	1	1	1
ANTENA ESCLAVA	2	2	2
LNA ESCLAVA	20	20	20
MODEM ESCLAVA	14	14	14
HPA ESCLAVA	3	3	3
LNA MAESTRO	20	20	20
MODEM MAESTRO	15	8	9
COSTO EN DOLARES	574370	574445	574445

Figura 8 7 Tabla de equipo seleccionado y costo total de la red en ambas bandas.

8.1.3 Características del equipo

Las siguientes seis pantallas muestran la descripción del equipo seleccionado, las primeras tres corresponden a las mejores opciones de la banda Ku y las siguientes tres son de la banda Ka. En dicha pantalla se enlista el fabricante, modelo, características principales de cada equipo y costo.

Además de esto se presenta, el número de estaciones, el costo total de la red y la relación portadora a ruido total $(C/N_0)_T$, la relación energía-bits a ruido (E_b/N_0) y la relación energía-bits a ruido (E_b/N_0) requerida por el Modem para los enlaces de maestra-esclava y esclava-maestra.

Figure No. 8

File Edit Window Help

PRIMERA OPCION EN BANDA KU

Equipo	Fabricante	Modelo	Características	Costo [Dls.]
HPA MAESTRO	XICOM	XT-50T1	TWT de 70 Watts	30050
ANTENA MAESTRA	Prodelin	1256 Offset	2.4 metros	2000
ANTENA ESCLAVA	Prodelin	1194 Offset	1.8 metros	754
LNA ESCLAVA	JCA	JCA714-201	627 K	1100
MODEM ESCLAVA	Radyne ComStream	CM601A	9.6 Kbps a 2.5 Mbps	2150
HPA ESCLAVA	Microwave Amps	AM2	SSPA de 0.5 Watts	1100
LNA MAESTRO	Microwave Amplifiers	AL16	170 K	1450
MODEM MAESTRO	Radyne ComStream	CM701A	9.6 Kbps a 4.375 Mbps	4050

Número de estaciones	50	Costo Total de la red [Dls.]	293250
C/N_0 [dBHz]	Enlace Maestra-Esclava 72.9649	Enlace Esclava-Maestra	58.0001
E_b/N_0 [dBHz]	15.8722		6.928
E_b/N_0 [dBHz]modem	8		6.9

Propiedad de Alkamirano, Malpica, Ordóñez.

Figura 8.8 Equipo seleccionado para la primera opción de la banda Ku.

Figure No. 9

File Edit Window Help

SEGUNDA OPCIÓN EN BANDA KU

Equipo	Fabricante	Modelo	Características	Costo (Dls.)
HPA MAESTRO	XICOM	XT-50T1	TWT de 70 Watts	30050
ANTENA MAESTRA	Prodelin	1256 Offset	2.4 metros	2000
ANTENA ESCLAVA	Prodelin	1194 Offset	1.8 metros	764
LNA ESCLAVA	JCA	JCA714-201	627 K	1100
MODEM ESCLAVA	Radyne ComStream	CM601A	9.6 Kbps a 2.5 Mbps	2150
HPA ESCLAVA	Microwave Amps	AM2	SSPA de 0.5 Watts	1100
LNA MAESTRO	Microwave Amplifiers	AL18	120 K	1500
MODEM MAESTRO	Radyne ComStream	CM701A	9.6 Kbps a 4.375 Mbps	4050
Número de estaciones		50	Costo Total de la red (Dls.)	293900
C/No[dBHz]		Enlace Maestra-Esclava	Enlace Esclava-Maestra	
		72.9649	58.0126	
Eb/No[dBHz]		15.8722	6.9405	
Eb/No[dBHz]modem		8	6.9	

Propiedad de Altamirano, Malpica, Ordóñez

Figura 8.9 Equipo seleccionado para la segunda opción de la banda Ku.

Figure No. 10

File Edit Window Help

TERCERA OPCIÓN EN BANDA KU

Equipo	Fabricante	Modelo	Características	Costo (Dls.)
HPA MAESTRO	XICOM	XT-50T1	TWT de 70 Watts	30050
ANTENA MAESTRA	Prodelin	1256 Offset	2.4 metros	2000
ANTENA ESCLAVA	Prodelin	1194 Offset	1.8 metros	764
LNA ESCLAVA	JCA	JCA714-201	627 K	1100
MODEM ESCLAVA	Radyne ComStream	CM601A	9.6 Kbps a 2.5 Mbps	2150
HPA ESCLAVA	Microwave Amps	AM2	SSPA de 0.5 Watts	1100
LNA MAESTRO	VERTEXsi	LKR12590	90 K	1771
MODEM MAESTRO	Radyne ComStream	CM701A	9.6 Kbps a 4.375 Mbps	4050
Número de estaciones		50	Costo Total de la red (Dls.)	293571
C/No[dBHz]		Enlace Maestra-Esclava	Enlace Esclava-Maestra	
		72.9649	58.0201	
Eb/No[dBHz]		15.8722	6.948	
Eb/No[dBHz]modem		8	6.9	

Propiedad de Altamirano, Malpica, Ordóñez

Figura 8.10 Equipo seleccionado para la tercera opción de la banda Ku.

Figure No. 11

PRIMERA OPCION EN BANDA KA

Equipo	Fabricante	Modelo	Características	Costo [Dls.]
HPA MAESTRO	RF Amplifiers	HD18337	TWT de 10 Watts	102500
ANTENA MAESTRA	Andrew	ES56 KA-T Gregorian	5,6 metros	126670
ANTENA ESCLAVA	Prodelin	3098	0,98 metros	400
LNA ESCLAVA	JCA	JCA1826-300	438 K	1150
MODEM ESCLAVA	Radyne ComStream	CM601A	9,6 Kbps a 2,5 Mbps	2150
HPA ESCLAVA	SPACEK LABS INC.	SP268-20-29	55PA de 0,9 Watts	3100
LNA MAESTRO	JCA	JCA1826-300	438 K	1150
MODEM MAESTRO	Radyne ComStream	CM701A	9,6 Kbps a 4,375 Mbps	4050
Número de estaciones	50		Costo Total de la red [Dls.]	574370
C/No[dBHz]	Enlace Maestra-Esclava		Enlace Esclava-Maestra	
	69,5924		58,4165	
Eb/No[dBHz]	12,4997		7,3444	
Eb/No[dBHz]modem	8		6,9	

Propiedad de Altamirano, Malpica, Ordóñez

Figura 8.11 Equipo seleccionado para la primera opción de la banda Ka.

Figure No. 12

SEGUNDA OPCION EN BANDA KA

Equipo	Fabricante	Modelo	Características	Costo [Dls.]
HPA MAESTRO	RF Amplifiers	HD18337	TWT de 10 Watts	102500
ANTENA MAESTRA	Andrew	ES56 KA-T Gregorian	5,6 metros	126670
ANTENA ESCLAVA	Prodelin	3098	0,98 metros	400
LNA ESCLAVA	JCA	JCA1826-300	438 K	1150
MODEM ESCLAVA	Radyne ComStream	CM601A	9,6 Kbps a 2,5 Mbps	2150
HPA ESCLAVA	SPACEK LABS INC.	SP268-20-29	55PA de 0,9 Watts	3100
LNA MAESTRO	JCA	JCA1826-300	438 K	1150
MODEM MAESTRO	Comtech	SDM-300L	19,2 Kbps a 4,375 Mbps	4125
Número de estaciones	50		Costo Total de la red [Dls.]	574445
C/No[dBHz]	Enlace Maestra-Esclava		Enlace Esclava-Maestra	
	69,5924		58,4165	
Eb/No[dBHz]	12,4997		7,3444	
Eb/No[dBHz]modem	8		7	

Propiedad de Altamirano, Malpica, Ordóñez

Figura 8.12 Equipo seleccionado para la segunda opción de la banda Ka.

Figure No. 13

File Edit Window Help

TERCERA OPCIÓN EN BANDA KA

Equipo	Fabricante	Modelo	Características	Costo [Dlls]
HPA MAESTRO	RF Amplifiers	HD18337	TWT de 10 Watts	102500
ANTENA MAESTRA	Andrew	ES56 KA-1 Gregorian	5.6 metros	126670
ANTENA ESCLAVA	Prodelin	3098	0.98 metros	400
LNA ESCLAVA	JCA	JCA1826-300	438 K	1150
MODEM ESCLAVA	Predyne ComStream	CM601A	9.6 Kbps a 2.5 Mbps	2150
HPA ESCLAVA	SPACEK LABS INC	SP268-20-29	SSPA de 0.9 Watts	3100
LNA MAESTRO	JCA	JCA1826-300	438 K	1150
MODEM MAESTRO	Comtech	SDM-300A	2.4 Kbps a 5.0 Mbps	4125
Número de estaciones:	50		Costo Total de la red [Dlls]	574445
C/No[dBHz]	Enlace Maestra-Esclava	69.5924	Enlace Esclava-Maestra	58.4165
Eb/No[dBHz]	12.4997		7.3444	
Eb/No[dBHz]modem	8		7.2	

Propiedad de Altamirano, Malpica, Ordóñez

Figura 8.13 Equipo seleccionado para la tercera opción de la banda Ka.

8.1.4 Costo unitario por estación

A continuación se muestra una tabla que presenta el precio de cada estación, tanto maestra como esclava para las opciones desplegadas por el programa.

Tabla 8.1 Costo unitario de las estaciones esclavas y maestras en las bandas Ku y Ka.

OPCIÓN	COSTO DE LA ESTACIÓN MAESTRA [Dlls]		COSTO DE LA ESTACIÓN ESCLAVA [Dlls]	
	Ku	Ka	Ku	Ka
1	37,550	234,370	5,114	7,750
2	37,600	234,445	5,114	7,750
3	37,871	234,445	5,114	7,750

8.2 El costo en base a diferentes parámetros.

En esta sección se presentan gráficas que muestran el comportamiento del costo total de la red de 50 terminales en base al número estaciones (figura 8.14) y la tasa de transmisión del enlace esclava – maestro (figuras 8.15 y 8.16).

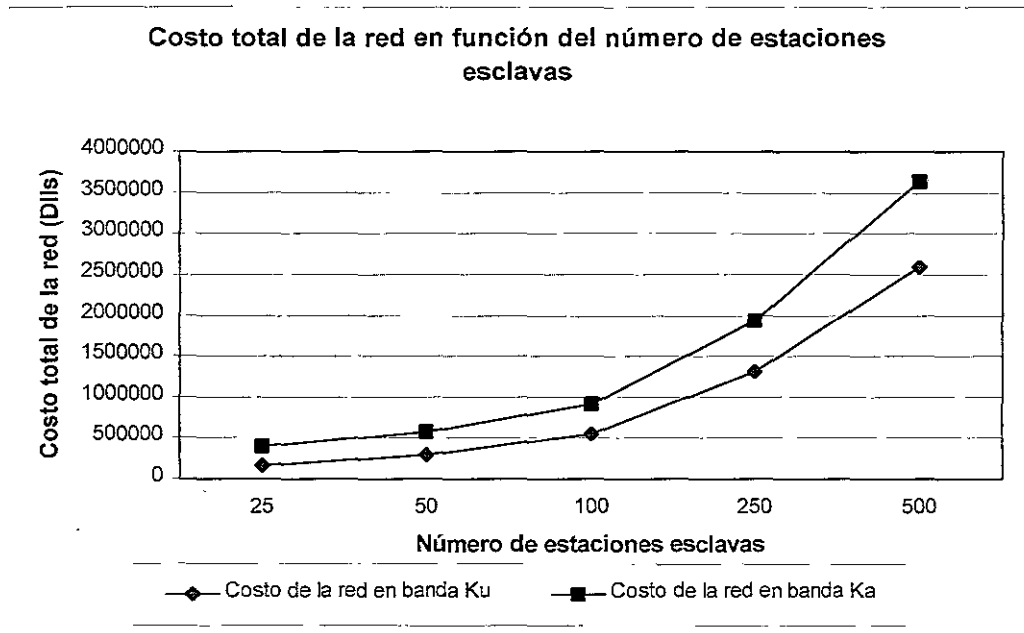


Figura 8.14 Gráfica que muestra el costo total de la red en base al número de estaciones en ambas bandas.

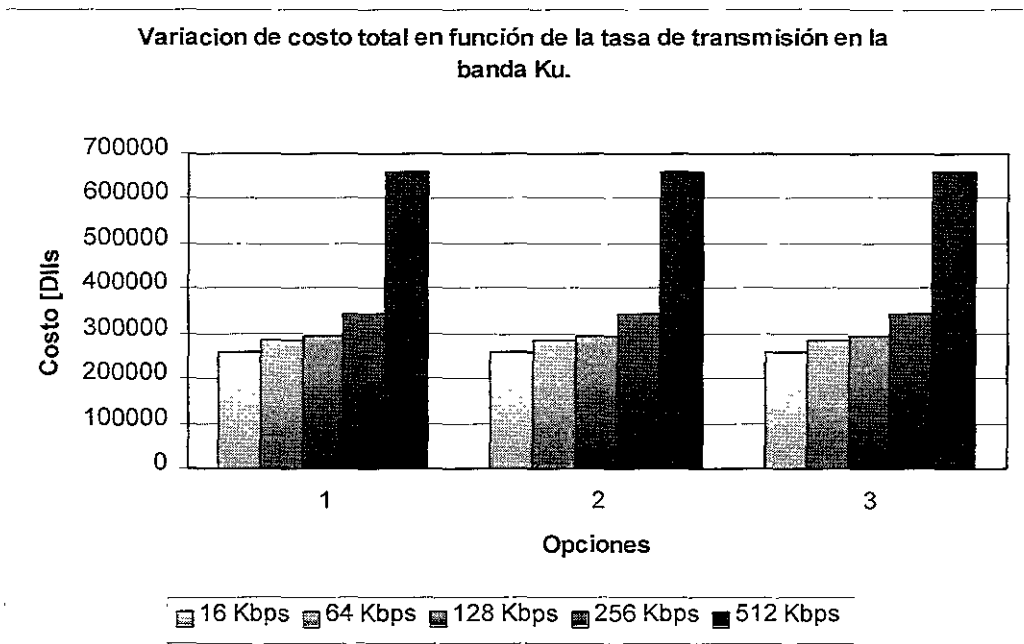


Figura 8.15 Gráfica que muestra el costo total de la red en base a la tasa de transmisión de las tres mejores opciones de la banda Ku.

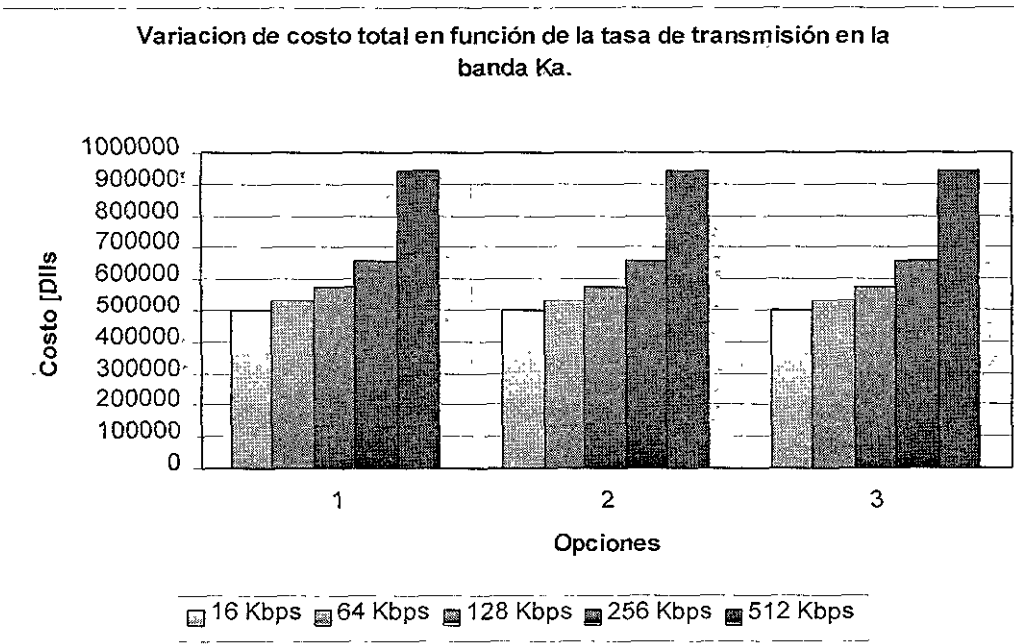


Figura 8.16 Gráfica que muestra el costo total de la red en base a la tasa de transmisión de las tres mejores opciones de la banda Ka.

8.3 Conclusiones

Esta tesis no tiene como objetivo mostrar qué banda de frecuencias es mejor, sino simplemente dar resultados que sean de utilidad para verificar la viabilidad de utilizar la banda Ka en el futuro, ya sea en México o en lugares con características similares. Esto surge a partir de la necesidad de espectro radioeléctrico, debido a la saturación actual de bandas de frecuencias menores (bandas C y Ku).

El surgimiento de los servicios de banda ancha y la necesidad de llevarlos a lugares aislados que no cuentan con los servicios de las redes terrestres, es una causa más para la migración a bandas superiores de frecuencia que permitan el uso de ancho de banda mayores a los ahora proporcionados por las bandas C y Ku. Una de las características principales de la banda Ka es su amplio ancho de banda, pues éste es mayor que el ahora utilizado para la banda Ku.

La viabilidad de la banda Ka está en duda en nuestro país, debido a varios factores, entre ellos: los grandes márgenes de atenuación por lluvia y el elevado costo del equipo de transmisión y recepción, principalmente. Esta situación ocurría en varios países de Europa y Norteamérica hace algunos años, por lo que se hicieron estudios en la banda Ka, como es el caso de los satélites experimentales DFS3 Kopernikus y ACTS, de Alemania y Estados Unidos, respectivamente; los cuales arrojaron resultados favorables para la utilización de dicha banda. Una consecuencia de dichos estudios es la puesta en órbita de diversos satélites comerciales que contienen transpondedores en estas frecuencias, como es el caso de los satélites: Italsat 1 y 2, Koresat 3, Hotbird 6 y ANIK F2; siendo este último el único que dará servicio en el continente americano hasta estas fechas.

Por lo tanto, los resultados de esta tesis buscan aportar información que pueda sustentar la posible implementación de la banda Ka en nuestro país o en otros con características geográficas y de precipitación pluvial similares. Por lo obtenido en los resultados presentados anteriormente podemos concluir lo siguiente:

- Las condiciones climáticas y geográficas que se propusieron en el ejemplo resuelto en esta tesis mostraron que los enlaces satelitales son realizables en prácticamente cualquier zona de nuestro país. Además, la atenuación que sufre la señal debido a la lluvia puede ser tolerada por el equipo que existe en el mercado actualmente
- Es muy probable que los enlaces satelitales se desarrollen de igual manera si se hiciera el estudio completo en otro territorio con características similares al de nuestro país. Esto debido a que los márgenes de lluvia serían similares y las atenuaciones en la señal por lluvia también.
- El costo del equipo disponible en la banda Ka resulta elevado en comparación con el disponible en la banda Ku, pero se espera que conforme exista una mayor demanda del espectro y de servicios en dicha banda los costos irán disminuyendo. Al tratarse de nueva tecnología es normal que los costos actuales del equipo para banda Ka sean elevados, pues lo mismo sucedió con la banda Ku, pero con el paso del tiempo éstos disminuyeron notablemente hasta ser más accesibles que los de la banda C. Por lo tanto se espera que suceda lo mismo para la situación que vivimos actualmente con las bandas analizadas en esta tesis.
- Por otro lado, una gran ventaja de la banda Ka es que permite una gran escala de integración en los componentes, lo que conlleva directamente a una disminución de los costos del equipo necesario para la comunicación en esta banda.
- Además, las opciones con las que se cuentan para adquirir equipo en la banda Ka son numerosas, como se pudo observar en el capítulo 3. Con esto se puede esperar que se tenga una disminución de los costos por la libre competencia, el incremento de la oferta y el movimiento del mercado.
- El incremento de la tasa de transmisión y del número de estaciones esclavas dentro de la red, elevan de manera similar el costo total, tanto para la banda Ku y la banda Ka.

Finalmente, podemos decir que la implementación de la banda Ka en nuestro país parece ser parte del futuro inmediato. Esto debido a que los resultados obtenidos en esta tesis, muestran que el costo del equipo en la banda Ka es elevado, pero no alarmante. Además, como ya se mencionó es muy probable que el costo de los componentes disminuya notablemente. Por lo tanto, es probable que satélites futuros de México tengan transpondedores en banda Ka, los cuales podrán brindar servicios de banda ancha; y con esto ofrecer nuevas opciones para las telecomunicaciones en nuestro país

APÉNDICE

Código fuente

A continuación se muestra el código fuente del programa propuesto en el capítulo 7.

```
%Cálculo de enlaces satelitales para estaciones VSAT en las bandas Ku y Ka
```

```
%UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
%FACULTAD DE INGENIERIA
```

```
%ALTAMIRANO GUERRERO VICTOR
%MALPICA MAURY ALFONSO
%ORDÓÑEZ ROMERO CESAR LEONARDO
```

```
%Especificaciones del equipo
```

```
%Se crean matrices que contienen los datos de importancia de las antenas
%como son: ganancia de transmisión y recepción, temperatura de ruido y costo
```

```
%Antenas Maestras Ku
```

```
ANTmku=[47.6 49.2 28 2000 -.57 49.67;
 47.6 49.2 28 2571 -.4 40;
 47.6 49.2 28 2000 -.5 47;
 51.7 53.2 20 12279 -.33 32.33;
 51.7 53.2 20 12643 -.33 32.33;
 51.7 53.2 26 15464 -.5 44;
 58.0 59.1 41 56000 -.475 59.75;
 56.5 57.4 33 33000 -.425 52.25;
 55.5 57.0 64 37700 -.925 105.25;
 53.9 55.0 38 23600 -.325 52.25;
 51.9 53.1 27 22300 -.4 45;
 51.6 52.7 39 21950 -.375 55.75];
```

```

ANTMKU={'Prodelin','1256 Offset','2.4 metros';
'Prodelin','1244 Offset','2.4 metros';
'Prodelin','1251 Offset','2.4 metros';
'Prodelin','1382 Offset','3.8 metros';
'Prodelin','1383 Offset','3.8 metros';
'Prodelin','1388 Offset Gregorian','3.8 metros';
'Andrew','ES76K-1 Gregorian','7.6 metros';
'Andrew','ES65-1 Gregorian','6.5 metros';
'Andrew','ES56-1 Gregorian','5.6 metros';
'Andrew','ES46M-1 Gregorian','4.6 metros';
'Andrew','ES39MPJK-1 Gregorian','3.9 metros';
'Andrew','EES37MPJK-1 Gregorian','3.7 metros'};

```

%Antenas Esclavas Ku

```

ANTeku=[45.0 46.5 35 671 -.28 46.82;
45.2 46.7 35 764 -.3 44;
41.5 43.0 43 413 -.2 49;
41.7 43.2 43 307 -.6 61;
45.0 46.5 35 720 -.5 54;
39.7 41.2 41 264 -.2 47;
39.8 41.3 46 356 -.1 49];

```

```

ANTEKU={'Prodelin','1184 Offset','1.8 metros';
'Prodelin','1194 Offset','1.8 metros';
'Prodelin','1134 Offset','1.2 metros';
'Prodelin','1123 Offset 6 1125 Offset','1.2 metros';
'Prodelin','1185 Offset','1.8 metros';
'Prodelin','1951 Offset Elíptica','0.95 metros';
'Prodelin','1981 Offset','0.98 metros'};

```

%Antenas Maestras Ka

```

ANTmka=[59.2 62.0 24 126670 -.925 105.25];

ANTMKA={'Andrew','ES56 KA-1 Gregorian','5.6 metros'};

```

%Antenas Esclavas Ka

```

ANTEka=[41.0 44.5 24 150 -.3 53;
44.3 47.8 24 400 -.3 51;
46.1 49.5 24 455 -.3 50;
37.0 43.0 24 140 -.4 51];

ANTEKA={'Prodelin','3067','0.67 mteros';
'Prodelin','3098','0.98 metros';
'Prodelin','3120','1.2 metros';
'Q-par Angus','610mm Cassegrain','0.61 metros'};

```

%Se crean matrices que contienen los datos de importancia de los HPA
%como lo son su potencia maxima y costo

%HPA Mestros en Ku, se utilizan Klystrons y TWT

```

HPAmku=[130 35410 500;
300 44850 500;
300 45000 750;

```

300 44900 500;
 750 69840 750;
 125 45100 750;
 200 39300 750;
 325 46240 500;
 325 4290 500;
 70 30050 500;
 95 33000 500;
 80 32500 500;
 400 50500 750;
 325 46100 500;
 750 70000 750;
 2450 69000 85;
 2450 70000 85;
 2450 68500 85;
 2200 67000 80;
 95 33400 500;
 325 46000 500;
 125 36000 750;
 200 40050 750;
 400 50750 750;
 750 70100 750;
 270 60000 500
 340 47071 750;
 340 47071 750;
 650 64286 750;
 2500 68357 80];

HPAMKU={'NEC','LD4447','TWT de 130 Watts';
 'NEC','LD7213','TWT de 300 Watts';
 'NEC','LD7213L','TWT de 300 Watts';
 'NEC','LD7241','TWT de 300 Watts';
 'NEC','Thomson','TWT de 750 Watts';
 'XICOM','XT-100K','TWT de 125 Watts';
 'XICOM','XT-200K','TWT de 200 Watts';
 'XICOM','XT-400','TWT de 325 Watts';
 'XICOM','XT-450TLW','TWT de 325 Watts';
 'XICOM','XT-50T1','TWT de 70 Watts';
 'XICOM','XT-100T','TWT de 95 Watts';
 'XICOM','XT-80K','TWT de 80 Watts';
 'XICOM','XTD-400K','TWT de 400 Watts';
 'XICOM','XTD-450TLP','TWT de 325 Watts';
 'XICOM','XTD-750K','TWT de 750 Watts';
 'XICOM','XTK-2000K','Klystron de 2450 Watts';
 'XICOM','XTK-2000K1','Klystron de 2450 Watts';
 'XICOM','XTK-2000K2','Klystron de 2450 Watts';
 'XICOM','XTK-2000K3','Klystron de 2200 Watts';
 'XICOM','XTRD-100T','TWT de 95 Watts';
 'XICOM','XTRD-400T1','TWT de 325 Watts';
 'XICOM','XTRD-200K Ku','TWT de 125 Watts';
 'XICOM','XTRD-200K','TWT de 200 Watts';
 'XICOM','XTRD-400K','TWT de 400 Watts';
 'XICOM','XTRD-750K','TWT de 750 Watts';
 'VERTEXrsi','2100 TTRI','TWT de 270 Watts';
 'VERTEXrsi','2100TK','TWT de 340 Watts';
 'VERTEXrsi','2100T Hub','TWT de 340 Watts';
 'VERTEXrsi','2100TK','TWT de 650 Watts';


```
'VERTEXrsi','2100KKU','Klystron de 2500 Watts'};
```

```
%HPA esclavos en Ku, son los SSPA
```

```
HPAeku=[20 8000 500;
 25 12427 500;
 30 22725 500;
 40 30500 500;
 50 35000 500;
 60 37500 500;
 80 42798 500;
 100 46300 500;
 125 50222 500;
 40 28700 500;
 50 33500 500;
 25 12500 500;
 125 51000 500;
 100 46400 500;
 0.5 1100 500;
 2.0 2250 500;
 2.0 2200 500;
 1.0 1470 500;
 2.0 2150 500;
 40 23873 500;
 40 25786 750;
 80 45386 500;
 80 49019 750;
 50 27386 500;
 100 53314 500;
 200 109671 500;
 20 14944 500;
 20 16143 500;
 0.02 980 500;
 0.03 1153 500;
 0.03 1227 500];
```

```
HPAEKU={'Advantech','ARSA-K20','SSPA de 20 Watts';
'Advantech','ARSA-K25','SSPA de 25 Watts';
'Advantech','ARSA-K30','SSPA de 30 Watts';
'Advantech','ARSA-K40','SSPA de 40 Watts';
'Advantech','ARSA-K50','SSPA de 50 Watts';
'Advantech','ARSA-K60','SSPA de 60 Watts';
'Advantech','ARSA-K80','SSPA de 80 Watts';
'Advantech','ARSA-K100','SSPA de 100 Watts';
'Advantech','ARSA-K125','SSPA de 125 Watts';
'MICROWAVECO','K1414 40OD','SSPA de 40 Watts';
'MICROWAVECO','K1414 50OD','SSPA de 50 Watts';
'MICROWAVECO','K1414 25OD','SSPA de 25 Watts';
'MICROWAVECO','K1414 125OD','SSPA de 125 Watts';
'MICROWAVECO','K1414 100OD','SSPA de 100 Watts';
'Microwave-Amps','AM2','SSPA de 0.5 Watts';
'Microwave-Amps','AM46','SSPA de 2.0 Watts';
'Microwave-Amps','AM65','SSPA de 2.0 Watts';
'Microwave-Amps','AM56','SSPA de 1.0 Watts';
'Microwave-Amps','AM52','SSPA de 2.0 Watts';
'VERTEXrsi','PKM14S040R','SSPA de 40 Watts';
'VERTEXrsi','PKO14S040R','SSPA de 40 Watts';
```

```
'VERTEXrsi','PKM14S080R','SSPA de 80 Watts';
'VERTEXrsi','PKO14S080R','SSPA de 80 Watts';
'VERTEXrsi','PKM14S050R','SSPA de 50 Watts';
'VERTEXrsi','PKM14S100R','SSPA de 100 Watts';
'VERTEXrsi','PKM14S200R','SSPA de 200 Watts';
'VERTEXrsi','PKM14S020R','SSPA de 20 Watts';
'VERTEXrsi','PKO14S020R','SSPA de 20 Watts';
'RF Amplifiers','HD12506','SSPA de 0.02 Watts';
'RF Amplifiers','HD12507','SSPA de 0.03 Watts';
'RF Amplifiers','HD12508','SSPA de 0.03 Watts'};
```

%HPA Maestros en Ka

```
HPAmka=[120 150296 750;
 150 167000 750;
 250 210500 750;
 250 195000 500;
 500 320000 250;
 325 200000 400;
 500 220050 400;
 750 247100 750;
 120 150000 750;
 150 165000 750;
 10 102500 750;
 25 105000 750;
 40 107500 750;
 50 121250 750];
```

```
HPAMKA={'XICOM','XTD-120Ka','TWT de 120 Watts';
'XICOM','XTD-150Ka','TWT de 150 Watts';
'XICOM','XTD-150Ka1','TWT de 250 Watts';
'XICOM','XTD-250Ka','TWT de 250 Watts';
'XICOM','XTD-500Ka','TWT de 500 Watts';
'MILIMETER WAVE','VKA2400A','Klystron de 325 Watts';
'MILIMETER WAVE','VKA2400B','Klystron de 500 Watts';
'MILIMETER WAVE','VKA2400C','Klystron de 750 Watts';
'RF Amplifiers','HD18343','TWT de 120 Watts';
'RF Amplifiers','HD18344','TWT de 150 Watts';
'RF Amplifiers','HD18337','TWT de 10 Watts';
'RF Amplifiers','HD18338','TWT de 25 Watts';
'RF Amplifiers','HD18339','TWT de 40 Watts';
'RF Amplifiers','HD18340','TWT de 50 Watts'};
```

%HPA Esclavos en Ka

```
HPAeka=[0.25 1800 500;
 0.5 2300 500;
 0.9 3100 500;
 0.25 2100 500;
 0.5 3100 500;
 0.25 2600 500;
 0.5 2587 500;
 1.0 3350 500;
 2.0 4800 500;
 0.5 2630 500;
 1.0 3400 500;
 1.0 3400 500];
```

```
10 10800 500];
```

```
HPAEKA={'SPACEK LABS INC.','SP2412-15-23','SSPA de 0.25 Watts';
'SPACEK LABS INC.','SP2412-15-27','SSPA de 0.5 Watts';
'SPACEK LABS INC.','SP268-20-29','SSPA de 0.9 Watts';
'SPACEK LABS INC.','SP276-18-23','SSPA de 0.25 Watts';
'SPACEK LABS INC.','SP270-18-27','SSPA de 0.5 Watts';
'SPACEK LABS INC.','SP336-18-23','SSPA de 0.25 Watts';
'NEWTEC','2509ca','SSPA de 0.5 Watts';
'NEWTEC','2509cb','SSPA de 1.0 Watts';
'NEWTEC','2509cc','SSPA de 2.0 Watts';
'NEWTEC','2509ga','SSPA de 0.5 Watts';
'NEWTEC','2509gb','SSPA de 1.0 Watts';
'NEWTEC','250955','SSPA de 1.0 Watts';
'RF Amplifiers','HD18333','SSPA de 10 Watts'};
```

```
%Se crean matrices que contienen los datos de importancia de los LNA
%como son: Temperatura de ruido y costo
```

```
%LNA en Ku
```

```
LNaku=[170 1450;
120 1500;
90 1771;
80 2433;
70 3214;
75 3990;
316 2000;
263 2300;
263 2380;
263 2425;
263 2560;
263 2610;
627 1100;
627 1130;
627 1115;
438 1200;
438 1255;
438 1230;
438 1270;
438 1280;
438 1265;
438 1315;
438 1302;
438 1304;
627 1140;
627 1135;
627 1142;
527 1190;
527 1188;
527 1173;
438 1290;
473 1210;
473 1205;
438 1350;
473 1220;
473 1230];
```

```

LNAKU={'Microwave Amplifiers','AL16','170 K';
'Microwave Amplifiers','AL18','120 K';
'VERTEXrsi','LKR12S90','90 K';
'VERTEXrsi','LKR12S80','80 K';
'VERTEXrsi','LKR12S70','70 K';
'SATELLINK','SHA1185 20M','75 K';
'JCA','JCA1218-200','316 K';
'JCA','JCA1218-300','263 K';
'JCA','JCA1218-400','263 K';
'JCA','JCA1218-500','263 K';
'JCA','JCA1218-600','263 K';
'JCA','JCA1218-700','263 K';
'JCA','JCA714-201','627 K';
'JCA','JCA714-202','627 K';
'JCA','JCA714-203','627 K';
'JCA','JCA714-301','438 K';
'JCA','JCA714-302','438 K';
'JCA','JCA714-303','438 K';
'JCA','JCA714-401','438 K';
'JCA','JCA714-402','438 K';
'JCA','JCA714-403','438 K';
'JCA','JCA714-501','438 K';
'JCA','JCA714-502','438 K';
'JCA','JCA714-503','438 K';
'JCA','JCA816-201','627 K';
'JCA','JCA816-202','627 K';
'JCA','JCA816-203','627 K';
'JCA','JCA816-301','527 K';
'JCA','JCA816-302','527 K';
'JCA','JCA816-303','527 K';
'JCA','JCA816-401','438 K';
'JCA','JCA816-402','473 K';
'JCA','JCA816-403','473 K';
'JCA','JCA816-501','438 K';
'JCA','JCA816-502','473 K';
'JCA','JCA816-503','473 K'};

```

%LNA en Ka

```

LNAka=[170 5000;
159 4500;
180 3175;
238 1750;
180 4200;
226 2950;
289 1500;
120 9990;
101 29500;
627 1900;
627 2400;
627 2650;
149 1600;
160 1850;
160 2600;
406 1300;
406 1325;

```

```

406 1370;
406 1410;
438 1150;
438 1180;
438 1210;
438 1260];

```

```

LNAKA={'Microwave Amplifiers','AL18','170 K';
'MITEQ','JSD4 18002600 19 8P','159 K';
'MITEQ','JSD4 18002600 21 8P','180 K';
'MITEQ','JSD4 18002600 26 8P','238 K';
'MITEQ','JSD3 18002600 21 8P','120 K';
'MITEQ','JSD3 18002600 25 8P','226 K';
'MITEQ','JSD4 18002600 30 8P','289 K';
'SATELLINK','SHA2000 18M','120 K';
'SATELLINK','SHAC2000 3iM','101 K';
'SPACEK LABS INC.','SLKka-12-6','627 K';
'SPACEK LABS INC.','SLKka-30-6','627 K';
'SPACEK LABS INC.','SLKka-30-6W','627 K';
'SPACEK LABS INC.','SL224-18-3','149 K';
'SPACEK LABS INC.','SL224-18-3W','160 K';
'SPACEK LABS INC.','SL224-35-3W','160 K';
'JCA','JCA1224-300','406 K';
'JCA','JCA1224-400','406 K';
'JCA','JCA1224-500','406 K';
'JCA','JCA1224-600','406 K';
'JCA','JCA1826-300','438 K';
'JCA','JCA1826-400','438 K';
'JCA','JCA1826-500','438 K';
'JCA','JCA1826-600','438 K'};

```

%Se crea una matriz que contienen los datos de importancia del modem
%como son: Energia bits necesaria, tasa de transmisión y costo

```

MODEM=[6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 9.6 20000 35700;
6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 2.4 5000 4015;
6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 4.8 9312 8800;
6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 9.6 20000 35700;
6.1 6.9 7.6 8.3 8.9 9.6 2.4 5900 4750;
6.3 7.0 7.8 8.6 9.3 9.9 6000 13000 30500;
6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 4.8 9312 9000;
5.7 6.3 7.0 7.8 8.4 9.2 19.2 4375 4125;
6.1 6.8 7.2 7.9 8.6 9.4 2.4 5000 4125;
6.2 7.0 7.7 8.4 9.0 9.6 4.8 17500 32500;
6.2 7.0 7.7 8.4 9.0 9.6 4.8 2048 2575;
6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 9.6 20000 35700;
6.4 7.2 7.9 8.6 9.2 9.9 4.8 9312 9000;
6.6 7.4 8.0 8.8 9.4 10.0 9.6 2500 2150;
5.7 6.2 6.9 7.5 8.0 8.8 9.6 4375 4050;
6.0 6.9 7.5 8.0 8.6 9.1 9.6 4375 4200];

```

```

MODEME={'Comtech','VLM-7650','9.6 Kbps a 20.0 Mbps';
'Comtech','VLM-3650','2.4 Kbps a 5 Mbps';
'Comtech','SLM-8650','4.8 Kbps a 9.312 Mbps';
'Comtech','SLM-7650','9.6 Kbps a 20.0 Mbps';
'Comtech','SLM-3650','2.4 Kbps a 5.9 Mbps';
'Comtech','SDM-9000','6 Mbps a 13 Mbps';

```

```
'Comtech','SDM-8000','4.8 Kbps a 9.312 Mbps';
'Comtech','SDM-300L','19.2 Kbps a 4.375 Mbps';
'Comtech','SDM-300A','2.4 Kbps a 5.0 Mbps';
'Comtech','CDM-600','4.8 Kbps a 17.5 Mbps';
'Comtech','CDM-550','4.8 Kbps a 2.048 Mbps';
'Comtech','BEM-7650','9.6 Kbps a 20.0 Mbps';
'Comtech','----','4.8 Kbps a 9.312 Mbps';
'Radyne ComStream','CM601A','9.6 Kbps a 2.5 Mbps';
'Radyne ComStream','CM701A','9.6 Kbps a 4.375 Mbps';
'Radyne ComStream','CM2401A','9.6 Kbps a 4.375 Mbps';
```

```
%Tasa de transmisión, BERs deseados y numero de estaciones esclavas
```

```
BER=menu('BER a Utilizar:', '10^-3', '10^-4', '10^-5', '10^-6', '10^-7', '10^-8');
```

```
%Datos de la estacion maestra
```

```
Longm='Longitud de la ubicación de la estación maestra(°)';
Latm='Latitud de la ubicación de la estación maestra(°)';
Altm='Altitud de la ubicación de la estación maestra en Km.';
Tasame='Tasa de transmisión en kbps(Maestra-Eslavas)';
CELLm={' ',' ',' ',' '};
answerm=inputdlg({Longm,Latm,Altm,Tasame},'Datos de la estación
maestra',1,CELLm);
Lem=str2num(char(answerm(1)));
lem=str2num(char(answerm(2)));
hom=str2num(char(answerm(3)));
ATTm=str2num(char(answerm(4)));
```

```
%Datos de la estacion esclava
```

```
Longe='Longitud de la ubicación de la estación esclava(°)';
Late='Latitud de la ubicación de la estación esclava(°)';
Alte='Altitud de la ubicación de la estación esclava en Km.';
Tasaem='Tasa de transmisión en Kbps (Eslavas-Maestra)';
NE='Numero de estaciones';
CELLe={' ',' ',' ',' '};
answere=inputdlg({Longe,Late,Alte,Tasaem,NE},'Datos de la estación
esclava',1,CELLe);
Lee=str2num(char(answere(1)));
lee=str2num(char(answere(2)));
hoe=str2num(char(answere(3)));
ATTe=str2num(char(answere(4)));
numest=str2num(char(answere(5)));
```

```
%Datos de la lluvia
```

```
Dispku='Disponibilidad en banda ku(%)';
Dispka='Disponibilidad en banda ka(%)';
Rmmhrm='Intensidad de la lluvia en la ubicación de la estación
maestra(mm/Hr)';
Rmmhre='Intensidad de la lluvia en la ubicación de la estación
esclava(mm/Hr)';
CELLll={' ',' ',' ',' '};
answerll=inputdlg({Dispku,Dispka,Rmmhrm,Rmmhre},'Parámetros para el cálculo de
la atenuación por lluvia',1,CELLll);
pku_100=str2num(char(answerll(1)));
```

```

pka=100-str2num(char(answer11(2)));
Rm=str2num(char(answer11(3)));
Re=str2num(char(answer11(4)));

%Parametros del satelite

Longsat='Longitud del satélite(°)';
GTSatkum='Figura de mérito del satelite en banda Ku(dB/°k), estación maestra';
PIRESatkum='PIRE del satélite en banda ku(dBW), estación maestra';
GTSatkam='Figura de mérito del satelite en banda Ka(dB/°k), estación maestra';
PIRESatkam='PIRE del satélite en banda ka(dBW), estación maestra';
GTSatkue='Figura de mérito del satelite en banda Ku(dB/°k), estación esclava';
PIRESatkue='PIRE del satélite en banda ku(dBW), estación esclava';
GTSatkae='Figura de mérito del satelite en banda Ka(dB/°k), estación esclava';
PIRESatkae='PIRE del satélite en banda ka(dBW), estación esclava';
CELLsat={' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ',' '};
answersat=inputdlg({'Longsat,GTSatkum,PIRESatkum,GTSatkam,PIRESatkam,GTSatkue,PIRESatkue,GTSatkae,PIRESatkae'},'Datos del satélite',1,CELLsat);
Ls=str2num(char(answersat(1)));
Fmeritosatkum=str2num(char(answersat(2)));
piresatkum=str2num(char(answersat(3)));
Fmeritosatkam=str2num(char(answersat(4)));
piresatkam=str2num(char(answersat(5)));
Fmeritosatkue=str2num(char(answersat(6)));
piresatkue=str2num(char(answersat(7)));
Fmeritosatkae=str2num(char(answersat(8)));
piresatkae=str2num(char(answersat(9)));

%Frecuencias del transpondedor

frecsku='Frecuencia de subida en banda Ku del transpondedor(GHz)';
frecbku='Frecuencia de bajada en banda Ku del transpondedor(GHz)';
frecska='Frecuencia de subida en banda Ka del transpondedor(GHz)';
frecbka='Frecuencia de bajada en banda Ka del transpondedor(GHz)';
CELLfrec={' ',' ',' ',' '};
answerfrec=inputdlg({'frecsku,frecbku,frecska,frecbka'},'Frecuencias de operación',1,CELLfrec);
fsmeku=str2num(char(answerfrec(1)));
fsmeku=str2num(char(answerfrec(2)));
fsmeka=str2num(char(answerfrec(3)));
fsmeka=str2num(char(answerfrec(4)));

%Tasa en Mbps

TTm=10*log10(ATTm*1000);
TTe=10*log10(ATTe*1000);

%Ancho de banda

p=0.5; % Roll-off
BWum=((1+p)/2)*(ATTm/1000)*(8/7);
BWue=((1+p)/2)*(ATTe/1000)*(8/7);

%Cálculo de pérdidas

%Conectores

```

```

CL=0.5;
ACL=10^(CL/10);
%Absorción atmosférica
AALku=0.07;
AALka=0.2;
%Frecuencias de los transpondeodres ku y ka
fsemku=fsmeku+(0.6*BWum+0.5*BWue)/1000;
fbemku=fbmeku+(0.6*BWum+0.5*BWue)/1000;
fsemka=fsmeka+(0.6*BWum+0.5*BWue)/1000;
fbemka=fbmeka+(0.6*BWum+0.5*BWue)/1000;
% Ángulos de elevación y azimut
Rt=6378;           %radio de la tierra(km)
h=42164;          %radio de la orbita(km)
ALm=abs(Ls-Lem);
ALe=abs(Ls-Lee);
Cm=cos(lem*pi/180)*cos(ALm*pi/180);
Ce=cos(lee*pi/180)*cos(ALe*pi/180);
Q1m=acos(Cm);
Q1e=acos(Ce);
Ang_ele_m=(atan((Cm-Rt/h)/(sin(Q1m))))*180/pi;  %Angulo de elevacion Estación
maestra(°)
Ang_ele_e=(atan((Ce-Rt/h)/(sin(Q1e))))*180/pi;  %Angulo de elevacion Estación
esclava(°)
Q2m=(atan(tan(ALm*pi/180)/sin(lem*pi/180)))*180/pi;
Q2e=(atan(tan(ALe*pi/180)/sin(lee*pi/180)))*180/pi;
Ang_azi_m=Q2m+180;           %Angulo de Azimut Estación maestra(°)
Ang_azi_e=Q2e+180;          %Angulo de Azimut Estación esclava(°)
% Atenuación por lluvia
if (lem<=36)
    hrm=3+0.028*lem;
else
    hrm=4-0.075*(lem-36);
end
if (lee<=36)
    hre=3+0.028*lee;
else
    hre=4-0.075*(lee-36);
end

```



```

dm=(hrm-hom)/sin(Ang_ele_m*pi/180);
de=(hre-hoe)/sin(Ang_ele_e*pi/180);

rm=1/(1+(dm/(35*exp(-0.015*Rm)))*cos(Ang_ele_m*pi/180)); %Factor reductor
Estación Maestra
re=1/(1+(de/(35*exp(-0.015*Re)))*cos(Ang_ele_e*pi/180)); %Factor reductor
Estación Esclava

coeflluv=[10 0.0101 0.00887 1.276 1.264;
 12 0.0188 0.0168 1.217 1.2;
 15 0.0367 0.0335 1.154 1.128;
 20 0.0751 0.0691 1.099 1.065;
 25 0.124 0.113 1.061 1.03;
 30 0.187 0.167 1.021 1;
 31 0.199 0.178 1.013 0.994];

for x=1:6

    %Ku

    if (fbmeku>=coeflluv(x,1) & fbmeku<coeflluv(x+1,1))

        avbmeku=((coeflluv(x+1,3)-coeflluv(x,3))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fbmeku-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,3);
        bvbmeku=((coeflluv(x+1,5)-coeflluv(x,5))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fbmeku-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,5);

        end

    if (fsmeku>=coeflluv(x,1) & fsmeku<coeflluv(x+1,1))

        ahsmeku=((coeflluv(x+1,2)-coeflluv(x,2))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fsmeku-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,2);
        bhsmeku=((coeflluv(x+1,4)-coeflluv(x,4))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fsmeku-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,4);

        end

    if (fbemku>=coeflluv(x,1) & fbemku<coeflluv(x+1,1))

        avbemku=((coeflluv(x+1,3)-coeflluv(x,3))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fbemku-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,3);
        bvbemku=((coeflluv(x+1,5)-coeflluv(x,5))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fbemku-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,5);

        end

    if (fsemku>=coeflluv(x,1) & fsemku<coeflluv(x+1,1))

        ahsemku=((coeflluv(x+1,2)-coeflluv(x,2))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fsemku-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,2);
        bhsemku=((coeflluv(x+1,4)-coeflluv(x,4))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fsemku-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,4);

        end

```

```

%Ka
if (fbmeka>=coeflluv(x,1) & fbmeka<coeflluv(x+1,1))
    avbmeka=((coeflluv(x+1,3)-coeflluv(x,3))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fbmeka-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,3);
    bvbmeke=((coeflluv(x+1,5)-coeflluv(x,5))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fbmeka-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,5);
end

if (fsmeka>=coeflluv(x,1) & fsmeka<coeflluv(x+1,1))
    ahsmeke=((coeflluv(x+1,2)-coeflluv(x,2))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fsmeka-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,2);
    bhsmeke=((coeflluv(x+1,4)-coeflluv(x,4))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fsmeka-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,4);
end

if (fbemka>=coeflluv(x,1) & fbemka<coeflluv(x+1,1))
    avbemka=((coeflluv(x+1,3)-coeflluv(x,3))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fbemka-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,3);
    bvbemka=((coeflluv(x+1,5)-coeflluv(x,5))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fbemka-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,5);
end

if (fsemka>=coeflluv(x,1) & fsemka<coeflluv(x+1,1))
    ahsemka=((coeflluv(x+1,2)-coeflluv(x,2))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fsemka-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,2);
    bhsemka=((coeflluv(x+1,4)-coeflluv(x,4))/(coeflluv(x+1,1)-
coeflluv(x,1)))*(fsemka-coeflluv(x,1))+coeflluv(x,4);
end

end

% Gamma
Gsmeku=ahsmeku*Rm^(bhsmeke);
Gbmeku=avbmeku*Rm^(bvbmeke);
Gsemku=ahsemku*Re^(bhsemku);
Gbemku=avbemku*Re^(bvbemku);

Gsmeka=ahsmeka*Rm^(bhsmeke);
Gbmeka=avbmeka*Rm^(bvbmeke);
Gsemka=ahsemka*Re^(bhsemka);
Gbemka=avbemka*Re^(bvbemka);

Rlsmeku=Gsmeku*dm^rm;
Rlbmeke=Gbmeku*de^re;
Rlsemku=Gsemku*dc^re;
Rlbemku=Gbemku*du^rm;

```

```

Rlsmeka=Gsmeka*dm*rm;
Rlsmeka=Gsmeka*dm*rm;
Rlsemka=Gsemka*de*re;
Rlsemka=Gsemka*de*re;
Rlbemka=Gbemka*dm*rm;

RLpsmeku=(0.12*(pku)^-(0.546+0.043*log10(pku)))*Rlsmeku;
RLpbmeku=(0.12*(pku)^-(0.546+0.043*log10(pku)))*Rlsmeku;
RLpsemku=(0.12*(pku)^-(0.546+0.043*log10(pku)))*Rlsemku;
RLpbemku=(0.12*(pku)^-(0.546+0.043*log10(pku)))*Rlbemku;

RLpsmeka=(0.12*(pka)^-(0.546+0.043*log10(pka)))*Rlsmeka;
RLpbmeka=(0.12*(pka)^-(0.546+0.043*log10(pka)))*Rlsmeka;
RLpsemka=(0.12*(pka)^-(0.546+0.043*log10(pka)))*Rlsemka;
RLpbemka=(0.12*(pka)^-(0.546+0.043*log10(pka)))*Rlbemka;

%Rango
Rangom=35786*sqrt(1.4199-.4199*cos(Q1m));
Rangoe=35786*sqrt(1.4199-.4199*cos(Q1e));

%Ku
FSLkusme=92.4+20*log10(Rangom)+20*log10(fsmeku);
FSLkubme=92.4+20*log10(Rangoe)+20*log10(fbmeku);
FSLkusem=92.4+20*log10(Rangoe)+20*log10(fsemku);
FSLkubem=92.4+20*log10(Rangom)+20*log10(fbemku);

ARLpbmeku=10^(RLpbmeku/10);
ARLpbemku=10^(RLpbemku/10);

Losseskusme=CL+AALku+FSLkusme+RLpsmeku;
Losseskubme=CL+AALku+FSLkubme+RLpbmeku;
Losseskusem=CL+AALku+FSLkusem+RLpsemku;
Losseskubem=CL+AALku+FSLkubem+RLpbemku;

%Ka
FSLkasme=92.4+20*log10(Rangom)+20*log10(fsmeka);
FSLkabme=92.4+20*log10(Rangoe)+20*log10(fbmeke);
FSLkasem=92.4+20*log10(Rangoe)+20*log10(30+0.6*BWum+0.5*BWue);
FSLkabem=92.4+20*log10(Rangom)+20*log10(20+0.6*BWum+0.5*BWue);

ARLpbmeku=10^(RLpbmeku/10);

```

```

ARLpbemka=10^(RLpbemka/10);

Losseskasme=CL+AALka+FSLkasme+RLpsmek;
Losseskabme=CL+AALka+FSLkabme+RLpbmek;
Losseskasem=CL+AALka+FSLkasem+RLpsem;
Losseskabem=CL+AALka+FSLkabem+RLpbem;

%Temperaturas de ruido

%Conectores

Tcon=280*(1-1/ACL);

%Antenas

%Ku

ANTmku(:,3)=ANTmku(:,5)*Ang_ele_m+ANTmku(:,6);
ANTEku(:,3)=ANTEku(:,5)*Ang_ele_e+ANTEku(:,6);

%Ka

ANTmka(:,3)=ANTmka(:,5)*Ang_ele_m+ANTmka(:,6);
ANTEka(:,3)=ANTEka(:,5)*Ang_ele_e+ANTEka(:,6);

%Parámetros del satélite

BO=0:9;
CNI=23*(exp(0.08*BO)-1)+74;
CNii=fliplr(CNI);
piresatkum=10^(piresatkum/10);
piresatkam=10^(piresatkam/10);
piresatkue=10^(piresatkue/10);
piresatkae=10^(piresatkae/10);

%Definición de constantes

Comexito=1;
Comnoexit=0;
noem=0;
nome=0;
costo=0;
costo1=10e6;
costo2=0;
costo3=0;
Cku=ones(3,11);
Cka=ones(3,11);

inicio del calculo de combinaciones para ku

```

```

for i=1:size(HPAmku,1)
    if HPAmku(i,3)>=BWum
        fix(clock)
        for i1=1:size(ANTmku,i)
            for i2=1:size(ANTEku,1)
                for i3=1:size(LNAku,1)
                    for i4=1:size(MODEM,1)
                        if (ATTm>=MODEM(i4,7) & ATTm<=MODEM(i4,8)) %Comparación de
la Tasa propuesta                                     %con la manejada por
el MODEM
                            pire=10*log10(HPAmku(i,1))+ANTmku(i1,2)-0.75;    %Calculo
del PIRE para cada caso
                            CNS=pire-Losseskusme+Fmeritosatkum+228.6012;    %Calculo
de C/No de subida
                            Ts=(ANTEku(i2,3))/(ARLpbmeku*ACL)+Tcon+LNAku(i3,1);
%Temperatura de Ruido del Sistema
                            Fmeritoest=ANTEku(i2,1)-10*log10(Ts);    %Calculo de G/T
de la estacion terrena
                            CNb=10*log10(piresatkum*BWum/36)+Fmeritoest-
Losseskubme+228.6012;    %Calculo de C/No de bajada
                            for j=1:10    %Calculo de C/No Total y optimo con
Back off
                                ACNt(j)=1/((1/10^((CNS-BO(j))/10))+(1/10^((CNb-
BO(j)+5)/10))+(1/10^(CNI(j)/10)));
                                [M,Pos]=max(ACNt);
                                aCNt=ACNt(Pos);
                            end
                            CNt=10*log10(aCNt);
                            EbNt=CNt-TTm;    %Calculo de Eb/No
                            if EbNt>=MODEM(i4,BER)    %Verificacion de aceptabilidad
del Modem
                                % Cálculo del enlace de regreso (Esclava - maestra)

```

```

for i5=1:size(HPAeku,1)
    for i6=1:size(LNAku,1)
        for i7=1:size(MODEM,1)
            if (ATTe>=MODEM(i4,7) & ATTe<=MODEM(i4,8))
                pire=10*log10(HPAeku(i5,1))+ANTeku(i2,2)-
0.75;    %Calculo del PIRE para cada caso
                CNs=pire-
Losseskusem+Fmeritosa-kue+228.6012;    %Calculo de C/No de subida

                Ts=(ANTmku(i1,3))/(ARLpbemku*ACL)+Tcon+LNAku(i6,1); %Temperatura de Ruido
del Sistema

                Fmeritoest=ANTmku(i1,1)-10*log10(Ts);
%Calculo de G/T de la estacion terrena

                CNb=10*log10(piresatkue*BWue/36)+Fmeritoest-Losseskubem+228.6012;    %Calculo
de C/No de bajada

                for j=1:10    %Calculo de C/No Total y
optimo con Back off

                    ACNt(j)=1/((1/10^((CNs-
BO(j))/10)))+(1/10^((CNb-BO(j)+5)/10)))+(1/10^(CN1(j)/10)));

                    [M, Pos]=max(ACNt);

                    aCNt=ACNt(Pos);

                end

                CNt2=10*log10(aCNt);

                EbNt=CNt2-TTe;    %Calculo de Eb/No

                comb=[i,i1,i2,i3,i4,i5,i6,i7,CNt,CNt2,costo]; %Combinacion, C/No del peor
caso de lluvia y Costo

                if EbNt>=MODEM(i7,BER)    %Verificacion de
aceptabilidad del Modem

                    costo=HPAmku(i,2)+ANTmku(i1,4)+numest*ANTeku(i2,4)+numest*LNAku(i3,2)+numes
t*MODEM(i4,9)+numest*HPAeku(i5,2)+LNAku(i6,2)+MODEM(i7,9);
                    comb(11)=costo;    %Calculo del
Costo

                    Comexito=Comexito+1;

                    if comb(11)<costo1    %Rutina para
encontrar las tres combinaciones

```

```

                                                                    %de menor costo
Cku(3,:)=Cku(2,:);
Cku(2,:)=Cku(1,:);
Cku(1,:)=comb;

costo3=costo2;
costo2=costo1;
costo1=costo;

elseif comb(11)<costo2

Cku(3,:)=Cku(2,:);
Cku(2,:)=comb;

costo3=costo2;
costo2=costo;

elseif comb(11)<costo3

Cku(3,:)=comb;

costo3=costo;

end

else
noem=noem+1;

end

end

end

end

end

else
nome=nome+1;

end

end

Comnoexit=noem+nome;

end

end

end

end

end
```

```

end

%Definición de contantes
Comexito=1;
Comnoexit=0;
noem=0;
nome=0;
costo=0;
costo1=10e6;
costo2=0;
costo3=0;
Cka=ones(3,11);

%Inicio del calculo de combinaciones para ka
for i=1:size(HPAmka,1)

    if HPAmka(i,3)>=BWum

        fix(clock)

        for i1=1:size(ANTmka,1)

            for i2=1:size(ANTeka,1)

                for i3=1:size(LNAka,1)

                    for i4=1:size(MODEM,1)

                        if (ATTm>=MODEM(i4,7) & ATTm<=MODEM(i4,8)) %Comparación de
la Tasa propuesta                                     %con la manejada por
el MODEM

                            pire=10*log10(HPAmka(i,1))+ANTmka(i1,2)-0.75;    %Calculo
del PIRE para cada caso

                            CNs=pire-Losseskame+Fmeritosatkam+228.6012;    %Calculo
de C/No de subida

                            Ts=(ANTeka(i2,3))/(ARLpbmeka^ACL)+Tcon+LNAka(i3,1);
%Temperatura de Ruido del Sistema

                            Fmeritoest=ANTeka(i2,1)-10*log10(Ts);    %Calculo de G/T
de la estacion terrena

                            CNb=10*log10(piresatkam*BWum/36)+Fmeritoest-
Losseskabme+228.6012;    %Calculo de C/No de bajada

                            for j=1:10    %Calculo de C/No Total y optimo con
Back off

                                ACNt(j)=1/(((1/10^((CNs-BO(j))/10)))+(1/10^((CNb-
BO(j)+5)/10)))+(1/10^(CNI(j)/10)));

```



```

[M, Pos]=max(ACnt);

aCnt=ACnt(Pos);

end

Cnt=10*log10(aCnt);

EbNt=Cnt-TTm; %Calculo de Eb/No

if EbNt>=MODEM(i4,BER) %Verificacion de aceptabilidad
del Modem

% Cálculo del enlace de regreso (Esclava - maestra)
for i5=1:size(HPAeka,1)
    for i6=1:size(LNAka,1)
        for i7=1:size(MODEM,1)
            if (ATTe>=MODEM(i4,7) & ATTe<=MODEM(i4,8))
                pire=10*log10(HPAeka(i5,1))+ANTeka(i2,2)-
0.75; %Calculo del PIRE para cada caso
                CNS=pire-
Losseskasem+Fmeritosatkae+228.6012; %Calculo de C/No de subida

                Ts=(ANTmka(i1,3))/(ARLpbemka*ACL)+Tcon+LNAka(i6,1); %Temperatura de Ruido
del Sistema

                Fmeritoest=ANTmka(i1,1)-10*log10(Ts);
%Calculo de G/T de la estacion terrena

                CNb=10*log10(piresatkae*BWue/36)+Fmeritoest-Losseskabem+228.6012; %Calculo
de C/No de bajada

                for j=1:10 %Calculo de C/No Total y
optimo con Back off
                    ACnt(j)=1/((1/10^((CNS-
BO(j))/10))+1/10^((CNb-BO(j)+5)/10))+1/10^(CNi(j)/10));

                    [M, Pos]=max(ACnt);

                    aCnt=ACnt(Pos);

                end

                Cnt2=10*log10(aCnt);

                EbNt=Cnt2-TTe; %Calculo de Eb/No

```

```

comb=[i,i1,i2,i3,i4,i5,i6,i7,Cnt,Cnt2,costo]; %Combinacion, C/No del peor
caso de lluvia y Costo

if EbNt>=MODEM(i7,BER) %Verificacion de
aceptabilidad del Modem

costo=HPAmka(i,2)+ANTmka(i1,4)+numest*ANTeka(i2,4)+numest*LNAka(i3,2)+numes
t*MODEM(i4,9)+numest*HPAeka(i5,2)+LNAka(i6,2)+MODEM(i7,9);
comb(11)=costo; %Calculo del
Costo

Comexito=Comexito+1;

if comb(11)<costo1 %Rutina para
encontrar las tres combinaciones %de menor costo

Cka(3,:)=Cka(2,:);
Cka(2,:)=Cka(1,:);
Cka(1,:)=comb;

costo3=costo2;
costo2=costo1;
costo1=costo;

elseif comb(11)<costo2

Cka(3,:)=Cka(2,:);
Cka(2,:)=comb;

costo3=costo2;
costo2=costo;

elseif comb(11)<costo3

Cka(3,:)=comb;
costo3=costo;
end

else

noem=noem+1;

end

end

end

end

else

nome nome+1;

```



```

Emeritoestpem=ANTmku(Cku(k,2),1)-10*log10(Tspem);

CNbpme(k,1)=10*log10(piresatkum*BWum/36)+Emeritoestpme-
Losseskubme+228.6012; %C/No bajada (Tres mas baratas)
CNbpem(k,1)=10*log10(piresatkue*BWue/36)+Emeritoestpem-
Losseskubem+228.6012;

for j=1:10 %Back Off

    CNSme(k,j)=CNspme(k,1)-BO(j);
    CNSem(k,j)=CNspem(k,1)-BO(j);

    CNBme(k,j)=CNbpme(k,1)-BO(j)+5;
    CNBem(k,j)=CNbpem(k,1)-BO(j)+5;

ACNTme(k,j)=1/((1/10^((CNSme(k,j))/10))+(1/10^((CNBme(k,j))/10))+(1/10^(CNI(j)
/10)));

ACNTem(k,j)=1/((1/10^((CNSem(k,j))/10))+(1/10^((CNBem(k,j))/10))+(1/10^(CNI
(j)/10)));

    CNTme(k,j)=10*log10(ACNTme(k,j));
    CNTem(k,j)=10*log10(ACNTem(k,j));

end

%Graficacion

figure(k)
CNSsme=fliplr(CNSme);
Bo=fliplr(BO);
plot(-Bo,CNSsme(k,:), 'r');
title('KU: C/No subida(rojo), C/No bajada(azul), C/No
intermodulación(turquesa), C/No total(verde)');
xlabel('Back-off [dB]');
ylabel('C/No [dBHz]');
hold on
CNBbme=fliplr(CNBme);
plot(-Bo,CNBbme(k,:), 'b');
cntme=fliplr(CNTme);
plot(-Bo,cntme(k,:), 'g');
plot(-Bo,CNii, 'c');

CNSsem=fliplr(CNSem);
plot(-Bo,CNSsem(k,:), 'r*-');
CNBbem=fliplr(CNBem);
plot(-Bo,CNBbem(k,:), 'b*-');
cntem=fliplr(CNTem);
plot(-Bo,cntem(k,:), 'g*-');
uicontrol('Style','text','String','Propiedad de Altamirano, Malpica,
Ordóñez.','BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra],'Position',[320, 1, 240,
13]);
hold off
pause

else

```

```

    if k==1
        msgbox('Existen cero combinaciones de equipo convenientes en banda
ku')
        break
    elseif k==2
        msgbox('Existe una combinación de equipo conveniente en banda ku')
        break
    elseif k==3
        msgbox('Existen dos combinaciones de equipo convenientes en banda
ku')
    end
end
end

%Graficacion de C/No subida(Caso de mayor atenuacion por lluvia),
%C/No bajada(Caso de mayor atenuacion por lluvia), C/No Inter y C/No total de
%las tres combinaciones mas baratas
%Ka

for k=1:3

    if (sum(Cka(k,:))~=10)

        PIREme(k,1)=10*log10(HPAmka(Cka(k,1),1)+ANTmka(Cka(k,2),2)-1.5;
%Calculo del PIRE para los tres mejores casos
        PIREem(k,1)=10*log10(HPAeka(Cka(k,6),1)+ANTEka(Cka(k,3),2)-1.5;

        CNspme(k,1)=PIREme(k,1)-Losseskasme+Fmeritosatkam+228.6012;    %Calculo
de C/No subida para graficar
        CNspem(k,1)=PIREem(k,1)-Losseskasem+Fmeritosatkae+228.6012;

        Tspme=(ANTEka(Cka(k,3),3))/(ARLpbmeka*ACL)+Tcon+LNAka(Cka(k,4),1); %Temp
del sistema
        Tspem=(ANTmka(Cka(k,2),3))/(ARLpbemka*ACL)+Tcon+LNAka(Cka(k,7),1);

        Fmeritoestpme=ANTEka(Cka(k,3),1)-10*log10(Tspme);    %G/T de la estacion
de las tres combinaciones mas baratas
        Fmeritoestpem=ANTmka(Cka(k,2),1)-10*log10(Tspem);

        CNbpme(k,1)=10*log10(piresatkam*BWum/36)+Fmeritoestpme-
Losseskabme+228.6012;    %C/No bajada (Tres mas baratas)
        CNbpem(k,1)=10*log10(piresatkae*BWue/36)+Fmeritoestpem-
Losseskabem+228.6012;

        for j=1:10    %Back Off

            CNSme(k,j)=CNspme(k,1)-BO(j);
            CNSem(k,j)=CNspem(k,1)-BO(j);

```

```

CNBme(k,j)=CNbpme(k,1)-BO(j)+5;
CNBem(k,j)=CNbpem(k,1)-BO(j)+5;

ACNTme(k,j)=1/((1/10^((CNSme(k,j))/10))+(1/10^((CNBme(k,j))/10))+(1/10^(CNI(j)/10)));

ACNTem(k,j)=1/((1/10^((CNSem(k,j))/10))+(1/10^((CNBem(k,j))/10))+(1/10^(CNI(j)/10)));

CNTme(k,j)=10*log10(ACNTme(k,j));
CNTem(k,j)=10*log10(ACNTem(k,j));

end

%Graficacion

figure(k+3)
CNSsme=fliplr(CNSme);
Bo=fliplr(BO);
plot(-Bo,CNSsme(k,:), 'r');
title('KA: C/No subida(rojo), C/No bajada(azul), C/No
intermodulación(turquesa), C/No total(verde)');
xlabel('Back-off [dB]');
ylabel('C/No [dBHz]');
hold on
CNBbme=fliplr(CNBme);
plot(-Bo,CNBbme(k,:), 'b');
cntme=fliplr(CNTme);
plot(-Bo,cntme(k,:), 'g');
plot(-Bo,CNii, 'c');

CNSsem=fliplr(CNSem);
plot(-Bo,CNSsem(k,:), 'r*-.');
CNBbem=fliplr(CNBem);
plot(-Bo,CNBbem(k,:), 'b*-.');
cntem=fliplr(CNTem);
plot(-Bo,cntem(k,:), 'g*-.');
uicontrol('Style','text','String','Propiedad de Altamirano, Malpica,
Ordóñez.','BackgroundColor',[rletra, glettra, bletra],'Position',[320, 1, 240,
13]);
hold off
pause

else

if k==1

msgbox('Existen cero combinaciones de equipo convenientes en banda
ka')
break

elseif k==2

msgbox('Existe una combinación de equipo conveniente en banda ka')
break

```



```

for v=1:3

uicontrol('Style','text','String',num2str(Cka(v,1:8)),'BackgroundColor',[rleta, gleta, bleta],'Position',[250+(v-1)*70, 261-(u-1)*200, 70, 104]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(Costoka(v,1)),'BackgroundColor',[rleta, gleta, bleta],'Position',[250+(v-1)*70, 235-(u-1)*200, 70, 13]);

    end

end

end

uicontrol('Style','text','String','Propiedad de Altamirano, Malpica, Ordóñez.','BackgroundColor',[rleta, gleta, bleta],'Position',[320, 1, 240, 13]);

anchoE=110;
anchoF=100;
anchoM=120;
anchoC=130;
anchoc=80;

for k=1:3
    pause;
    res=cell(16,3);

    for i=1:3
        res(2,i)=HPAMKU(Cku(k,1),i);
        res(4,i)=ANTMKU(Cku(k,2),i);
        res(6,i)=ANTEKU(Cku(k,3),i);
        res(8,i)=LNAKU(Cku(k,4),i);
        res(10,i)=MODEME(Cku(k,5),i);
        res(12,i)=HPAEKU(Cku(k,6),i);
        res(14,i)=LNAKU(Cku(k,7),i);
        res(16,i)=MODEME(Cku(k,8),i);
    end

    costos=cell(16);

    costos(2)=num2cell(HPAmku(Cku(k,1),2));
    costos(4)=num2cell(ANTmku(Cku(k,2),4));
    costos(6)=num2cell(ANTeku(Cku(k,3),4));
    costos(8)=num2cell(LNAku(Cku(k,4),2));
    costos(10)=num2cell(MODEM(Cku(k,5),9));
    costos(12)=num2cell(HPAeku(Cku(k,6),2));
    costos(14)=num2cell(LNAku(Cku(k,7),2));
    costos(16)=num2cell(MODEM(Cku(k,8),9));

    K=num2cell(k);
    figure(7+k);

    uicontrol('Style','text','String','', 'BackgroundColor',[rfondo, gfondo, bfondo],'Position',[1, 1, 360, 418]);

```



```

op={'PRIMERA OPCIÓN EN BANDA KU','SEGUNDA OPCIÓN EN BANDA KU','TERCERA
OPCIÓN EN BANDA KU'};
uicontrol('Style','text','String',op(k),'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra],'Position',[170, 400, 200, 13]);

A={'','HPA MAESTRO','','ANTENA MAESTRA','','ANTENA ESCLAVA','','LNA
ESCLAVA','','MODEM ESCLAVA','','HPA ESCLAVA','','LNA MAESTRO','','MODEM
MAESTRO',''};

uicontrol('Style','text','String','Equipo','BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10, 370, anchoE, 13]);
uicontrol('Style','text','String',A,'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra],'Position',[10, 140, anchoE, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Fabricante','BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10+anchoE, 370, anchoF, 13]);
uicontrol('Style','text','String',res(:,1),'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10+anchoE, 140, anchoF, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Modelo','BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10+anchoE+anchoF, 370, anchoM, 13]);
uicontrol('Style','text','String',res(:,2),'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10+anchoE+anchoF, 140, anchoM, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Características','BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM, 370, anchoC, 13]);
uicontrol('Style','text','String',res(:,3),'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM, 140, anchoC, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Costo
[Dlls.]','BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra],'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM+anchoC, 370, anchoc, 13]);
uicontrol('Style','text','String',costos,'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra],'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM+anchoC, 140, anchoc, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Número de
estaciones','BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra],'Position',[10, 100,
120, 13]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(numest),'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[130, 100, 80, 13]);

uicontrol('Style','text','String','','BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra],'Position',[210, 100, 120, 13]);

uicontrol('Style','text','String','Costo Total de la red
[Dlls.]','BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra],'Position',[anchoE+anchoF+anchoM, 100, anchoC+10, 13]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(Costoku(k,1)),'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM+anchoC, 100, anchoc,
13]);

uicontrol('Style','text','String','Propiedad de Altamirano, Malpica,
Ordóñez.','BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra],'Position',[320, 1, 240,
13]);

```

```

uicontrol('Style','text','String','','BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra],'Position',[10, 80, 110, 13]);
uicontrol('Style','text','String','Enlace Maestra-
Esclava','BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra],'Position',[120, 80, 215,
13]);
uicontrol('Style','text','String','Enlace Esclava-
Maestra','BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra],'Position',[335, 80, 215,
13]);

uicontrol('Style','text','String','C/No[dBHz]','BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10, 60, 110, 20]);
uicontrol('Style','text','String','Eb/No[dBHz]','BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[10, 40, 110, 20]);

uicontrol('Style','text','String','Eb/No[dBHz]modem','BackgroundColor',[rletra
, gletra, bletra],'Position',[10, 20, 110, 20]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(Cku(k,9)),'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra],'Position',[120, 60, 215, 20]);
uicontrol('Style','text','String',num2str(Cku(k,10)),'BackgroundColor',[rle
tra, gletra, bletra],'Position',[335, 60, 215, 20]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(Cku(k,9)-
TTm),'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra],'Position',[120, 40, 215,
20]);
uicontrol('Style','text','String',num2str(Cku(k,10)-
TTe),'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra],'Position',[335, 40, 215,
20]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(MODEM(Cku(k,5),BER)),'BackgroundColo
r',[rletra, gletra, bletra],'Position',[120, 20, 215, 20]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(MODEM(Cku(k,8),BER)),'BackgroundColo
r',[rletra, gletra, bletra],'Position',[335, 20, 215, 20]);

end

for k=1:3

pause;
res=cell(16,3);

for i=1:3
res(2,i)=HPAMKA(Cka(k,1),i);
res(4,i)=ANTMKA(Cka(k,2),i);
res(6,i)=ANTEKA(Cka(k,3),i);
res(8,i)=LNAKA(Cka(k,4),i);
res(10,i)=MODEME(Cka(k,5),i);
res(12,i)=HPAEKA(Cka(k,6),i);
res(14,i)=LNAKA(Cka(k,7),i);
res(16,i)=MODEME(Cka(k,8),i);
end

costos=cell(16);

```

```

costos(2)=num2cell(HPAmka(Cka(k,1),2));
costos(4)=num2cell(ANTmka(Cka(k,2),4));
costos(6)=num2cell(ANTeka(Cka(k,3),4));
costos(8)=num2cell(LNAka(Cka(k,4),2));
costos(10)=num2cell(MODEM(Cka(k,5),9));
costos(12)=num2cell(HPAeka(Cka(k,6),2));
costos(14)=num2cell(LNAka(Cka(k,7),2));
costos(16)=num2cell(MODEM(Cka(k,8),9));

K=num2cell(k);
figure(10+k);

uicontrol('Style','text','String','', 'BackgroundColor',[rfondo, gfondo,
bfondo], 'Position',[1, 1, 560, 418]);

op={'PRIMERA OPCIÓN EN BANDA KA', 'SEGUNDA OPCIÓN EN BANDA KA', 'TERCERA
OPCIÓN EN BANDA KA'};
uicontrol('Style','text','String',op(k), 'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra], 'Position',[170, 400, 200, 13]);

A={'','HPA MAESTRO', '', 'ANTENA MAESTRA', '', 'ANTENA ESCLAVA', '', 'LNA
ESCLAVA', '', 'MODEM ESCLAVA', '', 'HPA ESCLAVA', '', 'LNA MAESTRO', '', 'MODEM
MAESTRO', ''};

uicontrol('Style','text','String','Equipo', 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10, 370, anchoE, 13]);
uicontrol('Style','text','String',A, 'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra], 'Position',[10, 140, anchoE, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Fabricante', 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10+anchoE, 370, anchoF, 13]);
uicontrol('Style','text','String',res(:,1), 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10+anchoE, 140, anchoF, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Modelo', 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10+anchoE+anchoF, 370, anchoM, 13]);
uicontrol('Style','text','String',res(:,2), 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10+anchoE+anchoF, 140, anchoM, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Características', 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM, 370, anchoC, 13]);
uicontrol('Style','text','String',res(:,3), 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM, 140, anchoC, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Costo
[Dlls.], 'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra], 'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM+anchoC, 370, anchoc, 13]);
uicontrol('Style','text','String',costos, 'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra], 'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM+anchoC, 140, anchoc, 220]);

uicontrol('Style','text','String','Número de
estaciones', 'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[10, 100,
120, 13]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(numest), 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[130, 100, 80, 13]);

```

```

uicontrol('Style','text','String','', 'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra], 'Position',[210, 100, 120, 13]);

uicontrol('Style','text','String','Costo Total de la red
[Dlls.]', 'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra], 'Position',[anchoE+anchoF+anchoM, 100, anchoC+10, 13]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(Costoka(k,1)), 'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[10+anchoE+anchoF+anchoM+anchoC, 100, anchoC, 13]);

uicontrol('Style','text','String','Propiedad de Altamirano, Malpica,
Ordóñez.', 'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[320, 1, 240, 13]);

uicontrol('Style','text','String','', 'BackgroundColor',[rletra, gletra,
bletra], 'Position',[10, 80, 110, 13]);
uicontrol('Style','text','String','Enlace Maestra-
Esclava', 'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[120, 80, 215, 13]);
uicontrol('Style','text','String','Enlace Esclava-
Maestra', 'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[335, 80, 215, 13]);

uicontrol('Style','text','String','C/No[dBHz]', 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10, 60, 110, 20]);
uicontrol('Style','text','String','Eb/No[dBHz]', 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10, 40, 110, 20]);

uicontrol('Style','text','String','Eb/No[dBHz]modem', 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[10, 20, 110, 20]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(Cka(k,9)), 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[120, 60, 215, 20]);
uicontrol('Style','text','String',num2str(Cka(k,10)), 'BackgroundColor',[rletra,
gletra, bletra], 'Position',[335, 60, 215, 20]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(Cka(k,9)-
TTm), 'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[120, 40, 215, 20]);
uicontrol('Style','text','String',num2str(Cka(k,10)-
TTe), 'BackgroundColor',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[335, 40, 215, 20]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(MODEM(Cka(k,5),BER)), 'BackgroundColo
r',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[120, 20, 215, 20]);

uicontrol('Style','text','String',num2str(MODEM(Cka(k,8),BER)), 'BackgroundColo
r',[rletra, gletra, bletra], 'Position',[335, 20, 215, 20]);

end

```

