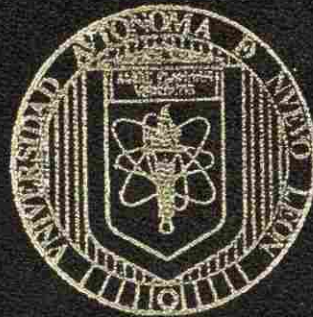


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**



**ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS
SEÑALES EN BANDAS ARRIBA DE 10 GHZ EN
LAS COMUNICACIONES SATELITALES**

POR

ING. JORGE FRANCO QUINTANILLA

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
JUNIO DE 1999**

ANUALISIS DEL COMPONENTO DE LAS

SEÑALES EN BANDAS ARRIBA DE 10 GHz EN LAS

COMUNICACIONES SATELITALES

TM

Z5853

.M2

FIME

1999

F7

J.F.O.



1020128456

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

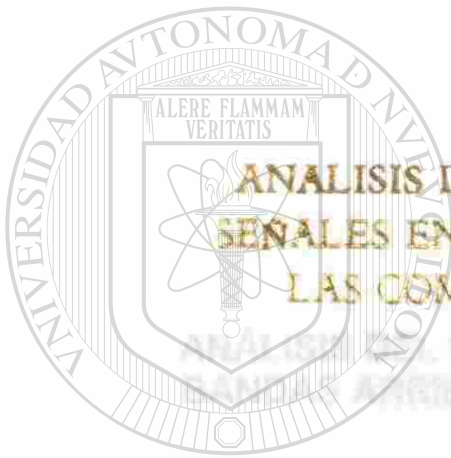
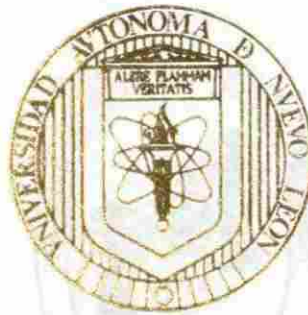
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS
SENALES EN BANDAS ARRIBA DE 10 GHZ EN
LAS COMUNICACIONES SATELITALES

UANL

POR

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

ING. JORGE FRANCO QUINTANILLA

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA

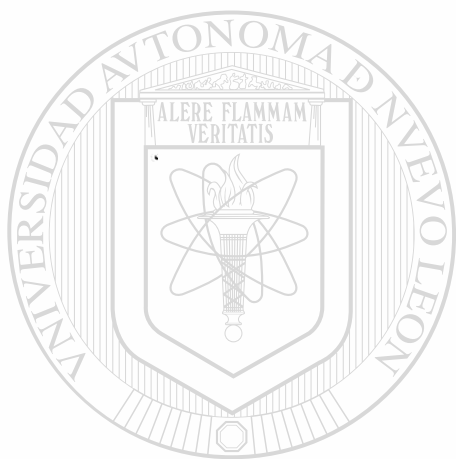


SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO DE 1999

TM
25853
.M2
FME
999
F7

0133-01060



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

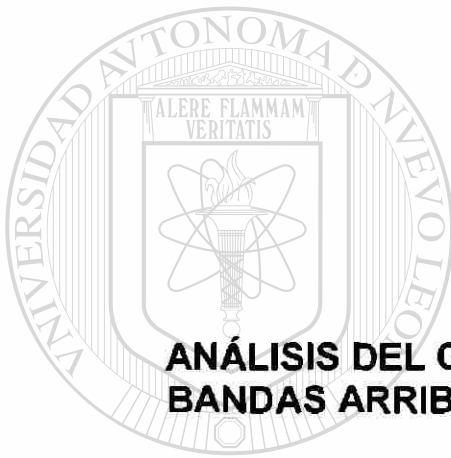
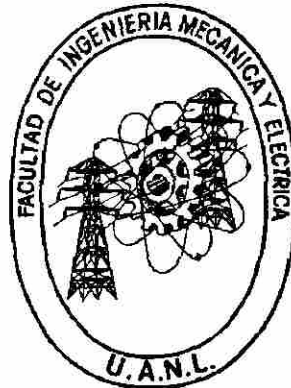


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS SEÑALES EN
BANDAS ARRIBA DE 10 GHZ EN LAS COMUNICACIONES
SATELITALES**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

POR

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ING. JORGE FRANCO QUINTANILLA

TESIS

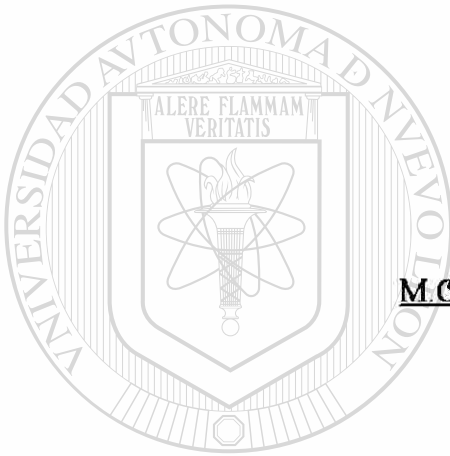
**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN
ELECTRÓNICA**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.
JUNIO DE 1999**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis, **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS SEÑALES EN BANDAS ARRIBA DE 10 GHZ, EN LAS COMUNICACIONES SATELITALES**, realizada por el alumno **JORGE FRANCO QUINTANILLA** matrícula 097037 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la **INGENIERÍA ELÉCTRICA** con especialidad en **ELECTRÓNICA**.

El Comité de tesis




M.C. Fernando Estrada Salazar

Asesor
Nombre


M.C. Sergio Martínez Luna

Coasesor
Nombre


M.C. José D. Rivera Martínez

Coasesor
Nombre


M.C. Roberto Villarreal Garza

Vo. Bo.
Nombre

División de Estudios de Post-Grado.

San Nicolás de los Garza, N.L. a 27 de Abril de 1999

PRÓLOGO

En nuestro mundo, actualmente las comunicaciones por enlaces satelitales tienen una gran demanda mundial en el aspecto social, económico, político y cultural de los países, provocando que se produzca una enorme saturación de bandas de frecuencia de transmisión entre 1 y 10 GHz.

El objetivo de nuestra tesis de maestría es dar a conocer una nueva banda de frecuencias para la transmisión y recepción de información (frecuencias arriba de 10 GHz).

Se pretende dar un amplio panorama de las ventajas y desventajas que presenta las comunicaciones en este rango de frecuencias. Destacando que uno de los aspectos más importantes que influye negativamente en este tipo de transmisión, son las grandes pérdidas producidas por la lluvia.

Se busca de una manera sencilla y directa hacer el diseño de un enlace ascendente y un enlace descendente mediante la aplicación de un conjunto de ecuaciones básicas, manejadas en decibeles.

Así mismo esta investigación tiene como punto fundamental dejar a los estudiantes de la maestría en telecomunicaciones un conocimiento teórico-práctico de las comunicaciones satelitales arriba de 10 GHz y seguir fomentando la importancia que tienen las comunicaciones mediante satélites en nuestro país actualmente.

Todos los temas fueron desarrollados por el Ing. Jorge Franco Quintanilla y el Ing. Adán Alejandro Salinas Treviño.

SÍNTESIS

Primeramente se establece la importancia que tienen las comunicaciones satelitales, así como las ventajas que presentan actualmente en la transmisión de información. La clasificación de los satélites de acuerdo a su aplicación, principios de operación, de acuerdo a su órbita, de acuerdo a su cobertura.

Se define la órbita comúnmente más usada por los satélites de comunicaciones así como las características que presenta. Así como las bandas de frecuencia utilizadas para fines comerciales y militares (Banda C, banda Ku).

El satélite es un receptor activo, cuya función es recibir la señal de la tierra, amplificarla y retransmitirla a una o varias estaciones terrenas. Se hace una descripción de lo que es un enlace ascendente (UPLINK), así como un enlace descendente (DOWNLINK). Describiendo los elementos que forman cada uno de estos enlaces.

Uno de los factores más importantes en la transmisión estación terrena - satélite- estación terrena es la potencia de la señal transmitida así como la potencia de la señal recibida.

Así mismo se establece los diferentes tipos de pérdidas de potencia.

En el siguiente punto se hace una introducción a los cálculos de enlace. Previamente se indica la importancia y las ventajas del cálculo de enlace en notación decibel (dB). Así como los parámetros que intervienen en el cálculo de enlace ascendente y descendente, como por ejemplo:

- Potencia transmitida a la antena (P)
- Ganancia de la antena (G)
- Potencia radiada equivalente (EIRP)
- Nivel de iluminación (W) en la recepción
- Pérdidas en la trayectoria de espacio libre (L)
- Sistema de temperatura de ruido (Ts)
- Figura de mérito para los sistemas de recepción (G/Ts)
- Razón de la portadora a ruido térmico (C/T)
- Razón de la portadora a densidad de ruido (C/N₀)
- Razón de la portadora a ruido (C/N)

Se dan ejemplos en forma corta de un enlace ascendente y un enlace descendente.

En el siguiente capítulo, Sistemas Arriba de 10 GHz se explica la importancia que actualmente tiene el diseño de sistemas de transmisión arriba de 10 GHz, debido a la enorme saturación de bandas debajo de 10 GHz.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La gran desventaja que presenta este tipo de comunicación son las pérdidas por lluvia y el ángulo de elevación bajo.

Para conocer el efecto de las pérdidas por lluvia en la propagación de señales arriba de 10 GHz. Se establecieron 2 modelos empíricos para hacer el cálculo de las pérdidas por lluvia.

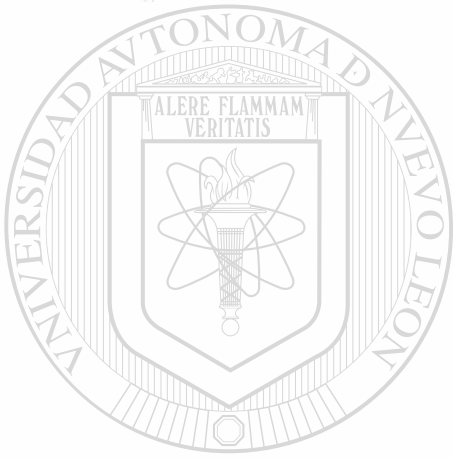
- Modelo propuesto por la NASA (Modelo Global)

- Modelo propuesto por la ITU-R.

Estos modelos se aplicaron en diferentes ciudades de la República Mexicana a diferentes frecuencias (15 GHz y 35GHz).

Las conclusiones generales de este proyecto de maestría han sido la elaboración de una serie de practicas de laboratorio en las comunicaciones satélites a frecuencias arriba de 10 Ghz.

Estas prácticas se realizaron utilizando el equipo de laboratorio de microondas del Departamento de Electrónica y Comunicaciones (equipo de recepción DIRECTV).



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



INDICE

Prologo

Síntesis

1.- INTRODUCCIÓN 1

1.1 Descripción del problema a resolver..... 1

1.2 Objetivo de la tesis..... 1

1.3 Justificación del trabajo de tesis..... 2

1.4 Metodología..... 2

1.5 Limites del estudio..... 2

1.5 Revisión bibliográfica..... 3

2.- GENERALIDADES DE LOS SATÉLITES DE COMUNICACIONES... 4

2.1 Introducción..... 4

2.2 Función de un satélite de comunicaciones..... 6

2.2.1 ¿Por qué usar un satélite de comunicaciones? 7

2.2.2 ¿Dónde esta el satélite? 10

2.2.3 ¿Qué hace el satélite? 11

2.2.4 ¿Cómo se mide el desempeño de un satélite? 15

2.3 Parámetros en un cálculo de enlace. 17

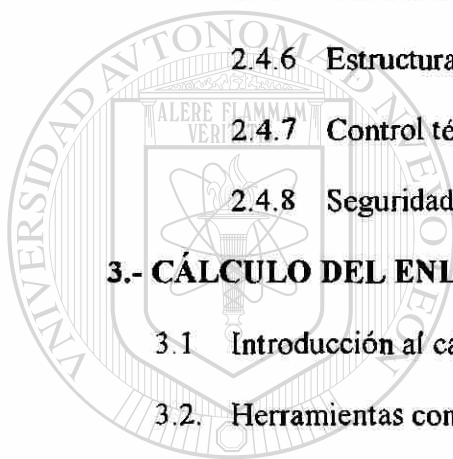
2.3.1 Orbitas del satélite..... 18

2.3.2 Radio Frecuencias..... 19

2.3.3 Antenas..... 19

2.3.4 Amplificadores de potencia... 20

| | | |
|------------|--|-----------|
| 2.3.5 | Perdidas de Transmisión..... | 21 |
| 2.3.6 | Temperatura de ruido..... | 22 |
| 2.4 | Subsistemas de un satélite de comunicaciones..... | 22 |
| 2.4.1 | Configuración de la nave espacial..... | 26 |
| 2.4.2 | Subsistema de comunicaciones..... | 29 |
| 2.4.3 | Telemetria, seguimiento, control y monitoreo..... | 31 |
| 2.4.4 | Potencia eléctrica..... | 31 |
| 2.4.5 | Control de posición..... | 31 |
| 2.4.6 | Estructura..... | 33 |
| 2.4.7 | Control térmico..... | 35 |
| 2.4.8 | Seguridad..... | 38 |
| 3.- | CÁLCULO DEL ENLACE SATELITAL..... | 40 |
| 3.1 | Introducción al cálculo de enlaces..... | 40 |
| 3.2 | Herramientas computacionales..... | 41 |
| 3.3 | Cálculo en decibeles..... | 42 |
| 3.3.1. | Valores numéricos..... | 45 |
| 3.3.2 | Ecuaciones de decibeles..... | 48 |
| 3.3.3 | Manipulaciones algebraicas..... | 50 |
| 3.4 | Conceptos en un cálculo de enlace..... | 52 |
| 3.4.1 | Potencia transmitida P | 53 |
| 3.4.2 | Ganancia de la antena G | 54 |
| 3.4.3 | Potencia radiada equivalente isotrópicamente EIRP..... | 56 |
| 3.4.4 | Niveles de iluminación W | 58 |
| 3.4.5 | Perdidas de trayectoria en el espacio libre L | 59 |



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

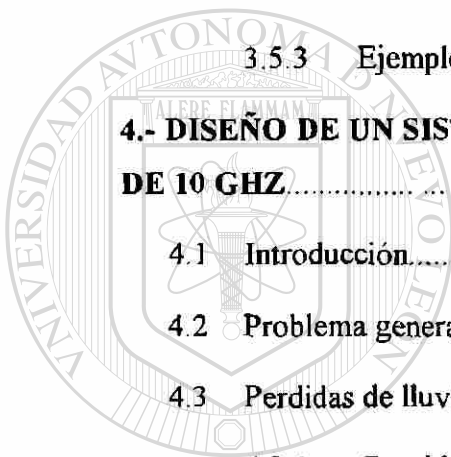
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



| | | |
|--------|---|----|
| 3.4.6 | Temperatura de ruido T_s | 62 |
| 3.4.7 | Figura de mérito G/T_s para un sistema receptor..... | 64 |
| 3.4.8 | Razón de la portadora a ruido térmico C/T | 66 |
| 3.4.9 | Razón de la portadora a densidad de ruido C/N_0 | 67 |
| 3.4.10 | Razón de la portadora a ruido C/N | 69 |
| 3.5 | Ejemplos de cálculos de enlace. | 69 |
| 3.5.1 | Forma corta de un cálculo de enlace ascendente..... | 70 |
| 3.5.2 | Forma corta de un cálculo de enlace descendente..... | 72 |
| 3.5.3 | Ejemplos numéricos de cálculos de enlace..... | 74 |

4.- DISEÑO DE UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIÓN ARRIBA DE 10 GHZ.....

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1 | Introducción..... | 80 |
| 4.2 | Problema general de propagación arriba de 10 GHz..... | 81 |
| 4.3 | Perdidas de lluvia..... | 86 |
| 4.3.1 | Consideraciones básicas de la lluvia..... | 86 |
| 4.4 | Cálculo de la atenuación debido a lluvia..... | 88 |
| 4.4.1 | Distribución del tamaño de las gotas..... | 89 |
| 4.5 | Modelo propuesto por la NASA (modelo global)..... | 89 |
| 4.5.1 | Discusión del modelo. | 94 |
| 4.5.2 | El modelo de atenuación..... | 97 |
| 4.5.3 | Cálculo de la atenuación debido a lluvia por la técnica de la altura isotérmica variable..... | 99 |
| 4.5.4 | Pasos a seguir para aplicar el modelo de altura isotérmica variable a una trayectoria general tierra – espacio, espacio – tierra. | 100 |



U.A.N.L.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



| | | |
|---|--|------------|
| 4.6. | Modelo propuesto por la ITU-R..... | 103 |
| 4.6.1. | Parámetros que intervienen en el cálculo..... | 103 |
| 4.6.2. | Pasos a seguir para aplicar el modelo a una trayectoria general tierra – espacio, espacio – tierra..... | 108 |
| 4.7 | Aplicación de los modelo a ciudades de la República Mexicana..... | 112 |
| 4.7.1 | Cálculo del ángulo de elevación..... | 112 |
| 4.7.2 | Cálculo para Ensenada, Baja California Norte..... | 113 |
| 4.7.3 | Cálculo para Hermosillo, Sonora..... | 120 |
| 4.7.4 | Cálculo para Monterrey, Nuevo León..... | 127 |
| 4.7.5 | Cálculo para México D.F..... | 133 |
| 4.7.6. | Cálculo para Tuxtla Gutierrez, Chiapas..... | 140 |
| 4.7.7. | Cálculo para Chetumal, Quintana Roo..... | 146 |
| 4.8 | Conclusiones..... | 153 |
| 5.- CONCLUSIONES PRÁCTICAS DE LAS COMUNICACIONES | | 156 |
| SATELITALES ARRIBA DE 10 GHZ..... | | 156 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1 | Paráctica # 1 (Orientación de Antenas)..... | 156 |
| 5.1.1 | Introducción..... | 156 |
| 5.1.2 | Objetivo..... | 159 |
| 5.1.3 | Descripción del experimento..... | 160 |
| 5.1.4 | Análisis de resultados..... | 169 |
| 5.1.5 | Conclusiones..... | 170 |
| 5.2 | Práctica # 2 (Medición del valor de C/N en recepción)..... | 171 |
| 5.2.1 | Introducción..... | 171 |
| 5.2.2 | Objetivos..... | 173 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.2.3 | Descripción del experimento..... | 174 |
| 5.2.4 | Análisis de resultados..... | 177 |
| 5.2.5 | Conclusiones..... | 179 |
| 5.3 | Práctica # 3 (Mediciones en banda Base)..... | 180 |
| 5.3.1 | Introducción..... | 180 |
| 5.3.2 | Objetivos..... | 181 |
| 5.3.3 | Descripción del experimento..... | 183 |
| 5.3.4 | Análisis de resultado..... | 188 |
| 5.3.5 | Conclusiones..... | 189 |
| 5.4 | Práctica # 4 (Identificación de portadora T.V.)..... | 190 |
| 5.4.1 | Introducción..... | 190 |
| 5.4.2 | Objetivo..... | 193 |
| 5.4.3 | Descripción del Experimento..... | 194 |
| 5.4.4 | Análisis de resultados..... | 194 |
| 5.4.5 | Conclusiones..... | 198 |

| | |
|---------------------------|-----|
| Bibliografía | 199 |
|---------------------------|-----|

| | |
|--------------------------------|-----|
| Listado de tablas | 200 |
|--------------------------------|-----|

| | |
|---------------------------------|-----|
| Listado de figuras | 202 |
|---------------------------------|-----|

| | |
|-----------------------|-----|
| Glosario | 204 |
|-----------------------|-----|

| | |
|-------------------------------------|-----|
| Resumen autobiográfico | 206 |
|-------------------------------------|-----|

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER.

Conocer una nueva banda de frecuencias para la transmisión y recepción de información vía satélite (arriba de 10 GHz) y seguir fomentando la importancia que tienen las comunicaciones satelitales en nuestro país actualmente.

Esta tesis pretende darle al estudiante conceptos elementales, características, análisis y aplicaciones del comportamiento de las comunicaciones satelitales.

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS

Realizar un estudio teórico - práctico del comportamiento de las señales con frecuencias mayores a 10 GHz en los sistemas de comunicación satelital.

Con el desarrollo de esta investigación se pretende llegar a una serie de conclusiones que nos permitan estructurar un conjunto de prácticas de laboratorio como complemento del programa de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería en Telecomunicaciones de reciente formación.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

Consideramos que el momento que viven las comunicaciones, exigen profesionistas capacitados no solo en el área teórica, sino también en el aspecto práctico y esta es una oportunidad de aportar algo a nuestra institución

1.4. METODOLOGÍA

Esta tesis se inicio con una investigación bibliográfica para la actualización de la información referente a las comunicaciones satelitales. Se consulto con expertos en la materia para que pudiera ser útil a los egresados de electrónica y comunicaciones.

Se analizaron los diferentes modelos matemáticos que se puedan utilizar en las señales en bandas para la transmisión de información a través del satélite.

Los alumnos podrán comprobar teórica y prácticamente a través de diferentes métodos de análisis lo importante que es utilizar las bandas adecuadas para las comunicaciones.

1.5 LIMITES DEL ESTUDIO

Se pretende analizar los diferentes modelos empíricos para calcular las perdidas por lluvia, debido al gran efecto que producen en las bandas arriba de 10 GHz.

1.6 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

bandas de frecuencia arriba de 10 GHz en diferentes ciudades de la Republica Mexicana, utilizando disponibilidad del 99.99% y 99.9%, así como frecuencias específicas de 15 GHz y 35 GHz.

Los métodos teórico-empírico empleados fueron:

* Modelo propuesto por la NASA

* Modelo propuesto por ITU-R.

También se realizaron una serie de prácticas de laboratorio, enfocadas a las comunicaciones en bandas de frecuencias arriba de 10 GHz como complemento del programa de la Maestría en Telecomunicaciones.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



CAPÍTULO 2

GENERALIDADES DE LOS SATELITES DE COMUNICACIONES.

2.1 INTRODUCCIÓN

El presidente Eisenhower transmitió un mensaje de Navidad en 1958, usando el primer satélite de comunicaciones mundial. Desde entonces, las comunicaciones del mundo entero han estado revolucionándose por satélites.

La copa mundial de fútbol y las olimpiadas son vistas en donde sea. Los canales de televisión son distribuidos por satélite. Las llamadas telefónicas son marcados directamente hacia muchos países. Las redes de computadoras traspasan los océanos y los mensajes son transmitidos instantáneamente hacia las esquinas del mundo. Los satélites de comunicaciones han comprado al mundo entero.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El estudio de satélites de comunicación es interesante, incorporándose muchas tecnologías algunas nuevas y otras ya vistas. Algunas fueron desarrolladas específicamente para satélites, mientras otras fueron desarrolladas en paralelo con muchos otros usos. Las frecuencias de microondas fueron primeramente desarrolladas para el radar militar y después aplicadas para satélite. Las antenas parabólicas no fueron un desarrollo nuevo, pero los discos de satélite captaron la atención del público.

La invención del transistor hizo posible tener satélites de comunicación sin operador que reemplaza a los tubos de vacío. Las celdas solares eficientes y baterías de hidrógeno níquel fueron desarrolladas específicamente para los satélites de comunicaciones.

El desarrollo de hiladoras duales, requirió avances en dinámicas rotacionales. El diseño de la nave espacial termal en un nuevo campo, donde las temperaturas dependen de la radiación más que la conducción y convección. Los requerimientos para más confiabilidad han alcanzado nuevas alturas. No puede el fabricante decir: si no funciona, tráigalo y nosotros lo arreglamos. La mayoría de los satélites de comunicación han dado años de servicios satisfactorio sin mantenimiento.

Ahora que los satélites de comunicación han demostrado sus habilidades para proveer un enlace de comunicación mundial es importante perfeccionar lo más posible su aplicación. El satélite tiene ciertas fuentes de poder y ancho de banda que deben ser propiamente asignados para satisfacer los requerimientos de la comunicación mundial.

El ingeniero de comunicaciones debe calcular los parámetros requeridos por el satélite y el sistema terrestre para satisfacer estos requerimientos. El ingeniero aeroespacial debe determinar los subsistemas necesarios para diseñar un satélite que proveerá las fuentes necesarias.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Ambos ingenieros necesitan conocer el satélite y las interacciones entre este y el resto del sistema de comunicación. En las comunicaciones satelitales, el satélite es el componente clave. Este tema se enfoca en el satélite, en la tecnología de la construcción de este y su aplicación en términos de recepción y transmisión de radio frecuencia (R.F.).

2.2. LA FUNCIÓN DE UN SATÉLITE DE COMUNICACIONES

Los satélites de comunicación son solamente un medio para mandar información sobre una distancia. Otros medios incluyen ondas de sonido, alambre de cobre, radio de onda corta, enlaces de microondas relevadoras y fibras ópticas. Este estudio se enfoca en satélites de comunicación pero la comunicación entre dos o mas lugares frecuentemente requiere el uso de algunos métodos de transmisión enlazadas en una cadena. Los servicios de los satélites de comunicación no son afectados por las locaciones de los puntos que conectan o por la distancia entre ellos. Los servicios de los satélites tienen la única capacidad de cruzar junglas, desiertos y océanos en varias maneras de operaciones de transmisión o conexiones de punto a punto y de conexiones de terminales móviles (ejemplos: barcos, naves aéreas, camiones y carros).

Los elementos básicos de un servicios de satélites de comunicaciones son el segmento de espacio y el segmento de la tierra. El segmento del espacio consiste en el satélite y los medios de su lanzamiento dentro del espacio. El segmento de la tierra incluye las estaciones de la tierra y el centro de control de la red. Se enfatiza el segmento del espacio. La órbita geoestacionaria es la órbita mas usada comúnmente por los satélites de comunicación. En esta órbita especial circular ecuatorial, los satélites son sincronizados con el movimiento de la tierra. Ellos están suspendidos a 35,786 km arriba de un punto particular sobre el ecuador de la tierra. Los impulsores mantienen el satélite sobre ese punto dentro de ciertos límites. Cuando es vista por una antena de la estación de tierra, los satélites mencionados aparecen estacionarios en el cielo. Sin embargo; muchas estaciones terrestres pueden usar antenas de punto fijo. Esto significa una estación menos cara con necesidad de mantenimiento que una estación de seguimiento. Si los satélites de comunicación no están en la órbita geoestacionaria, ellos se mueven con respecto a la estación terrestre, lo cual entonces requiere antenas de seguimiento.

2.2.1. ¿POR QUÉ USAR UN SATÉLITE PARA COMUNICACIONES?.

Los satélites de comunicaciones son usados por las siguientes razones:

- 1.- Comunicaciones de larga distancia económicas. El costo de la transmisión de información vía satélite es independiente de la distancia. Esto es lo mismo para dos puntos 5000 o 100 km separados.
- 2.- Capacidad de emisión. Los satélites pueden ser usados como transmisores de emisión, repitiendo señales de una estación de transmisión terrestre hacia estaciones de recepción múltiples terrestres dentro de un área cubierta. Ningún recurso de satélite adicional son requeridos por las estaciones de recepción adicionales. Los satélites pueden recibir señales de estaciones de transmisión múltiple para repetirla hacia una estación central.
- 3.- Capacidad de ancho de banda. Los satélites repetidores son usualmente aparatos de ancho de banda que puedan transmitir cantidades grandes de información. Decenas de megahertz de ancho de banda están disponibles en cada repetidor, cada repetidor puede ser usado entre dos puntos cualquiera dentro de la cobertura del satélite. Las conexiones terrestres son frecuentemente limitadas a una distancia corta (como una estación local de TV) o a pocos troncos de baja capacidad entre mercados mayores.
- 4.- Lo ancho de la cobertura. Técnicamente, el satélite puede servir a cualquier estación dentro del alcance de su antena. Como se ilustra en la Figura 2.1., aproximadamente el 42% de la superficie de la tierra está dentro del alcance de un satélite geostacionario. La Unión Internacional de telecomunicaciones (ITU) y agencias nacionales regulatorias (la comisión federal de comunicaciones o FCC en los Estados Unidos) frecuentemente restringe la cobertura actual hacia una región más chica.

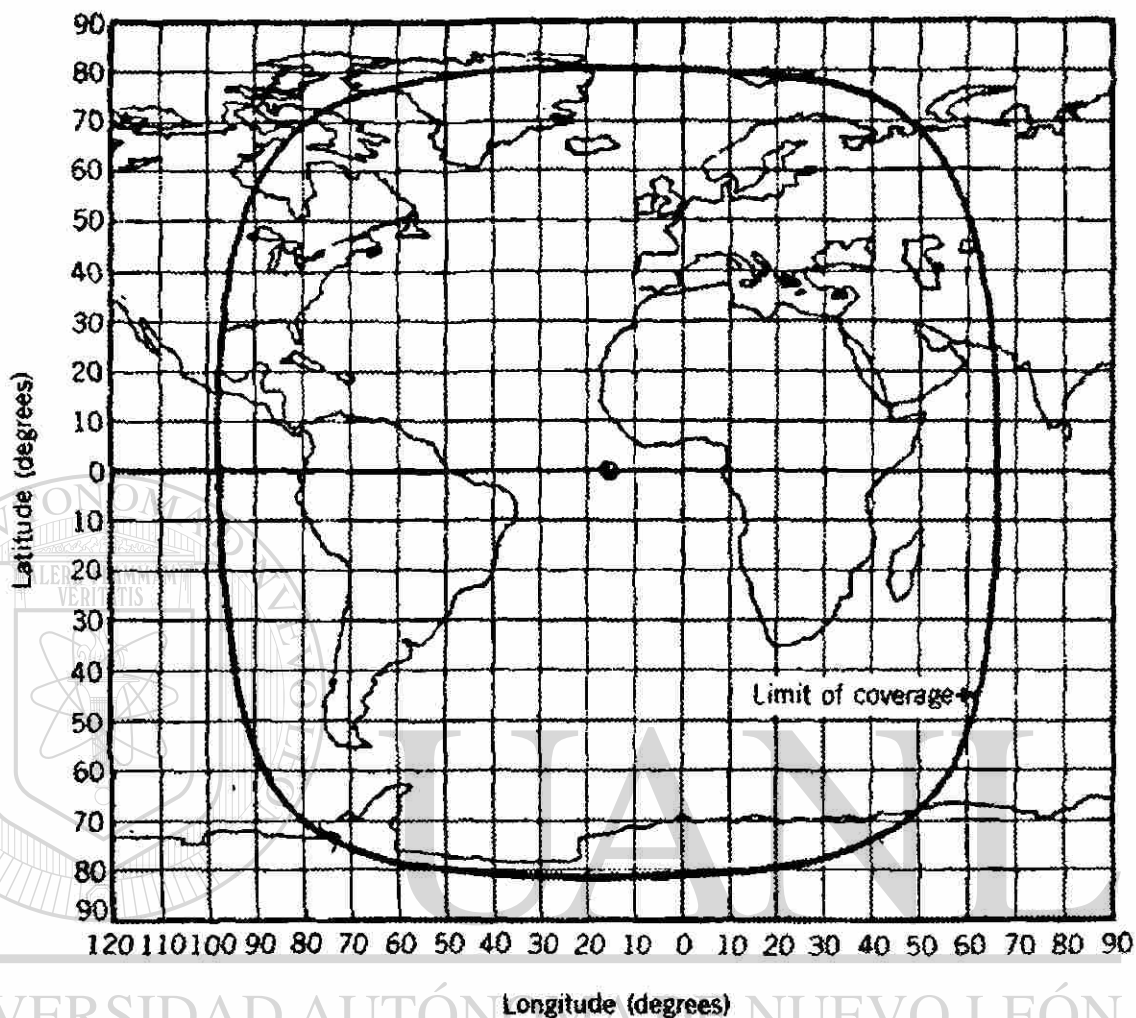


Figura 2.1

5.- Libres de barreras naturales. Los satélites sobrepasan las barreras naturales como las montañas, ciudades, desiertos u océanos. Una nación que incluye regiones separadas (por ejemplo, separadas por un océano) pueden utilizar satélites para proveer un servicio nacional unificado. Un ejemplo de este servicio es aquel que conecta los Estados Unidos con Hawaii y Alaska.

6.- Mejor cobertura en áreas rurales y no desarrolladas. Un satélite puede proveer el mismo tipo de servicio para ciudades grandes y áreas rurales. Los satélites de comunicación aceleran el vuelo de la industria y facilitan el procesamiento de datos hacia áreas rurales. El satélite puede servir para áreas desarrolladas y no desarrolladas.

7.- Mercados nuevos. El servicio de ancho de banda suministrado por los satélites, a guiado a la investigación de nuevos mercados también con la expansión de mercado en menor servicio y las uniones de comunicaciones. Los satélites han encaminado hacia el desarrollo de las redes especializadas de televisión, televisión por cable, TV pagada, grupos étnicos y de lenguaje, grupos religiosos, deportes y noticieros, por ejemplo.

8.- Nuevas portadoras comunes. La disponibilidad de satélites ha guiado hacia la emergencia de nuevas portadoras comunes en los Estados Unidos y Canadá. Algunas portadoras (como el Hughes y Telesat de Canadá) son dueñas de sistemas de satélites, el cual provee ambos arrendamientos al por mayor transponders y al por menor (circuitos individuales), otras portadoras comunes pueden alquilar una o más repetidoras y subalquilar circuitos individuales o canales de televisión. Los resultados de la comunicación permiten incrementar la expansión del mercado.

9.- Servicios nuevos. Las capacidades únicas de los satélites han resultado en nuevos conceptos en comunicaciones. Antes que los satélites fueran enviados, la mayoría de las comunicaciones entre el océano fueron provistas por la radio de alta frecuencia. Aún cuando la tecnología estaba hasta sus límites, este servicio es inadecuado, especialmente en una emergencia. Inmarsat es un ejemplo de un nuevo servicio de satélite. Este provee voz móvil, datos, y vídeo de baja velocidad, confiables a barcos y naves aéreas vía satélite. Los satélites de comunicación pueden obtener datos de una red de sensores y repetirlos dejándolos en un punto para la reducción de datos. El mismo satélite podrá después mandar los resultados (como la prevención de un terremoto) hacia el área de la fuente.

10.- Servicio a las premisas del cliente. Pequeñas estaciones de tierra con antenas pequeñas pueden proveer acceso a base de datos, oficinas, sucursales y a sistemas de

manejo de información. Estas estaciones son conocidas como terminales de apertura muy pequeñas, (VSATs). Estas terminales son usualmente localizadas en las premisas del cliente.

2.2.2. ¿DÓNDE ESTA EL SATÉLITE?

Una órbita es una trayectoria en la cual el satélite se mueve. Los satélites de comunicaciones pueden ser enviados dentro de muchas órbitas: órbitas bajas, órbitas Molniya, órbitas geosíncronas, y órbitas geoestacionarias.

Los primeros satélites de comunicaciones (Score, Echo, Courier, Telstar y Relay) usaron órbitas bajas principalmente por las limitaciones en la capacidad de envío de vehículos. Estas órbitas estaban usualmente en altitudes de algunos cientos de kilómetros. Estas órbitas bajas tienen algunas características atractivas, y serán usadas otra vez en el futuro.

Una órbita elíptica especial ha sido usada por Rusia. Los satélites Molniya son enviados dentro de una órbita Molniya, la cual es una órbita de 12 horas, inclinada alrededor de 65° al ecuador. El punto más alto, llamado el apogeo, está en 65° N de latitud. Cada satélite se mueve lentamente hacia el apogeo. Cada 24 horas, un satélite dado puede ser usado por 6 o 8 horas cuando este esté sobre Rusia o Siberia. Los otros satélites en el sistema Molniya están en órbitas similares y el sistema cambia de un satélite al siguiente. Con tres o cuatro satélites, el sistema puede proveer un servicio continuo.

En una órbita geosíncrona, el movimiento del satélite está sincronizado con la tierra, y tiene el mismo periodo de 24 horas como la rotación de la tierra. Muchos satélites de comunicación usan impulsores para mantener la inclinación orbital dentro de unos cuantas décimas de un grado del ecuador. Estos satélites están en órbitas

geoestacionarias. Ellos aparecen estacionarios en el cielo por que están sincronizados con el movimiento de la tierra, y permanecen en un punto sobre el ecuador.

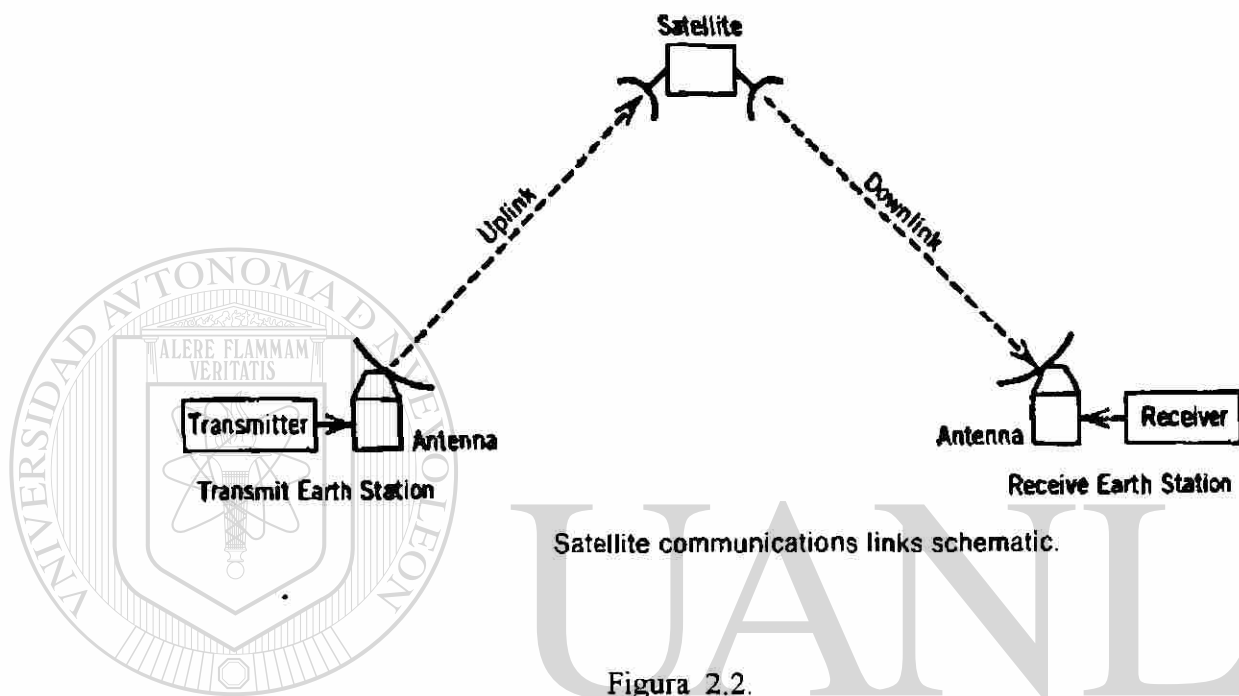
La órbita geoestacionaria ha llegado a ser el estándar del mundo para muchos satélites de comunicación. Esta es una órbita simple, con ciertos de satélites siguiéndose uno tras otro. La órbita geoestacionaria es un recurso importante y necesita protección y control. Las comunicaciones del mundo entero podrían sufrir si este recurso no estuviera disponible debido la sobre población de la órbita, ruinas espaciales o destrucción del satélite causadas por el hombre. La mayoría de las organizaciones que operan los satélites de comunicación son cuidadosas de remover satélites obsoletos de la órbita geoestacionaria, y restringir el acceso a satélites. Solo personas autorizadas pueden tener acceso al satélite. El satélites y sus transponders son propiedad de una o más organizaciones. El uso no autorizado es un robo del servicio. En los Estados Unidos está es una violación a las reglas del FCC. El uso no autorizado podría incluir la recepción pasiva de una señal de satélite y el uso de la inteligencia en la. Dado que un satélite podría costar 100,00,000. Dls hay usualmente un cargo por su uso. Los propietarios u operadores de un sistema de satélite pueden alquilar transponders para un uso largo de 24 horas al día, otros pueden estar disponibles por un corto termino (por horas)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

2.2.3 ¿QUÉ HACE EL SATÉLITE?

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La mayoría de los satélites de comunicaciones son repetidores activos. El equipo en el satélite recibe señales de una estación terrena y amplifica esas señales para la retransmisión para una o más estaciones terrestres. La Figura 2.2. muestra la relación entre las estaciones terrestres y el satélite. Esto incluye la señal para el satélite, llamado el enlace de subida y la señal que regresa hacia la tierra, llamado el enlace de bajada. El equipo de comunicaciones en el satélite incluye un número de transponders que amplifican las señales en ciertas bandas de frecuencia. La potencia de la señal recibida en el satélite de la estación terrestre es muy débil.



dónde la mayoría de la potencia es perdida en el camino hacia el satélite. Esto es, el satélite debe tener un medio de amplificación grande para la señal recibida y luego transmitirla a un nivel de potencia más alta a la tierra. Otra vez, la mayoría de esta nueva potencia es perdida en el camino hacia la tierra.

La estación de recepción terrestre debe recibir esta señal débil, amplificarla y obtener una señal que sea lo suficientemente clara para el destinatario.

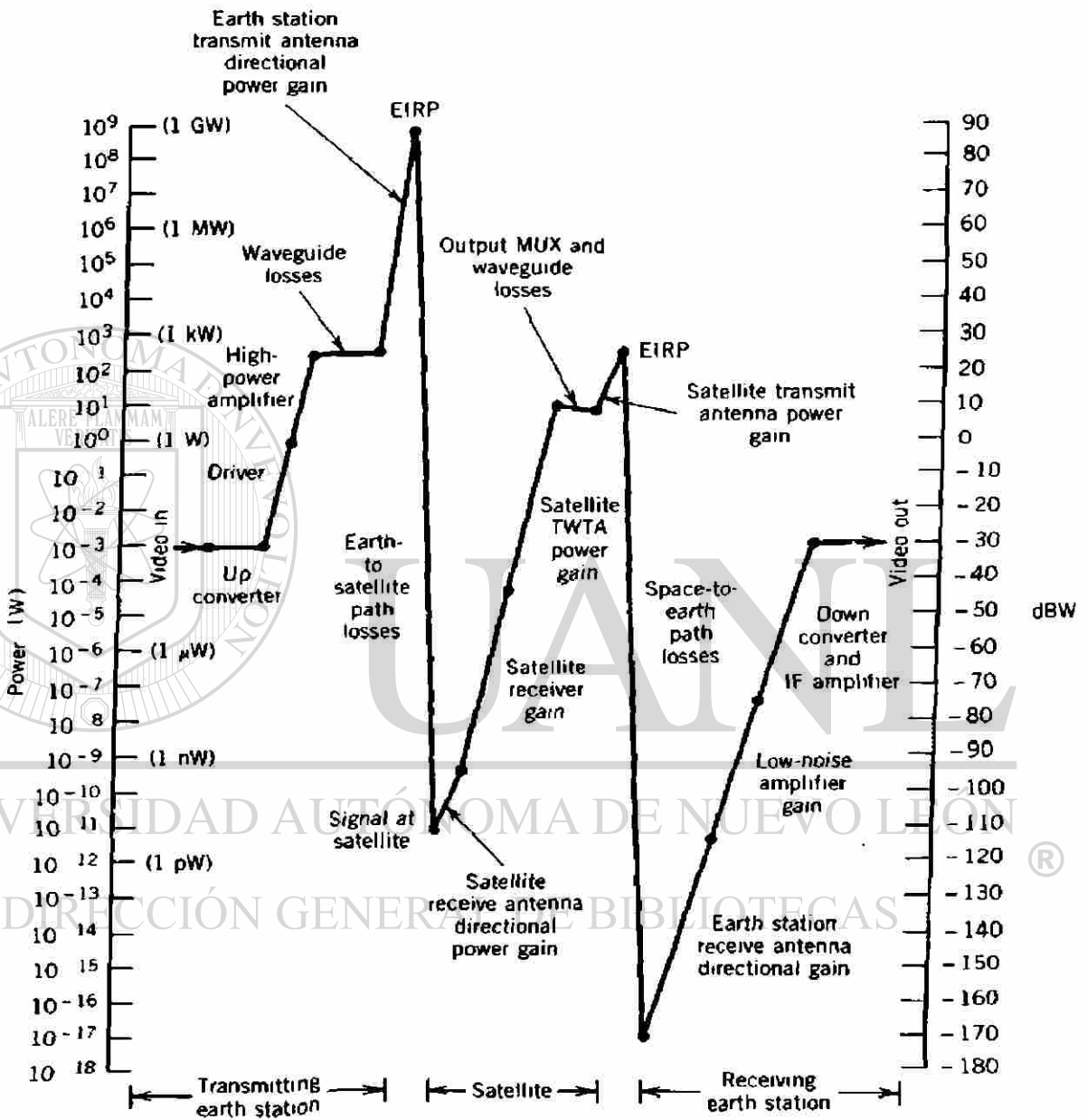
La mayoría de los satélites de comunicación contienen repetidoras que amplifican las señales recibidas. Los satélites pueden también demodular la señal recibida a banda base y después remodularla de varias maneras para la retransmisión hacia las estaciones de

recepción terrestres. Las técnicas presentadas aquí asumen simples transponder repetidores. Los cálculos de enlace de los satélites de comunicación asumen una señal de la estación terrestre hacia el satélite y regresarla hacia la estación terrestre. Sin embargo, los principios básicos pueden también ser aplicados en satélites conteniendo demoduladores y transponders remoduladores.

Un ejemplo de la potencia a través de un satélite de comunicaciones es mostrado en la figura 2.3. En este ejemplo el transmisor de la estación terrestre tiene casi 1000 W, pero solo 10^{-9} W es recibida por el satélite. El satélite amplifica esta señal hasta más de 10 W, pero la estación terrestre recibe únicamente 10^{-11} W. Este ejemplo indica la necesidad de algunas herramientas matemáticas especiales para manejar los cálculos que involucran ambos números, los grandes (potencia transmitida) y los muy pequeños (potencia recibida).

Como se sugirió arriba, el propósito de un satélite de comunicaciones es transmitir información de un emisor a un receptor. Para lograr esta tarea, la señal debe ser recibida en la estación terrestre con una fidelidad dada, tanta que el destinatario final pueda extraer la información que fue transmitida. Por consiguiente, como se discutió previamente es necesario calcular la potencia en varios puntos y establecer un cálculo de potencia de enlace para el sistema.

El cómputo del cálculo de enlace requiere familiaridad con los principios generales de radiación electromagnética.



Power levels in an INTELSAT satellite.

Figura. 2.3

El cálculo de enlace es generalmente compilado usando decibeles y notación logarítmica. Para familiarizarnos con estos cálculos, algunos ejemplos serán presentados.

Una multitud de factores influyen en los resultados del cálculo de enlace.

2.2.4 ¿CÓMO SE MIDE EL DESEMPEÑO DE UN SATÉLITE?

Ilustraremos los cálculos básicos para determinar la potencia recibida en una antena distante (recepción) cuando la potencia en la base de la antena en el transmisor es P_t (en watts). Asumamos primero que la potencia es transmitida igualmente en todas las direcciones. Esto es llamado una fuente isotrópica. Para visualizar esto, imagina un bulbo de luz deste llenando (sin reflector) enviando luz en todas direcciones.

Determinaremos cuanta luz cae dentro de una superficie de área A_e , localizada a una distancia S de la fuente de luz. Asumimos, que el área es perpendicular a los rayos de luz, de tal manera que la luz incidente es normal a la superficie. El rango de incisión S es la distancia entre la fuente (transmisor) y el área A_e (receptor). Como se muestra en la figura 2.4, una esfera puede ser imaginada con la fuente en el centro y un radio de S . La superficie total de la esfera es $4\pi S^2$. La potencia de transmisión P_t uniformemente distribuida sobre la superficie, ya que una fuente isotrópica es asumida. La iluminación (potencia por área) es constante, e igual a $P_t/4\pi S^2$. Una antena receptora interceptara

algo de esta potencia, proporcional a su área efectiva de A_e . La potencia recibida es:

$$C = \frac{P_t A_e}{4\pi S^2} \quad (\text{W}) \quad (2.1)$$

Esta potencia es denotada como C porque será después referida como potencia portadora. La W en paréntesis indica que el resultado esta en watts. Sabemos que agregando en el reflector el destello de luz y apuntando el destello de luz al receptor se incrementa la luz recibida. Igualmente, la estación terrestre y los transmisores del satélite de comunicación usan un reflector de antena para incrementar la potencia recibida. Este incremento es una cierta razón G_t , llamado la ganancia de la antena de transmisión. La potencia recibida puede ser entonces escrita:

$$C = \frac{P_t G_t A_e}{4\pi S^2} \quad (\text{W}) \quad (2.2)$$

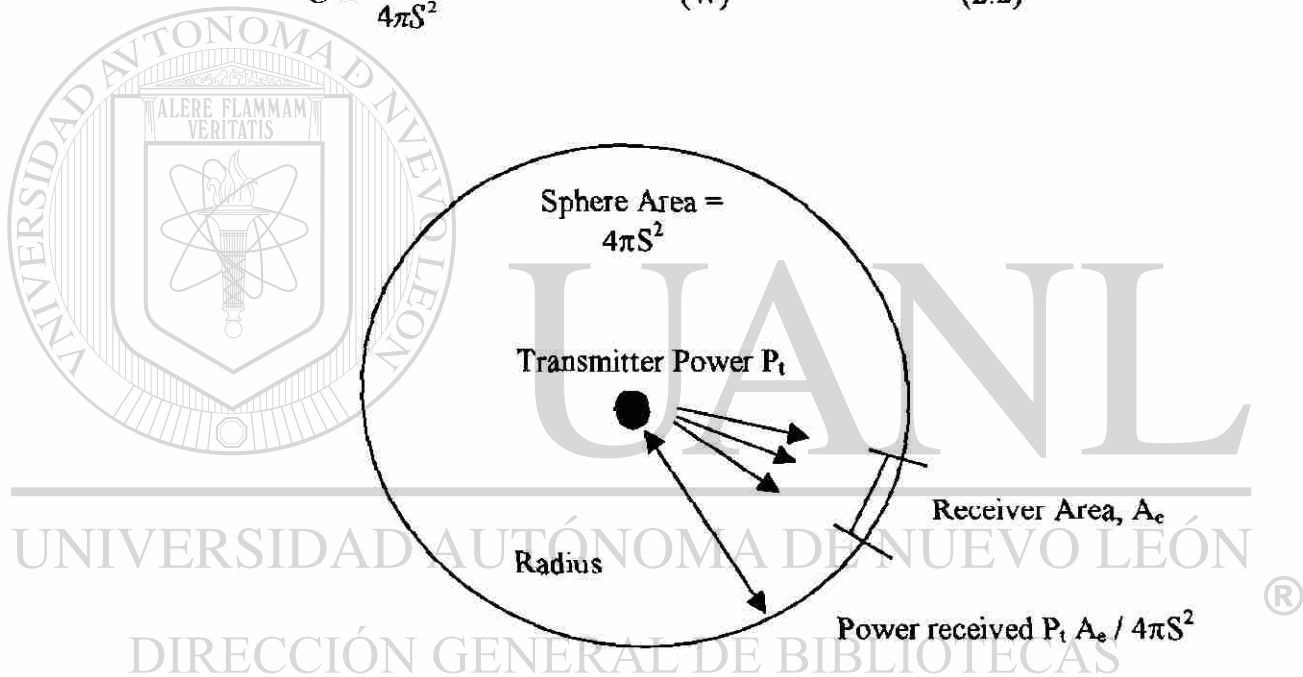


Figura 2.4

Si la antena receptora no es el 100% eficiente, el área efectiva A_e no es el área física actual.

La esencia de un calculo de enlace es mostrado en la ecuación anterior. Aun algunos individuos consideran los cálculos de enlace obscuro, misterioso y difícil de entender. Existen algunas razones para esto:

- 1.- Los cálculos son hechos usando una escala logarítmica, en decibeles, en lugar de números absolutos.
- 2.- El desempeño de la antena receptora es expresado como una ganancia de la antena G_r y no como un área A_e .
- 3.- El valor absoluto de la potencia portadora recibida C no es importante por si mismo, ya que la amplificación adicional siempre es posible. El verdadero desempeño es medido comparando la potencia recibida con cualquier ruido que podría estar presente.
- 4.- Muchos efectos pequeños, como la atenuación atmosférica, errores de seguimiento y patrones de antena, producen pérdidas adicionales. Estos son frecuentemente introducidos sin explicar de dónde llegan, qué son y por qué son incluidos.
- 5.- Un cálculo de enlace es frecuentemente presentado como una lista de números, sin indicación de adiciones, sustracciones o subtotales. El lector tratando de seguir la aritmética puede perderse. A veces aún el autor del cálculo de enlace se pierde!

2.3 PARÁMETROS EN UN CÁLCULO DE ENLACE

El desempeño de un satélite de comunicaciones es medido principalmente en un cálculo de enlace. Muchos factores influyen en este desempeño. Cada uno de estos factores es una entrada al cálculo de enlace o podría afectar el desempeño de otras maneras.

Un cálculo de enlace incluye dos cosas: el segmento del espacio (el satélite) y el segmento de tierra (la estación terrestre). El enlace hacia arriba incluye el transmisor de la estación terrestre y el receptor del satélite. El enlace hacia abajo incluye el transmisor del satélite y el receptor de la estación terrestre. Este tema es principalmente acerca del segmento del espacio, pero también describe cuidadosamente el transmisor de la estación terrena, receptor y antenas.

2.3.1 ORBITAS DEL SATÉLITE

Una entrada importante en el cálculo de enlace es la distancia entre el satélite y las estaciones terrestres. Esta distancia es usualmente llamada el rango de inclinación S . Para los satélites geoestacionarios esta distancia varía entre 35786 y 41680 km. El mayor efecto de distancia es mostrado en la ecuación (2.2).

La potencia de la señal recibida varía inversamente al cuadrado de la distancia. La gran distancia entre el satélite y las estaciones terrestres también produce un retardo de tiempo significativo tanto que el circuito telefónico de un satélite usual (de enlace hacia arriba y hacia abajo para cada dirección) tiene un retardo de más de medio segundo.

Cambios en la distancia pueden producir cambios de frecuencia, debido al efecto Doppler. En teoría un satélite geoestacionario es estacionario con respecto a la tierra, no hay cambio en la distancia. En la práctica hay frecuentemente oscilaciones diarias en el rango y velocidades relativas (promedio del rango) entre el satélite y la estación. Esto es especialmente verdadero en satélites que no tienen estaciones de observación norte - sur, esto es en satélites en los cuales el plano de la órbita está inclinado con respecto al plano ecuatorial.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La órbita afecta el desempeño del satélite de otras maneras. La transmisión de la señal a través de la atmósfera está afectada por la elevación. Este es el ángulo entre el enlace de radio frecuencia (R.F) y el plano horizontal. Para ángulos de baja elevación (satélites cerca del horizonte) la señal debe atravesar más atmósfera. Esto causa más pérdidas de transmisión y otros efectos.

2.3.2 RADIO FRECUENCIAS.

Una fuente básica disponible para los satélites de comunicaciones es el espectro de R.F. Las bandas de frecuencia son asignadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y sus comités. La ITU también asigna longitudes (ranura) en el arco geostacionario. Los factores técnicos que afectan la selección de bandas de frecuencia incluyen transmisión atmosférica, ganancia de la antena, el ancho radiado, y disponibilidad de equipo. El ITU también limita la iluminación (w/m^2) incidente en la superficie de la tierra.

Muchos satélites de comunicación usan banda C (6 y 4 GHz) y banda Ku (14 y 12 GHz). Estas son asignaciones del servicio de satélites fijos (FSS). Otras bandas son usadas para servicios de transmisión, servicios móviles y satélites militares, por ejemplo:

La limitación de frecuencias disponibles ha conducido la tecnología en diferentes caminos. Las frecuencias son reutilizadas por satélites múltiples, emisiones múltiples y polarización. Las frecuencias más altas no son tan ocupadas, y tienen más ancho de banda. Las técnicas de comprensión son utilizadas para tener más información dentro de un ancho de banda dado.

2.3.3. ANTENAS

Las antenas incrementan la potencia en una dirección seleccionada. La antena es un dispositivo pasivo, así que la potencia es reducida en otras direcciones. Las antenas principales usadas con los satélites de comunicación son antenas parabólicas. En una antena receptora, la potencia RF está enfocada por un reflector sobre un alimentador, y entonces va al receptor. En una antena transmisora, la potencia existe desde el alimentador a el reflector, el cual la envía en la dirección preferida. Una antena es un dispositivo recíproco, y las funciones de transmisión y recepción son similares.

La ganancia de la antena G es la razón de la potencia transmitida en la dirección preferida comparada contra aquél de un transmisor isotrópico. Las antenas de la estación terrena usualmente tienen un alimentador sencillo, desde que ellas enfocan en un simple satélite con una ganancia máxima. Las antenas del satélite pueden tener múltiples alimentadores para desarrollar un patrón de cobertura para muchas estaciones terrenas.

2.3.4 AMPLIFICADORES DE POTENCIA

La función del amplificador de potencia es incrementar la potencia de la señal para la transmisión hacia el espacio. En un satélite las restricciones sobre masa y disponibilidad de potencia DC (corriente directa) usualmente limita la potencia de transmisión a 10 de 100 W. En una estación terrena las restricciones son menos estrictas y una potencia de transmisión de 1000 W es más fácil de lograr.

Muchos amplificadores de potencia de los satélites son tubos de ondas viajeras (TWTs). Estos son tubos de vacío con un haz electrónico interactuando con una onda viajera de RF. Algunos satélites de comunicación también usan amplificadores de potencia en estado sólido más pequeños y ligeros (SSPAs). Los amplificadores de potencia disipan considerable calor. La disipación de este calor en el espacio es más difícil, debido a la falta de aire. Las estaciones terrestres frecuentemente tienen disponible más potencia de entrada y pueden usar klystrons TWTs.

2.3.5 PÉRDIDAS DE TRANSMISIÓN

La pérdida más grande en la potencia transmitida es debido a la gran distancia entre el satélite y la estación terrestre. En un cálculo de enlace la atenuación debido a la distancia es llamada pérdida de trayectoria de espacio libre L . Está basado sobre el cuadrado de la razón de la distancia S a la longitud de la onda λ . Matemáticamente,

$$L^* = \frac{(4\pi S)^2}{\lambda^2} \quad (\text{razón}) \quad (2.3)$$

La pérdida espacial L es un razón grande, usualmente medido en decibeles. En esta ecuación es un número absoluto, por eso está escrito con un asterisco. Normalmente la distancia es usualmente medida en Km, y la longitud de la onda en m. Entonces un factor de 1000 m/km será usado en ecuaciones siguientes.

Otras pérdidas en la potencia transmitida son mucho más pequeñas. Las pérdidas atmosféricas son usualmente pequeñas, pero aún significativas. Estas se incrementan para frecuencias más altas y con precipitación en el aire, especialmente tormentas tropicales. Las pérdidas debido a errores en la dirección de la antena (errores de seguimiento) pueden frecuentemente ser incluidos como pérdidas de transmisión.

2.3.6 TEMPERATURA DE RUIDO.

Una fuente de ruido natural es el ruido RF emitido del medio ambiente. Una antena del satélite recibiendo señales de una estación terrena también recibirá ruido RF de la tierra. La potencia de ruido es aproximadamente proporcional a la temperatura del objeto (la tierra), y esta temperatura es llamada la temperatura de ruido. Para la tierra esta temperatura puede estar alrededor de 270 K.

Normalmente una antena de la estación terrestre es apuntada al espacio y entonces esta tiene una temperatura de ruido baja. Otras fuentes de ruido predominan. La potencia de ruido puede tranquilamente ser igualada al valor de temperatura de ruido, aún cuando no haya objeto físico en aquella temperatura particular.

El sol tiene una temperatura muy alta, y pocas veces cada año es visto directamente detrás del satélite geoestacionario. Algunas veces la temperatura del ruido es tan alta que la comunicación es frecuentemente imposible. Sin embargo, la mayoría de los enlaces de satélites de comunicaciones sufren una breve "interferencia de estación solar" unas pocas veces al año.

2.4 SUBSISTEMAS DE UN SATÉLITE DE COMUNICACIONES.

La función de un satélite de comunicaciones es recibir una señal, amplificarla y retransmitirla. Esto es hecho por el subsistema de comunicaciones, en el cual incluye antenas, receptores y amplificadores. Otros subsistemas deben proveer potencia eléctrica, mantener la dirección de las antenas, controlar la temperatura, enviar telemetría, recibir comandos y proveer una estructura para el montaje de todo el equipo.

2.4.1 CONFIGURACIÓN DE LA NAVE ESPACIAL.

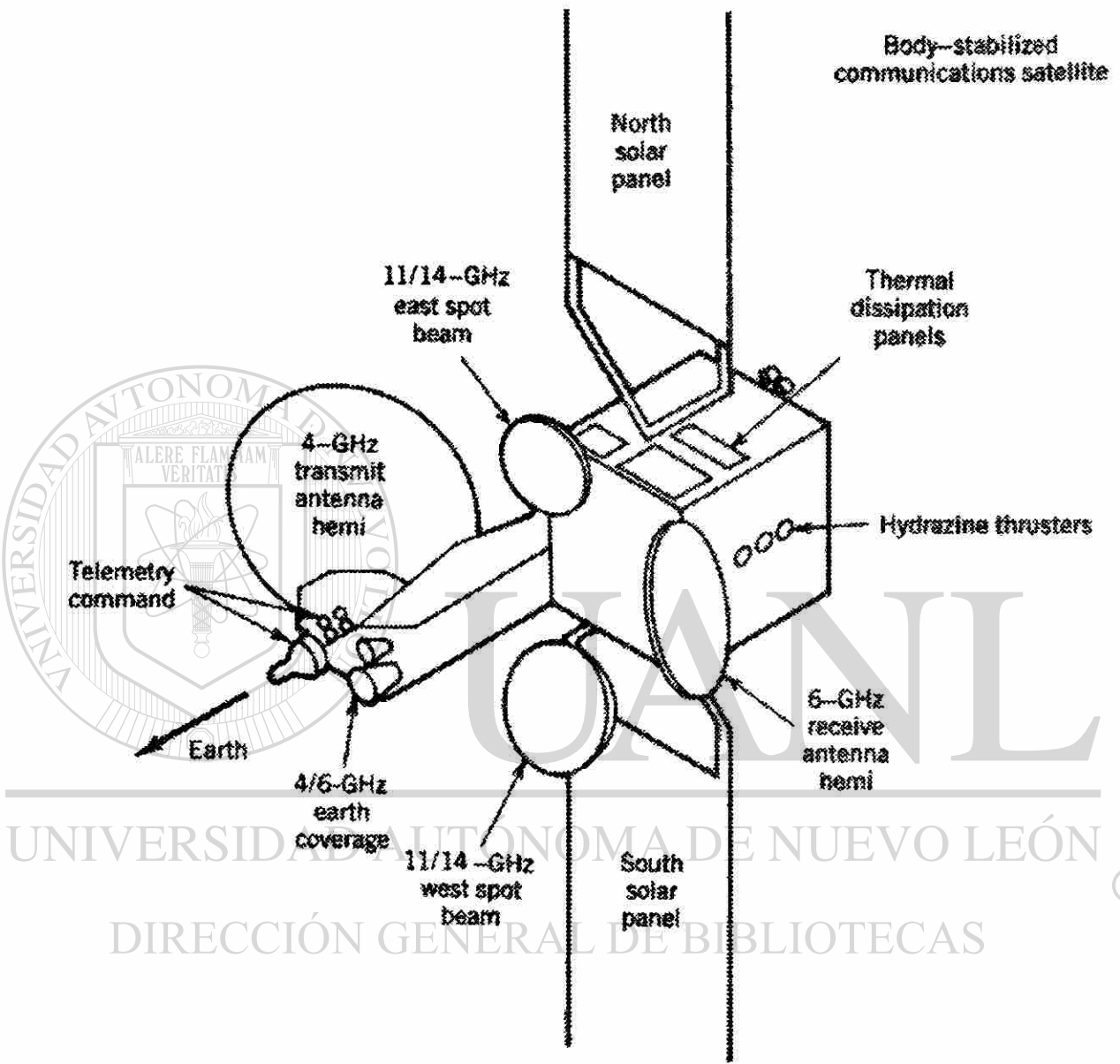
Muchos factores, no todos técnicos, son incluidos en la elección de la configuración del satélite, la configuración seleccionada afecta a muchos subsistemas de nave espacial. Las varias configuraciones de los satélites han sido construcción, lanzamiento y operación.

Las dos principales configuraciones de los satélites de comunicación son la estabilización del cuerpo y estabilización del giro. Los satélites del cuerpo estabilizado tienen una orientación fija con respecto a la tierra. Ellos giran una vez por día, como el satélite va alrededor de la tierra. Los satélites de cuerpo estabilizados, son simples en concepto pero pueden necesitar más hardware. Los satélites de cuerpo estabilizado pueden tener un impulso que hace girar siempre en una misma dirección o giros de reacción que rotan en cualquier sentido.

Un satélite de giro estabilizado tiene una parte significativa del satélite que gira sobre el orden de una revolución por segundo. Pequeños satélites de comunicación simple pueden tener cuerpos simples que giran alrededor del momento máximo del eje de inercia. Ellos pueden tener una antena omni o toroidal. Frecuentemente las antenas y subsistemas de comunicaciones son despunt, esto es, no giran. Muchos satélites de comunicaciones son "giradores dobles" y ratón alrededor de un momento mínimo de inercia.

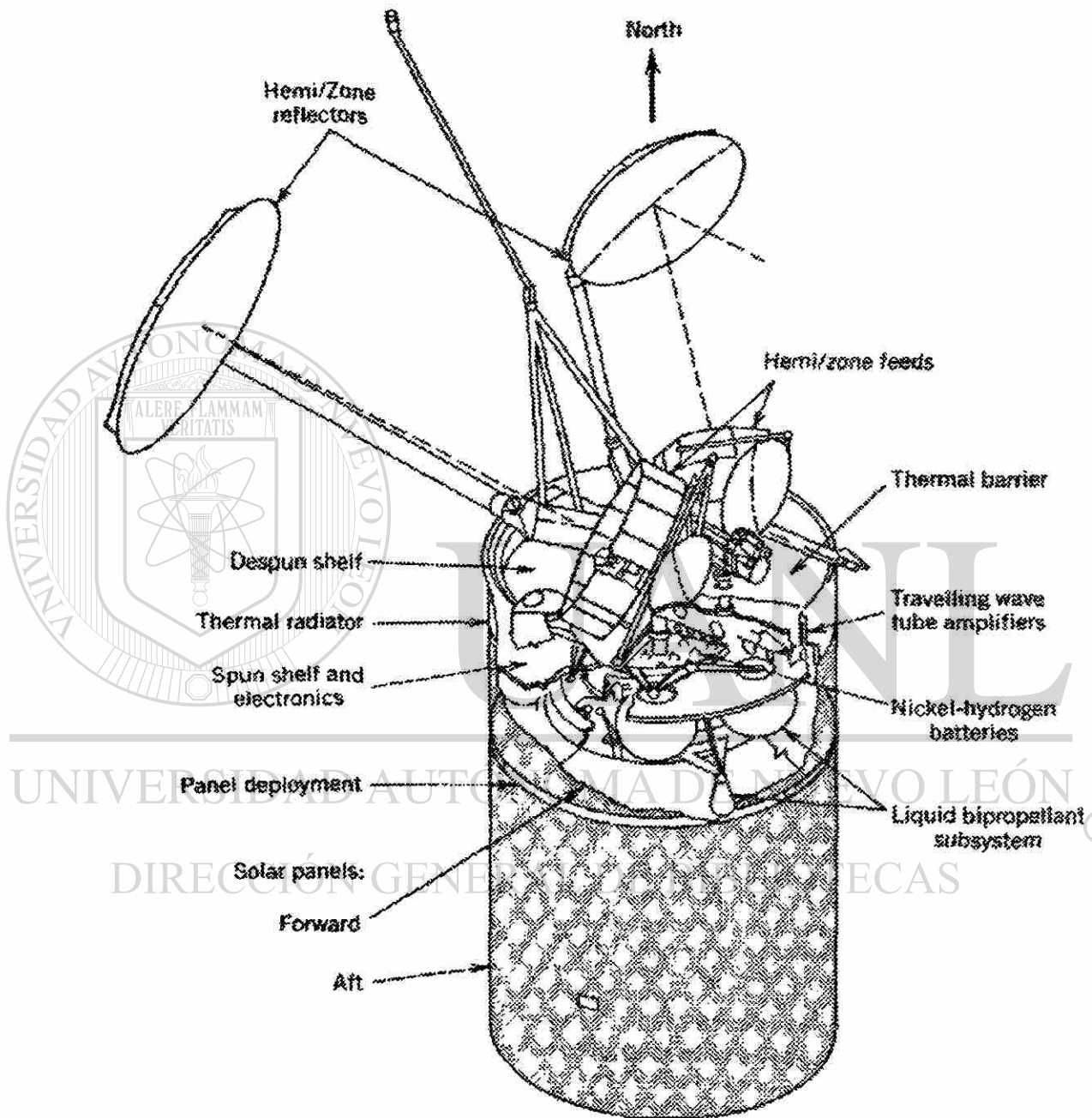
Un ejemplo de un satélite de comunicación de cuerpo estabilizado es mostrado en la figura 2.5. Las formaciones solares son usualmente paneles desplegados y giran alrededor de un eje norte-sur. Algunas antenas dan la cara a la tierra, con los platos grandes para los haz mas estrechos. Las amplificaciones de potencia son montadas de tal manera que el calor puede ser fácilmente disipado, usualmente en los paneles de enfrente norte y sur. Los impulsores son localizados para suministrar un empuje a lo largo de ambas direcciones este-oeste y norte-sur. El par de impulsores es usado para controlar la posición.

Un satélite de giro estabilizado es mostrado en la figura 2.6. el satélite es cilíndrico, con las celdas solares montadas en la parte de afuera del cilindro. El eje de rotación es un eje norte-sur. Mucha de la masa está en la parte giratoria, pero las antenas son mantenidas apuntando a la tierra. Toda la carga de comunicaciones esta usualmente sobre una repisa "despunt" que esta fijo con respecto a la tierra. La formación solar, baterías, tanques de gasolina e impulsores están en la parte giratoria. La potencia eléctrica y alambres de señal son conectados a la carga de comunicaciones a través de fundas anilladas. La telemetría y funciones de mando están divididas, ya que la nave espacial requiere ambas funciones.



Example of body-stabilized satellite.

Figura 2.5



Example of spinner satellite (Copyright, Thompson and Johnston, 1983. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Ltd.).

Figura 2.6.

2.4.2.- SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES.

La función de un satélite es recibir señales R.F. de la tierra, amplificarla y después transmitirla. Los componentes primarios de un satélite de comunicación son mostrados en la figura 2.7, los cuales indican como el subsistema de comunicaciones amplifica la señal y como el subsistema de comunicaciones esta apoyado por otros subsistemas. Los valores típicos de la potencia R.F. son dados.

La señal es recibida por una antena que consiste de un reflector y un alimentador. La señal recibida en la figura es 10^{-10} w. El receptor amplifica la señal a 10^{-4} w. También incluye un convertidor descendente, el cual cambia la frecuencia de 6 Ghz a 4 Ghz. En muchos satélites la señal va a través de interruptores, atenuadores variables y multiplexores. El amplificador de potencia incrementa la potencia de la señal substancialmente (por ejemplo, a 10 w). Finalmente la señal va a la antena de transmisión, y es radiada hacia la tierra.

Un diagrama de bloque simplificado de un subsistema de comunicaciones del INTELSAT VI es mostrado en la figura 2.8. Esta muestra los componentes con más detalle. La mayoría de los satélites no son tan grandes como lo es un INTELSAT VI, pero tienen muchas de estas características.

La función de las antenas receptoras y los receptores es amplificar la señal de entrada, con el menor ruido posible. La función de los multiplexores (MUX) y las interconexiones es distribuir, conectar y combinar las señales para los amplificadores y antenas. Los amplificadores de potencia mostrados como triángulos pequeños, generan la potencia para la transmisión. Estos pueden ser amplificadores de tubo de ondas viajeras (TWTA) o amplificadores de potencia de estado sólido (SSPA).

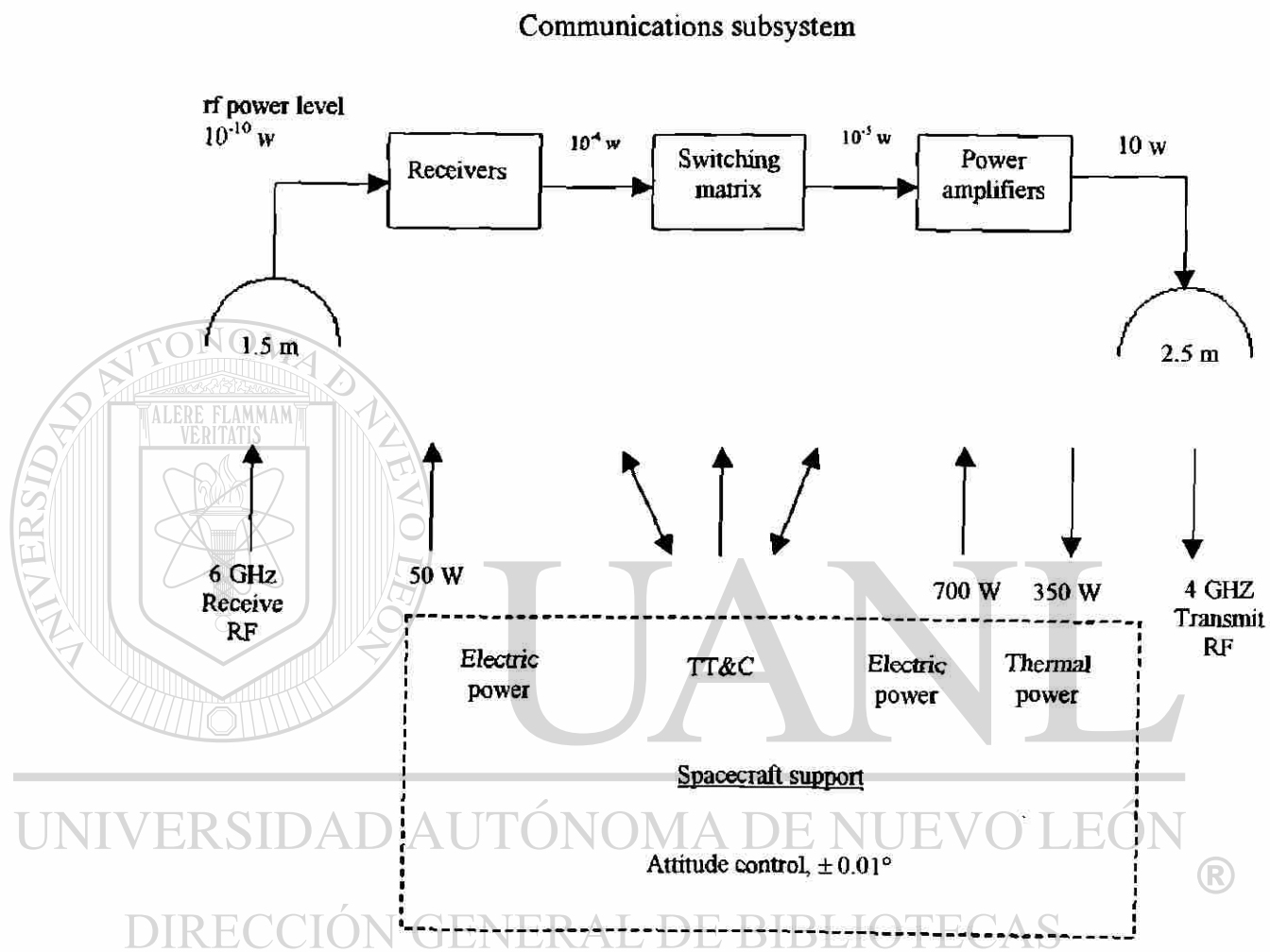
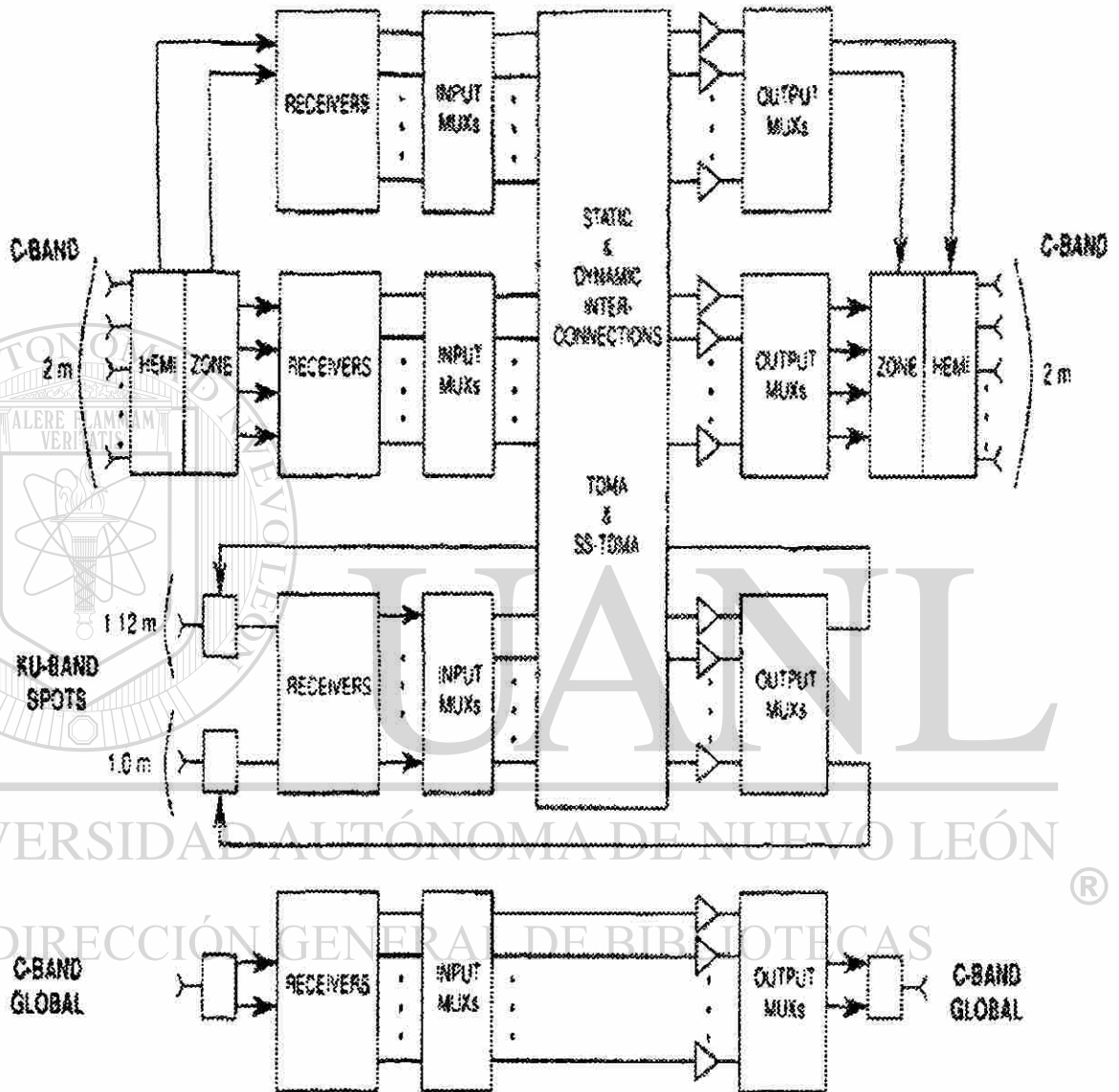


Figura 2.7



Main components of the INTELSAT VI communications subsystem (Gupta et al., 1991; reprinted by permission from COMSAT Tech. Rev.).

Figura 2.8.

2.4.3 TELEMETRÍA, SEGUIMIENTO, CONTROL Y MONITOREO (TTC & M)

El estado y las condiciones de varios subsistemas son transmitidos por el sistema de telemetría. Un sistema comando transmite las órdenes deseadas al satélite. El seguimiento es hecho por la antena de la estación terrena, y alineada por una señal enviada hacia arriba a través del mando de enlace y regresada hacia abajo por el transmisor de telemetría. La figura 2.9 es un diagrama funcional del subsistema TTC & M.

Un comando empieza en el centro de control del satélite, va hacia una estación terrestre, y después es transmitida al satélite. El receptor del comando en la nave espacial recibe la señal, la demodula y la procesa. El comando es decodificado, almacenado y verificado. La señal es distribuida hacia el lugar apropiado en la nave espacial, solo después que la señal es recibida.

Los comandos de la tierra controlan el estado del equipo a bordo del satélite, modos de operación, posición y orientación. Los comandos discretos usan señales que son pulsos de duración fija para poder prender o apagar diferentes componentes o cambiar los modos de operación. Las señales analógicas generan pulsos de longitud variada la cual cambia el equipo para especificar intervalos. Bloques de datos digitales pueden ser transmitidos a un satélite para reprogramar procesadores a bordo.

La telemetría en el lado derecho de la figura 2.9. Esta recoge datos de varios subsistemas, los procesa dentro de una forma deseada, modula la señal guía de RF y la transmite a la tierra. La telemetría colecta, formatea y transmite datos de varios tipos. Los datos digitales muestran la condición de apagado y encendido del equipo o la posición de varios interruptores. Muchos sensores checan el desempeño de los sistemas a bordo. Ellos miden temperatura, voltaje, corriente o presión. Las señales de los

sensores de posición y acelerómetros son transmitidos para su interpretación en la tierra. Algunos datos científicos y experimentales, tales como radiación, campo magnético, descargas eléctricas o movimiento del combustible líquido, pueden ser reunidos para auxiliar en el diseño de satélites de comunicación en el futuro.

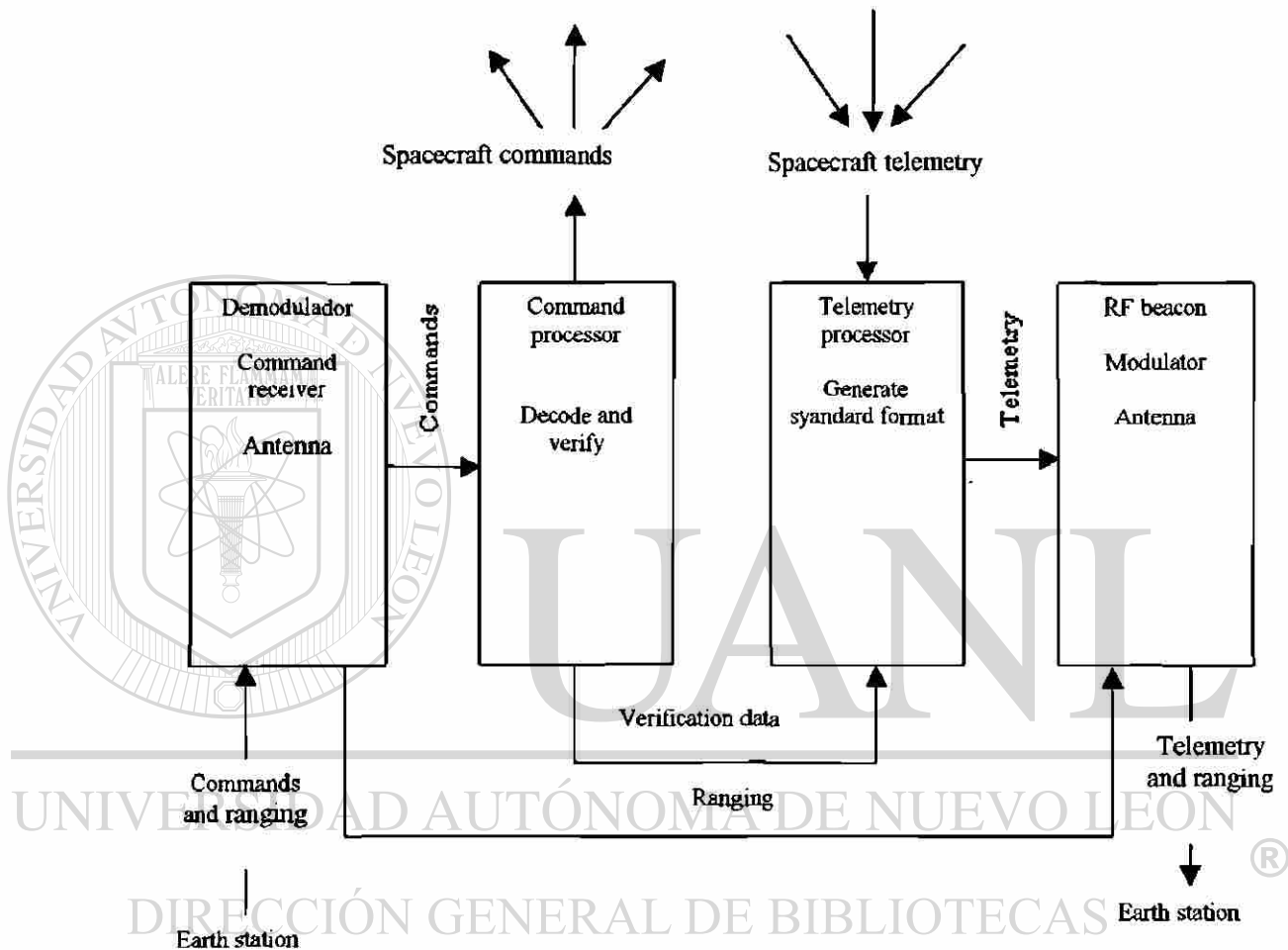


Figura 2.9.

Seguimiento (rastreo) y alineamiento son usados para determinar la posición del satélite en el espacio. Estos datos son usados para predecir el movimiento orbital futuro. Los impulsores son prendidos por un comando para controlar la posición de el satélite. Este es llamado estación de mantenimiento. El alineamiento mide la distancia (inclinación de rango) de una estación terrestre a el satélite, como una función de tiempo. La distancia es medida cronometrando una señal de la estación terrena a el

esatélite y el regreso a la tierra. El ángulo de seguimiento mide el azimuth y el ángulo de elevación de la estación terrena a el satélite. Esto requiere sólo una guía de RF en el satélite.

2.4.4 POTENCIA ELÉCTRICA

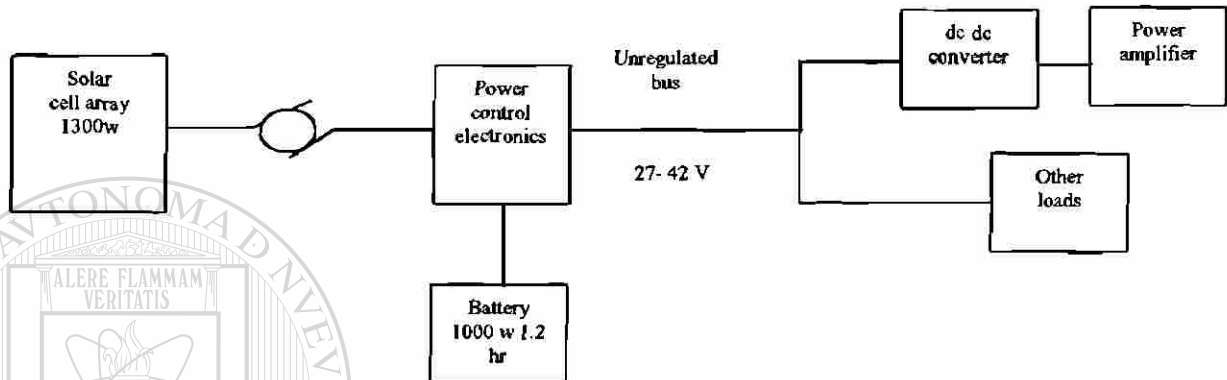


Figura 2.10

El control electrónico conecta las celdas solares y las baterías a varias cargas. Este control regula el bus de voltaje, y la carga y descarga de las baterías. Los Satélites diferentes tienen grados variables de la regulación del bus de voltaje. Mucha de la potencia en un satélite de comunicaciones es para los amplificadores de potencia. Es más eficiente hacer la regulación del voltaje para los amplificadores de potencia en el convertidor dc, que en el control electrónico.

2.4.5 CONTROL DE POSICIÓN

Las antenas requieren un sistema de control de posición que las mantendrá apuntando a la tierra, frecuentemente dentro de 0.1° ó 0.01° . la figura 2.11 es un diagrama de bloques de un sistema de control de posición. Un sensor detecta algún error de posición,

y lo corrige cambiando la velocidad (o eje de dirección) de el giro de rotación. Si los giros han alcanzado un límite, prendiendo los impulsores cambia el momento angular total.

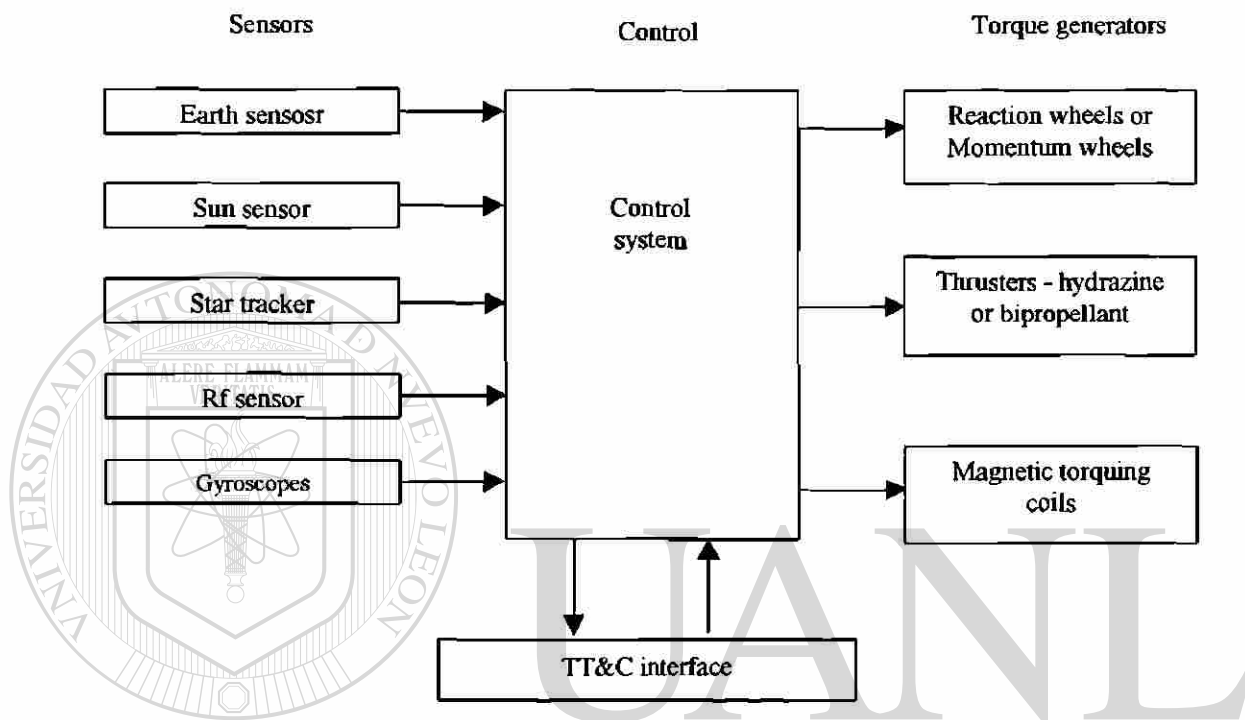


Figura 2.11.

Las especificaciones de desempeño de un sistema de control de posición son determinadas por el momento de torsión de perturbaciones y la exactitud de la posición requerida. Las mayores perturbaciones sobre un satélite geoestacionario son torques debido a la presión de la radiación solar y la desalineación de los impulsores. Varios sensores son usados: sensores solares son luz y exactitud, pero obviamente inútiles durante un eclipse. Sensores de tierra miden directamente la dirección para posición. Star trackers son muy precisos, pero son pesados y raramente usados en comunicaciones comerciales. Sensores RF miden la dirección de una guía de RF en la tierra. Los giroscopios son precisos para duraciones cortas pero necesitan correcciones periódicas por desplazamiento.

Un sistema de control toma la información de los sensores y suministra comandos (órdenes) para los generadores de torque. Los giros pueden cambiar la orientación del satélite, pero no cambian el momento angular total. Los impulsores están siempre disponibles para genera un torque externo deseado. Para ahorrar combustible, bobinas magnéticas torqueadoras, alerones solares, pueden suministrar un débil, pero estable torque.

2.4.6 ESTRUCTURA

La estructura del satélite está diseñada para suministrar soporte mecánico para todas las partes del satélite, para suministrar una alineación precisa donde se necesite, y ayudar en el control térmico. La estructura está determinada por un número de coacciones. El vehículo lanzado limita la forma y el tamaño de la estructura, así como la masa total. El sistema de control de posición frecuentemente limita la distribución de la masa. La temperatura es afectada por las propiedades de las superficie y por la conducción térmica. La antena, sensor e impulsores alineados requieren firmeza en la estructura o partes de él.

La estructura debe mantener las cargas durante la prueba ambiental, manejo terrestre, lanzamiento hacia la órbita baja, disparos de perigeo y apogeo algunos despliegues de antenas o formaciones solares (celdas). Durante la operación en órbita las cargas son mínimas, pero los requerimientos de alineación son más rigurosos.

Una suma de masas de un satélite de comunicaciones es mostrado en la tabla 2.1. La masa total de otros satélites de comunicaciones es diferente, pero la proporción para los diferentes subsistemas es similar.

| | Mass (kg) |
|--|-------------|
| Communications | 233 |
| Attitude determination and control | 73 |
| Electrical power | 141 |
| Propulsion | 39 |
| Telemetry, command, and ranging | 26 |
| Structure/thermal | 184 |
| Electrical and mechanical integration | 69 |
| Apogee motor nonconsumables | 61 |
| Total dry spacecraft (BOL) ^a | 826 |
| Fuel/pressurant | 187 |
| Total spacecraft (BOL) ^a | 1013 |
| Adapter | 21 |
| Apogee motor consumables | 871 |
| Mass margin | 24 |
| Total in transfer orbita | 1929 |

Tabla 2.1

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En suma, en los subsistemas de comunicaciones, las partes importantes de la masa total incluyen el combustible, la estructura y la potencia eléctrica.

Muchos satélites de comunicación incluyen los impulsores y combustible para circular la órbita en el apogeo (motor enciende en el apogeo).

Muchas fuerzas actúan sobre el satélite durante el lanzamiento. Al empezar, el ruido acústico es alto. El aire transmite el ruido acústico desde los motores del cohete a través de la estructura aerodinámica, y en el satélite. Como va disminuyendo la masa del

vehículo al despegue, la aceleración aumenta a varias veces la gravedad. Un satélite de 1000 Kg entonces pesa muchos miles de Kilogramos. La vibración de muchas frecuencias es transmitida directa al soporte de la nave espacial, a los motores del cohete. Aparatos pirotécnicos, usados para separar varias etapas e iniciar despliegues, envía pequeñas descargas directas a la estructura.

Una estructura de satélite es mostrada en la figura 2.12. Las superficies soportan el equipo de comunicaciones, tanques de combustible, baterías y así sucesivamente. Una estructura fuerte es necesitada entre las cargas y la interface del vehículo lanzado. La estructura del bus básica en la figura es rectangular, con una estructura de antena separada que tiene los alimentadores RF y los reflectores. Los alimentadores RF están en posición fija, pero los reflectores se despliegan después del lanzamiento. Las formaciones solares consisten en paneles que son plegados juntos para el lanzamiento y desplegados después del lanzamiento.

2.4.7 CONTROL TÉRMICO

No hay aire en una órbita geoestacionaria. El promedio de la temperatura del satélite es determinada por la energía solar absorbida, la disipación eléctrica interna Q , la radiación térmica en el espacio. Estos dependen de las propiedades de la superficie del satélite y su forma.

El balance entre la potencia absorbida y la potencia radiada es mostrada en la figura 2.13. La potencia solar de entrada es igual al producto de la absorción de la superficie α , el área proyectada a , y la iluminación solar S_c (promedio = 1370 W/m^2). La potencia radiada de salida es igual al producto de la emisividad ϵ , la superficie total de área A , la constante Stefan - Boltzmann ($\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), y la cuarta potencia de la temperatura absoluta T .

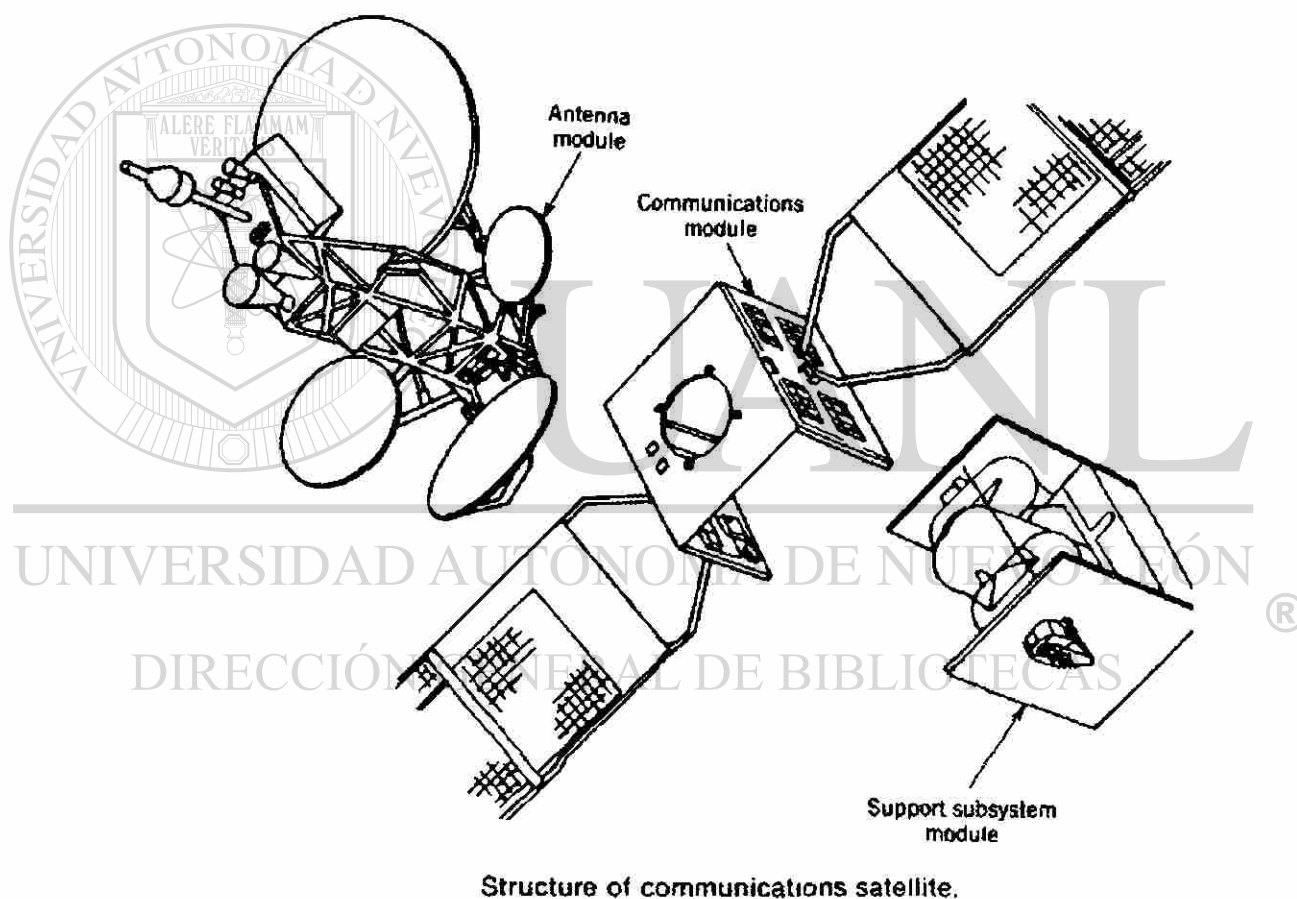


Figura 2.12

En promedio, la potencia solar de entrada más la disipación eléctrica Q deben ser igual a la potencia radiada a la salida. El promedio de la temperatura de un satélite T es entonces:

$$\sigma T^4 = \frac{\alpha a}{\varepsilon A} S_c + \frac{Q}{\varepsilon A} \quad (2.5)$$

La temperatura depende de la razón de la absorción a emisividad α/ε y la razón del área proyectada a la superficie total a/A . Ambos pueden variar por una orden de magnitud. La primera es del orden de la unidad, y la segunda promedia 0.25.

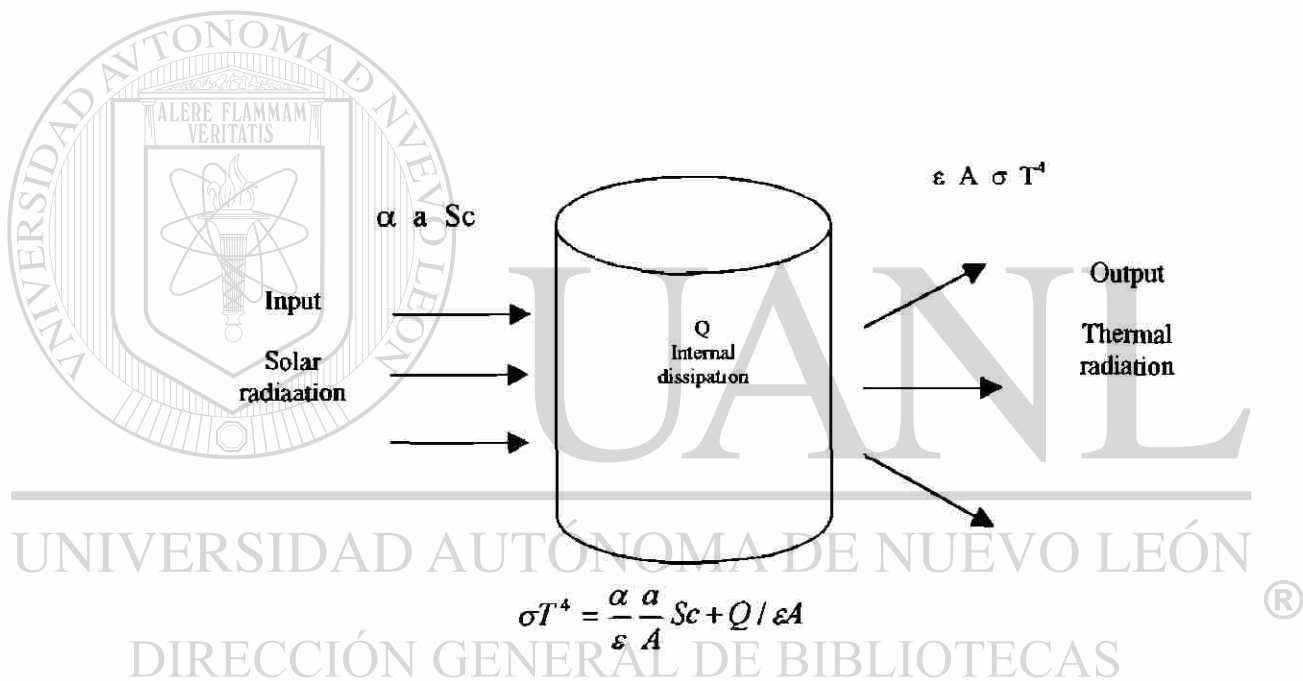


Figura 2.13.

Para controlar la temperatura promedio, las propiedades térmicas (emisividad térmica y absorción a la luz solar) de las diferentes superficies son especificadas cuidadosamente. La temperatura de las diferentes partes internas de un satélite puede ser controlada cambiando el acoplamiento térmico y usando calentadores eléctricos.

Algunas de las más importantes tareas térmicas en un satélite de comunicaciones son mantener las baterías dentro de los límites angostos de temperatura, mantener la bomba de combustible sin congelarse y disipar la gran cantidad de calor generado por los amplificadores de potencia.

2.4.8 SEGURIDAD

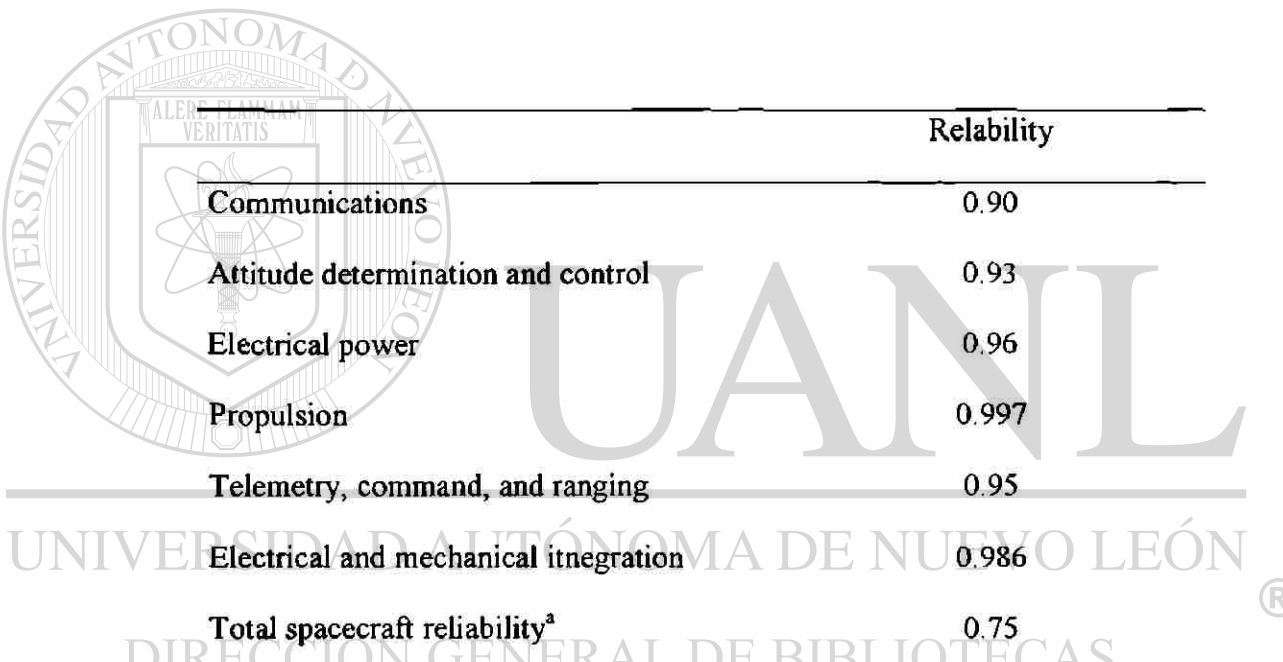
Desde que las reparaciones ordinarias que no pueden ser hechas después que un satélite es lanzado dentro de la órbita geoestacionaria, la alta seguridad es esencial. Técnicamente, la seguridad es la probabilidad de que no ocurra ninguna falla en un evento dado, o en un intervalo de tiempo de operación dado.

Primero, hay una probabilidad de un lanzamiento exitoso, desde el punto de vista de un usuario, la seguridad del lanzamiento incluye el alcance exitoso de la órbita geoestacionaria y el despliegue de algunas formaciones solares necesarios y los reflectores de la antena. Una seguridad del lanzamiento de 0.75 es frecuentemente usado en el diseño inicial del sistema. Unos pocos vehículos de lanzamiento excelentes, como el Atlas Centaur, pueden alcanzar una seguridad de 0.85, pero otros han sido menos exitosos.

La seguridad del satélite es la probabilidad que, después de un lanzamiento y despliegue exitoso, el satélite completará su misión. La tabla 2.2 muestra las seguridades calculadas para 7 años para un satélite específico. Hay una probabilidad separada que cada subsistema trabajara exitosamente por 7 años. Cada subsistema debe trabajar, así, de esta manera la seguridad total de la nave espacial, R_s , es el producto de las seguridades individuales R_i :

$$R_s = R_1 R_2 R_3 R_4 \dots R_n \quad (2.6)$$

Para "n" subsistemas diferentes. En la tabla el producto de las seguridades del subsistema individual es 0.75. Muchas partes del satélite tienen unidades de repuesto, así de esta manera si una parte falla, los repuestos pueden ser usados. Esto es llamado redundancia. El número de componentes sin redundancia es minimizado, ya que una falla terminaría la misión. Estas son llamados puntos simples de fallas. Los logros de la alta seguridad requiere buen diseño, cuidadosa selección de partes, control de calidad en integración, y una variedad de pruebas para detectar debilidades antes del lanzamiento.



| | Reliability |
|---|-------------|
| Communications | 0.90 |
| Attitude determination and control | 0.93 |
| Electrical power | 0.96 |
| Propulsion | 0.997 |
| Telemetry, command, and ranging | 0.95 |
| Electrical and mechanical integration | 0.986 |
| Total spacecraft reliability^a | 0.75 |

Tabla 2.2

CAPÍTULO 3

CALCULO DEL ENLACE SATELITAL

3.1 INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO DE ENLACES

Un satélite de comunicaciones es un relevo para las comunicaciones entre dos o más estaciones terrestres. Este relevo tienen ciertos recursos, específicamente potencia y ancho de banda. La ingeniería de comunicaciones debe usar éstos recursos eficiente y económicamente.

Usualmente, el consumidor de un sistema de comunicaciones establece el tipo y calidad de las comunicaciones requeridas. La ingeniería de comunicaciones transforma estos requerimientos en el mejor tipo de señal de comunicaciones que convenga a los enlaces satelitales y la calidad de señal requerida. La calidad puede ser expresada en diversas formas. Una manera conveniente es estipular el radio de la señal portadora a densidad de potencia de ruido. Esta cantidad es independiente del ancho de banda y puede ser derivada de los parámetros del enlace satelital. La calidad de señal también puede ser expresada como la relación señal o ruido requerida en el ancho de banda ocupada por la señal.

Para satisfacer los requerimientos establecidos en el enlace de comunicaciones, el ingeniero de comunicaciones prepara un cálculo de enlace de potencia, usualmente llamado un cálculo de enlace. Este cálculo asigna los recursos satelitales disponibles para adaptar los parámetros de la transmisión y recepción de las estaciones terrestres. El cálculo de enlace ayuda en el diseño del mejor enlace. Esta es una herramienta para

ajustar la estación terrestre y los parámetros satelitales para satisfacer los requerimientos en la forma más económica.

El cálculo del enlace inicia con el transmisor de potencia. Esta potencia es trazada a través de varias amplificaciones y pérdidas, lo cual determina la fuerza y calidad de la señal recibida. Los cálculos de enlace son construidos para ambos servicios, analógico y digital.

3.2 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.

La hoja de cálculo, ampliamente disponible en computadoras personales, puede ser usada para construir un cálculo de enlace en formato tubular. Dadas una serie de ecuaciones que conectan diferentes partes del cálculo, la hoja de cálculo trabaja bien. Si el software de hoja de cálculo y el equipo de cómputo están disponibles, el estudiante está estimulado a usarlos para escribir un simple cálculo de enlace. Detalles adicionales y una exactitud más grandes pueden ser logradas después. Un estudiante no debería usar una hoja de cálculo con ecuaciones hechas por alguien más. Los usuarios de hojas de cálculo para cálculo de enlace, deberán entenderlas y no usarlas como “cajas negras “

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

A pesar de que los cálculos de enlace sofisticados son frecuentemente programados en computadoras, es posible aún hacerlos con lápiz, papel y una calculadora de bolsillo (con funciones logarítmicas). Partes de un cálculo de enlace pueden ser calculadas mentalmente. Muchas veces un cambio afecta la relación en una parte de un cálculo de enlace, y el resultado final es cambiado por la misma relación

Otra alternativa es usar una regla deslizadora desarrollada específicamente para cálculos de enlace. Las relaciones en un cálculo de enlace son fácilmente manejadas por una regla deslizadora. Esta puede proporcionar un chequeo rápido independiente del

cálculo de enlace, y es una manera destacada para identificar errores en una hoja de cálculo elaborada. Es también una excelente oportunidad para el estudiante, de forma que se sensibilice en el efecto de un cambio en un parámetro. Es fácil ver como un resultado es cambiado y en que dirección la respuesta varía.

La regla deslizadora no requiere baterías o potencia de línea. Esta es muy usada en una variedad de situaciones por ejemplo, para checar las respuestas en un examen. Con cuidado, la regla deslizadora puede proveer una exactitud de unos pocos décimos de un decibel. Esto es suficientemente exacto para hacer cálculos severos y para checar cálculos más exactos.

3.3 CÁLCULO EN DECIBELES.

Los decibeles fueron primeramente usados en mediciones de la intensidad de sonido. La unidad Bel fue llamada así en honor a Alexander Graham Bell. La parte más baja de la escala fue establecida como la intensidad mínima que puede ser escuchada (aproximadamente 1 Pw/m^2). Diez veces el mínimo es 1 Bel, 100 veces el mínimo es 2 Bels y así sucesivamente. Entonces, la escala es logarítmica. Un decibel es simplemente una décima parte de un Bel ($10 \text{ dB} = 1 \text{ Bel}$), donde DECI significa una décima, como en el sistema métrico.

Por consiguiente, diez veces el mínimo es 10 dB, 100 veces es 20 dB, y 1000 veces es 30 dB. La abreviación estándar de decibel es dB, con una letra minúscula d y una B mayúscula.

Los cálculos de enlace son también efectuados usando una escala logarítmica, y las cantidades son expresadas en decibeles.

Las razones principales para esto son las siguiente:

- 1.- La notación decibel simplifica el manejo de razones en los cálculos, convirtiendo la multiplicación de números en adición de sus logaritmos. La adición es más fácil que la multiplicación para mucha gente.
- 2.- La notación en decibeles hace fácil escribir y entender razones muy pequeñas y muy grandes. Las razones usadas en cálculos de enlaces pueden variar de 10^{-12} a 10^6 .

La manipulación de decibeles debe ser dominada para calcular cálculos de enlace y para llegar a ser eficiente en el manejo de los parámetros involucrados en el diseño de sistemas de comunicaciones satelitales.

Cualquier relación R puede ser expresada en forma decibel como:

$$R = 10 \log_{10} R \text{ (dB)}$$

Donde \log_{10} es el logaritmo base 10 (3.1)

Con una calculadora o software de computadora, el logaritmo común base 10 $\text{Log} ()$ debe ser usado en lugar del logaritmo natural base e , $\text{LN} ()$. En la ecuación, un asterisco es usado para mostrar el valor absoluto R^* ; la carencia de un asterisco denota la razón en decibeles R .

Algunas veces las cantidades absolutas son necesarias, y la cantidad en decibeles debe ser reconvertida a su valor absoluto. Resolviendo la ecuación (3.1) para R^* resulta:

$$R^* = 10^{R/10} \quad (\text{razón}) \quad (3.2)$$

La ecuación muestra que la razón en decibeles R de 10, 20, 30, y 40 dB son equivalentes al valor absoluto R^* de 10, 100, 1000, y 10 000 respectivamente.

Muchas calculadoras de bolsillo y computadoras tienen una función antilogaritmo (ALOG, 10^X o $10^{\wedge}X$); la ecuación (3.2) es el equivalente a.

$$R^* = \text{ALOG}_{10} (R/10) \quad (\text{razón}) \quad (3.3)$$

Una expresión similar es usada para cantidades absolutas que no son razones. Por ejemplo, una potencia P en watts puede ser expresada en decibeles como decibel watts (dBw). Una potencia de referencia de $P_1 = 1\text{w}$ es usada.

Entonces la potencia P en dBw es

$$P_{\text{dBw}} = 10 \log_{10} (P/P_1) \quad (\text{dBw}) \quad (3.4)$$

o simplemente

$$P_{\text{dBw}} = 10 \log_{10} P \quad (3.5)$$

Por ejemplo, si la potencia P es 1000 W ó 10^3 W, entonces ésta es 30 dBw. El subíndice dBw es usado en una ecuación para mostrar que la potencia P está en dBw, en lugar de Watts.

Muchas otras cantidades usan notación similar. Un nivel de iluminación medida en W/m^2 , puede ser expresada en dBW/m^2 . Ciertas cantidades, tales como la ganancia de la antena G , son usualmente expresados en notación decibel. Otras cantidades, tales como la potencia transmisora, son usualmente expresadas, en unidades absolutas.

La tabla 3.1 lista los parámetros usados, los cuales son usualmente expresados en decibeles. Cuando uno de éstos parámetros es usado en una ecuación, un asterisco mostrará que es una cantidad absoluta (no decibeles). Cuando éstos parámetros están en una ecuación sin un asterisco, ellos están en decibeles. La unidad es también escrita a la derecha de la ecuación.

3.3.1 VALORES NUMÉRICOS.

Para muchos individuos que trabajan con cálculos de enlace, convertir a decibeles [puede] llegar a ser automático. Cada potencia de 10 es equivalente a 10 dB. Un factor de 2 (un incremento en...), es equivalente a una ganancia de 3dB (dado $10^{0.3} \approx 2$). Si un factor de 2 es 3dB, entonces un factor de 4 (2×2) es 6 dB, y un factor de 8 ($2 \times 2 \times 2$) es 9 dB. Un factor de 5 es 10 dividido por 2, esto es equivalente a $10 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 7 \text{ dB}$. Dado que un factor de 3 es aproximadamente equivalente a 4.8 dB (actualmente 4.7712), un factor de 6 (2×3) es entonces 3 dB más, o 7.8 dB. Dado que una potencia de 10 es equivalente a 10 dB, estos enteros simples pueden ser escalados hacia arriba o abajo por factores de 10. Por ejemplo, un factor de 2000 es 33 dB, y un factor de 0.2 ó $\frac{1}{5}$ es -7 dB. Estas relaciones son ilustradas en la tabla 3.2 para razones en un intervalo de 0.01 a 100. Para cada razón en la primera columna los decibeles pueden ser calculados usando la ecuación 3.1. En la tercera columna, el “exponente” muestra la misma razón como

una potencia de 10. Note que el decibel es igual a 10 veces el exponente en la tercera columna.

| Symbol | Units | Page" | Meaning |
|-----------|--------------------|-------|---|
| C | dBW | 33 | Carrier power received |
| C/kT | dBHz | 42 | Carrier-to thermal noise with k |
| C/T | DBW/K | 41 | Carrier-to-thermal noise |
| C/N | dB | 43 | Carrier-to-noise in bandwidth B |
| E_b/N_o | dB | 230 | Energy per bit/noise density |
| E | dB μ V/m | 189 | Electric field strength |
| EIRP | dBW | 36 | Equivalent isotropically radiated power |
| G | dBi | 35 | Gain of an antenna ^b |
| G/T_s | DBi/K | 40 | Figure of merit |
| k | DBW/Hz K | 42 | Boltzmann's constant |
| L | dB | 38 | Loss |
| PFD | DBW/m ² | 184 | Power flux density |
| Q | DBW/K | 30 | System quality factor (EIRP + G/T_s) |
| S/N | dB | 115 | Signal-to-noise ratio |
| W | DBW/m ² | 37 | Illumination level |

Tabla 3.1

El uso de decibeles en cálculos de enlace se muestra en la tabla 3.3. La segunda columna lista ya sea la potencia en w ó la razón a través de la cual la potencia cambia.

La potencia inicial de 1000 w es primero multiplicada por 0.5 (una pérdida de transmisión) produciendo 500 w. Esto es entonces multiplicado por 10,000, y finalmente por 10^{-20} y por 100 como la antena de la estación terrestre enfoca la potencia hacia el satélite. El transmisor de 1000 w ve el satélite como un transmisor isotrópico de 5 000 000 W. Pero la distancia al satélite es tan grande que la potencia transmitida es multiplicada por 10^{-20} produciendo 5×10^{-14} w.

| Ratio | Decibel | Exponent | Ratio | Decibel | Exponent |
|-------|---------|--------------|-------|---------|-------------|
| 0.01 | -20.0 | $10^{-2.0}$ | 1 | 0.0 | $10^{0.0}$ |
| 0.02 | -17.0 | $10^{-1.7}$ | 2 | 3.0 | $10^{0.3}$ |
| 0.03 | -15.2 | $10^{-1.52}$ | 3 | 4.8 | $10^{0.48}$ |
| 0.04 | -14.0 | $10^{-1.4}$ | 4 | 6.0 | $10^{0.6}$ |
| 0.05 | -13.0 | $10^{-1.3}$ | 5 | 7.0 | $10^{0.7}$ |
| 0.06 | -12.2 | $10^{-1.22}$ | 6 | 7.8 | $10^{0.78}$ |
| 0.07 | -11.5 | $10^{-1.15}$ | 7 | 8.5 | $10^{0.85}$ |
| 0.08 | -11.0 | $10^{-1.1}$ | 8 | 9.0 | $10^{0.9}$ |
| 0.09 | -10.5 | $10^{-1.05}$ | 9 | 9.5 | $10^{0.95}$ |
| 0.1 | -10.0 | $10^{-1.0}$ | 10 | 10.0 | $10^{1.0}$ |
| 0.2 | -7.0 | $10^{-0.7}$ | 20 | 13.0 | $10^{1.3}$ |
| 0.3 | -5.2 | $10^{-0.52}$ | 30 | 14.8 | $10^{1.48}$ |
| 0.4 | -4.0 | $10^{-0.4}$ | 40 | 16.0 | $10^{1.6}$ |
| 0.5 | -3.0 | $10^{-0.3}$ | 50 | 17.0 | $10^{1.7}$ |
| 0.6 | -2.2 | $10^{-0.22}$ | 60 | 17.8 | $10^{1.78}$ |
| 0.7 | -1.5 | $10^{-0.15}$ | 70 | 18.5 | $10^{1.85}$ |
| 0.8 | -1.0 | $10^{-0.1}$ | 80 | 19.0 | $10^{1.9}$ |
| 0.9 | -0.5 | $10^{-0.05}$ | 90 | 19.5 | $10^{1.95}$ |
| 1.0 | 0.0 | $10^{-0.0}$ | 100 | 20.0 | $10^{2.0}$ |

Tabla 3.2

Esta potencia es amplificada por la antena del satélite (multiplicada por 100) para producir 5×10^{-12} w.

La siguiente columna muestra los mismos números en notación decibel. Estos son calculados tomando el logaritmo base 10 y multiplicándolo por 10. En esta columna, los decibeles son añadidos en lugar de multiplicados, para producir los totales que aparecen abajo de cada línea. La última columna, etiquetada como "Exponente" contiene los números absolutos en formato exponencial. Note que los decibeles son meramente el exponente multiplicado por 10.

En la columna "Absoluto" los número son multiplicados (o divididos). En la columna "Decibel" los números son añadidos (o substraídos). Usando notación decibel los números son más fáciles de escribir, y mucho más fácil de calcular.

| | Absolute | Decibel | Exponent |
|-----------------------|------------------------|----------|----------------|
| Transmitter power | 1000 W | 30 dBW | 10^3 W |
| Waveguide loss | 0.5 | -3 dBW | $10^{-0.3}$ |
| Antenna input power | 500 W | 27 dBW | $10^{2.7}$ W |
| Transmit antenna gain | 10,000 | 40 dBi | 10^4 |
| EIRP | 5,000,000 W | 67 dBW | $10^{6.7}$ W |
| Path loss in space | 0.00000000000000000001 | -200 | 10^{-20} |
| Receive antenna gain | 100 | 20 dBi | 10^2 |
| Power received | 0.00000000000005 W | -113 dBW | $10^{-11.3}$ W |

Tabla 3.3

3.3.2 ECUACIONES DE DECIBELES.

En las ecuación en decibeles todos los términos deben estar en decibeles. Esto es particularmente importante porque frecuentemente usamos una notación corta para las ecuaciones en decibeles. Como un simple ejemplo, supongamos que G_A y G_B ,

representan las ganancias (razón de potencia de salida a potencia de entrada) de los amplificadores A y B. En terminas absolutos, la ganancia total G_{TOT} de los dos amplificadores en serie, es el producto de las dos ganancias individuales.

$$G_{TOT}^* = G_A^* \cdot G_B^* \quad (3.6)$$

Los asteriscos indican que estos valores no están en decibeles, pues son sólo simples razones. Para cambiar esto a una ecuación en decibeles, el logaritmo de cada lado es tomado, y el resultado multiplicado por 10. Resultado (esto que en) el logaritmo de un producto es igual a la suma de los logaritmos; esto es,

$$\text{Log}_{10} AB = \text{Log}_{10} A + \text{Log}_{10} B \quad (3.7)$$

Entonces la ecuación 2.6 llega a ser

$$10 \log_{10} G_{TOT}^* = 10 \log_{10} G_A^* + 10 \log_{10} G_B^* \quad (\text{dB}) \quad (3.8)$$

El “dB” en paréntesis muestra que el resultado es la ganancia en decibeles (dB)

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En notación decibel la ganancia total G_{TOT} de los dos amplificadores en serie es escrita como:

$$G_{TOT} = G_A + G_B \quad (\text{dB}) \quad (3.9)$$

Cada termino en una ecuación en decibeles está en decibeles, y en la ecuación de arriba cada ganancia de la antena G , que representa el término completo $10 \log_{10} G^*$, mostrado en la ecuación 3.8. La notación corta claramente ahorra mucha escritura y con (dB) en el lado derecho, no debería causar confusión. Si las dos ganancias (A y B) fueran 13 dB y 16 dB, entonces la ganancia combinada debería ser 29 dB. Las ganancias absolutas deberían ser 20,40 y 800, respectivamente ($20 \times 40 = 800$).

3.3.3. MANIPULACIONES ALGEBRAICAS.

Como una ecuación más compleja, para la potencia portadora recibida C . La potencia de la señal recibida es etiquetada como potencia portadora C , para diferenciarla de la potencia de ruido, la cual es también recibida.

La ecuación es:

$$C^* = \frac{PG_T * Ae}{4\pi S^2} \quad (W) \quad (3.10)$$

Donde P es la potencia transmitida, G_T es la ganancia de la antena transmisora, Ae es el área efectiva de la antena receptora, y S la distancia entre el transmisor y el receptor. Los asteriscos sobre la potencia portadora recibida C y la ganancia de la antena G muestran que estos son valores absolutos en ésta ocasión, a pesar de que normalmente son escritas en decibeles. Las otras cantidades son también números absolutos, pero son usualmente escritas como tal. Las cantidades C y P están en watts, y la ganancia de la antena G_T es una razón. Las cantidades Ae y S^2 deben estar en las mismas unidades, tales como m^2

Para cambiar la ecuación (3.10) a una ecuación en decibeles, se toma el logaritmo de cada lado, y el resultado multiplicado por 10:

$$10\log_{10} C^* = 10\log_{10} P + 10\log_{10} G_T^* + 10\log_{10} A_e - 10\log_{10} S^2 - 10\log_{10} 4\pi \text{ (dBw)} \quad (3.11)$$

La potencia portadora C y la ganancia de la antena G_T son usualmente expresados en decibeles. La ecuación de arriba se escribirá como:

$$C = 10\log_{10} P + G_T + 10\log_{10} A_e - 20\log_{10} S - 10\log_{10} 4\pi \text{ (dBw)} \quad (3.12)$$

Dado que el logaritmo del cuadrado de un número es dos veces el logaritmo del número, $10\log_{10} S^2$ es igual a $20\log_{10} S$. Las cantidades P , G_T , A_e y S son variables en el cálculo. El último término $10\log_{10} 4\pi$ es fijo y puede ser escrito como 11 dB.

Las unidades usadas para los términos a la derecha de la ecuación 3.12 están en dBw, dBi, dBm², dBkm², y dB respectivamente. En particular el área de la antena A_e está en m² y el rango S está en Km. Pero las ecuaciones (3.10), (3.11) y (3.12) están basadas en unidades compatibles, ya sea ambas A_e y S en metros o ambos en kilómetros. Para lograr una mezcla de metros y kilómetros, la ecuación (3.10) podría ser escrita con $(1000 \text{ m/km})^2$ en el denominador, pero esto no es usualmente hecho. Los valores numéricos y unidades deberían ser introducidos en la ecuación (3.10) seguida por 1000 m/km para establecer unidades compatibles.

En las ecuaciones con decibeles para cálculos de enlace, las unidades de conversión son usualmente incluidas en la ecuación. Cuando esto es hecho la ecuación en decibeles llega a ser.

$$C = 10 \log_{10} P + G_T + 10 \log_{10} A_e - 20 \log_{10} S - 71 \text{ (dBw)} \quad (3.13)$$

En esta ecuación el término 71 incluye el término $(1000\text{m/km})^2$ de 60 dB; esto es, $10 \log_{10} [4\pi (1000 \text{ m/km})^2] = 71 \text{ dBm}^2/\text{km}^2$. De tal manera que en esta ecuación el área de la antena A_e está en m^2 , y la distancia S está en km.

Para revisar las unidades en la ecuación 3.13, las unidades de cada término en el lado derecho deberán ser escritas como:

$$\text{dBw} + \text{dB} + \text{dBm}^2 - \text{dBkm}^2 - \text{dBm}^2/\text{km}^2 (?) \quad (3.14)$$

El signo de interrogación muestra que las unidades están siendo chequeadas. La potencia P está en W, así el primer término está en dBw. El área A_e está en m^2 , así el tercer término está en dBm^2 . La distancia S está en km, pero dado que el coeficiente es 20, la distancia es cuadrada y el término está en dBkm^2 . El último término, dBm^2/km^2 , puede ser escrito como $\text{dBm}^2 - \text{dBkm}^2$. Checando las dimensiones, note que todos los términos deben estar en decibeles. Los términos en dBm^2 y dBkm^2 se cancelan. Los términos con solo dB son eliminados. El único término que permanece es dBw. Esto checa con C en el lado izquierdo, la cual está en dBw, como muestra la ecuación (3.13)

3.4 CONCEPTOS EN UN CÁLCULO DE ENLACE.

Un cálculo de enlace preciso incluye muchos cálculos detallados.

El estudiante deberá primero entender los principios básicos de un cálculo de enlace para evitar el llegar a confundirse en los detalles. Para lograr esto, un número de

parámetros deberán ser entendidos. Estos son listados abajo, y explicados en las secciones que siguen.

- Potencia transmitida a la antena P en (w)
- Ganancia de la antena G , comparada con un radiador isotrópico (dBi)
- Potencia radiada equivalente isotrópicamente EIRP (dBw)
- Nivel de iluminación W en la recepción (dBw/m²)
- Pérdidas en la trayectoria de espacio libre L (dB)
- Sistema de temperatura de ruido T_s (k)
- Figura de mérito para los sistemas de recepción G/T_s (dBi/k)
- Razón de la portadora a ruido térmico C/T (dBw/k)
- Razón de la portadora a densidad de ruido C/N_0 (dBHz)
- Razón de la portadora a ruido C/N (dB)

Todas estas son parámetros importantes para las comunicaciones satelitales. Una vez que son entendidas, el estudiante puede comprender los recursos básicos y el desarrollo del sistema, y aprender a ejecutar cálculos detallados del sistema.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Las ecuaciones en éste capítulo no incluyen pérdidas drásticas que deben ser incluidas en detalle en cálculos precisos.

3.4.1 POTENCIA TRANSMITIDA P

El inicio de la transmisión RF a través del espacio, y el primer número en un cálculo de enlace es la potencia transmitida. La potencia transmitida es frecuentemente ajustada

para obtener el desarrollo deseado. Para los satélites la potencia transmitida es frecuentemente limitada por la potencia de disponible de la celda solar. Muchos transponders satelitales están en el intervalo de 10 a 200 w. La estación terrestre transmite en el intervalo de 1 a 10 000 w.

La potencia transmitida P es usualmente especificado en W , y no en dBw . En las ecuaciones con decibeles el termino para el transmisor es entonces desplegado como:

$$P_{dBw} = 10 \log_{10} P \quad (dBw) \quad (3.15)$$

Donde P es el valor absoluto en W y P_{dBw} está en dBw . Aquí puede haber algunas pérdidas entre la salida del transmisor y el alimentador de la antena. Si las pérdidas son significativas, la potencia del transmisor es medida en la base de la entrada en la antena. Este es un punto práctico para hacer mediciones. Las pérdidas antes de este punto pueden se deducidas de la potencia del transmisor original.

3.4.2 GANANCIA DE LA ANTENA G .

El propósito de una antena transmisora es enfocar la potencia RF en la antena receptora. Su eficacia es medida como la ganancia de la antena y es:

$$G^* = \frac{\text{Potencia transmitida con la antena hacia el receptor}}{\text{Potencia transmitida sin la antena (isotrópica)}} \quad (\text{razón}) \quad (3.16)$$

Esta es una razón que referencia a una antena isotrópica ideal.

La ganancia de la antena es usualmente expresada como dBi. La i en dBi indica que la razón se refiere a un radiador isotrópico. (Una ganancia podría referirse a una antena dipolo como dBd, pero esto no se hace en comunicaciones satelitales). Cuando las unidades son combinadas en una ecuación, la unidad dBi es la misma que dB. La i en dBi no es una unidad física y no se considera en un cálculo. Es usada únicamente para la ganancia de la antena G y la razón G/T_s ($^{dBi}/K$).

La ganancia de la antena G de un reflector parabólico es:

$$G^* = \frac{4\pi\eta A}{\lambda^2} \quad (\text{razón}) \quad (3.17)$$

Donde A , es el área física del reflector, η es la eficiencia de la antena (una fracción menor que 1) y λ es la longitud de onda. El intervalo típico de la eficiencia de la antena está entre 0.4 y 0.8 y una aproximación común es 0.55. Para antenas circulares con un diámetro D , el área A es igual a $\pi D^2/4$. La longitud de onda es igual a la velocidad de la luz C dividida por la frecuencia f . De tal manera que la ganancia de la antena puede ser escrita como:

$$G^* = \eta (\pi D f / c)^2 \quad (\text{razón}) \quad (3.18)$$

Para cálculos, la ganancia de la antena G es usualmente expresada en decibeles. Tomando el logaritmo de ambos lados y multiplicando por 10, la ganancia de la antena puede ser escrita como:

$$G = 20 \log_{10} D + 20 \log_{10} f + 10 \log_{10} \eta + 20.4 \text{ (dBi)} \quad (3.19)$$

Donde D es el diámetro en m y f es la frecuencia en Ghz. La eficiencia de la antena η es expresada como un decimal, tal como 0.55. La constante $20.4 \text{ dB/m}^2 \text{ Ghz}^2$ es igual a $20 \log_{10} (\pi/c)$. La velocidad de la luz c es 0.299792458 m/ns . Las dimensiones de c son inusuales, pero apropiadas si f está en Ghz y D está en m.

La ganancia de la antena se incrementa linealmente con el área de la antena. También se incrementa para frecuencias altas (longitud de onda pequeñas). Para un área dada, una antena tendrá una ganancia más alta en banda K (14/11 Ghz) que en banda c (6/4 GHz).

La ganancia de la antena es definida por el pico de la antena radiante. Las antenas de los satélites pueden transmitir a varios receptores, y la ganancia de la antena variara ligeramente, dependiendo de la localización del receptor. Si la antena no es apuntada directamente hacia el receptor, tendrá una pérdida fuera de eje.

Las antenas típicas de las estaciones terrestres tienen ganancias alrededor de pocos decibeles, para uso en carros y camiones, 60dBi, para comunicaciones internacionales la antena usada es grande. Las ganancias de la antena en los satélites no son grandes y están usualmente en el rango de 14a 40dBi.

3.4.3 POTENCIA RADIADA EQUIVALENTE ISOTRÓPICAMENTE EIRP.

La antena transmisora enfoca la potencia RF hacia el receptor. El producto de la potencia transmitida P y la ganancia de la antena G_T es

$$\text{EIRP}^* = P G_T^* \text{ (W)} \quad (3.20)$$

Donde G_T es la razón de la ganancia de la antena transmisora. El término ampliamente usado EIRP es colocado para definir la potencia radiada equivalente isotrópicamente. La antena incrementa la potencia recibida por una cierta razón, y el receptor lo “ve” como un transmisor más poderosa. La ecuación de arriba es usualmente escrita en decibeles como:

$$\text{EIRP} = 10 \log_{10} P + G_T \quad (\text{dBw}) \quad (3.21)$$

La potencia P está en W , la ganancia G_T está en dB y el producto EIRP está en dBw .

En la ecuación (3.21), el primer término a la derecha está escrito en notación larga, mostrando la función log y el segundo término está escrito en notación corta. La razón para esta inconsistencia es que la potencia transmitida está normalmente dada en W y la ganancia de la antena es virtualmente siempre dada en dB .

Como un ejemplo, supongamos que la potencia P es $50 W$ y la ganancia de la antena G_T es $26 dB$. La potencia es primeramente convertida a $17 dBw$, la cual puede entonces ser sumada a los $26 dB$ de la ganancia de la antena. El resultado es un EIRP de $43 dBw$. Esto es equivalente a $20\,000 w$, como puede ser verificado usando la ecuación 3.2. la respuesta puede ser verificada encontrando que una ganancia de $26 dB$ a una razón de 400 (Ecuación 3.4.) multiplicando $50w$ por esta razón dará $20\,000w$

Las ecuaciones en decibeles siempre tienen los logaritmos implícitos.

La ecuación 3.21 actualmente significa.

$$10 \log_{10} \text{EIRP}^* = \log_{10} P + 10 \log_{10} G_T^* \quad (\text{dBw}) \quad (3.22)$$

pero no es usualmente escrita de esta forma.

Los niveles típicos de EIRP están en el intervalo de 0 a 90 dBw para estaciones terrestres y 20 a 60 dBw para satélites.

3.4.4. NIVEL DE ILUMINACIÓN W

El nivel de iluminación W es la potencia recibida por unidades de área, o la potencia recibida por una antena ideal (eficiencia=1) con un área de 1 metro cuadrado ($A=1m^2$).

Si el transmisor fuera isotrópico, esto es, radiando igualmente en todas direcciones, entonces la iluminación en un intervalo inclinado de S debería ser $P/4\pi s^2$. Con una ganancia de la antena de G_T , el nivel de iluminación W en el receptor será incrementado por esta razón, y es:

$$W^* = \frac{PG_T}{4\pi S^2} \quad (w/m^2) \quad (3.23)$$

Donde S es la distancia del transmisor al receptor. Si la distancia está en m, entonces la iluminación W está en w/m^2 . El producto $P \cdot G_T^*$ es igual a EIRP, como se discutió arriba.

La ecuación puede ser escrita en forma decibel tomando el logaritmo de ambos lados, y multiplicando por 10. Entonces el nivel de iluminación W es:

$$W = EIRP - 20 \log_{10} S - 71 \quad (dBW/m^2) \quad (3.24)$$

Donde EIRP está en dBW, la distancia S entre transmisor y receptor está en km y el nivel de iluminación W está en dBW/m². La constante 71.0 dBm²/km² es igual a $10 \log_{10} [4\pi (1000\text{m}/\text{km})^2]$. La combinación de $(-20 \log_{10} S - 71.0)$ se mueve en el intervalo de -162 dB/m² en el punto subsatélite a -163.3 dB/m² en el límite de alcance. Para satélites geoestacionarios el nivel de iluminación en el satélite varia de -162 a -152 dBW/m², y la iluminación de la tierra por el satélite varia de -142 a -102 dBW/m²

3.4.5 PÉRDIDAS DE TRAYECTORIA EN EL ESPACIO LIBRE L

La pérdida de trayectoria en el espacio libre es un concepto importante en los cálculos de enlace. Es una función de distancia, pero usando la longitud de onda es expresado como una razón (en dB). La pérdida de trayectoria en el espacio libre no es la única pérdida de potencia recibida atribuible a la distancia entre el transmisor y el receptor. Otra pérdida de trayectoria es debido a pérdidas atmosféricas. Estas pérdidas adicionales, especialmente aquellas causadas por la lluvia serán tratadas posteriormente.

La potencia de la portadora recibida es igual a W veces el área efectiva de la antena receptora. Multiplicando la ecuación (3.23) por el área efectiva ηA dará la potencia portadora recibida C.

$$C^* = \frac{EIRP * \eta A}{4\pi S^2} \quad (W) \quad (3.25)$$

Donde EIRP es la potencia radiada equivalente isotrópicamente ($P \times G_T^*$), η es la eficiencia de la antena, A es el área de cruce seccional de la antena y S es la distancia entre el transmisor y el receptor. En la ecuación de arriba A y S² deben estar en las mismas unidades.

Como se vio en la sección 3.3.2 el desempeño de la antena transmisora es medido por una ganancia de la antena G_T . El desempeño de la antena receptora es proporcional a su área efectiva ηA . Sin embargo las antenas son dispositivos reciprocamente pasivos. Una antena puede ser usada ya sea para la transmisión y para la recepción. En cálculos de enlace el desempeño de cualquier antena es medido por su ganancia. La ganancia de la antena G fue dado ya en ecuación 3.17 como:

$$G^* = \frac{4\pi\eta A}{\lambda^2} \quad (\text{razón}) \quad (3.26)$$

Donde λ es la longitud de onda en metros. Resolviendo esta ecuación para el área efectiva ηA y sustituyendo esto en la ecuación (3.25) obtenemos

$$C^* = EIRP^* \frac{\lambda^2}{(4\pi S)^2} Gr^* \quad (w) \quad (3.27)$$

La potencia portadora recibida C es un producto de tres factores.

- ❖ El EIRP determinado por la potencia y la ganancia de la antena del transmisor-
- ❖ La ganancia de la antena receptora determinada por el receptor final del enlace
- ❖ El factor medio consistente en el resto del enlace, el cual es una función de la longitud de onda λ y la distancia S .

El recíproco de la mitad de la ecuación (3.27) es llamada la pérdida de la trayectoria en el espacio libre L .

$$L^* = \frac{(4\pi S)^2}{\lambda^2} \quad (\text{razón}) \quad (3.28)$$

Donde la distancia S y la longitud de onda λ deben estar en unidades compatibles. La pérdida de la trayectoria L es una razón grande, sin dimensiones.

La potencia portadora recibida C puede ser escrita como:

$EIRP * Gr / L^*$. Tomando el logaritmo en ambos lados y multiplicando por 10 nos da, en notación decibel.

$$C = EIRP - L + Gr \quad (\text{dBW}) \quad (3.29)$$

La potencia recibida C y $EIRP$ están en dBW, mientras que la pérdida de trayectoria L y la ganancia de la antena receptora Gr son razones en dB y dBi respectivamente. El ingeniero de comunicaciones habla de una pérdida de trayectoria de 196 dB como una cantidad positiva. Cuando es usada en cálculos de enlace, como vemos en la ecuación (3.29), esta cantidad positiva es sustraída

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La pérdida de trayectoria en el espacio libre L es definida en la ecuación (3.28). Es conveniente expresar la pérdida de trayectoria como una función de distancia S y frecuencia f en lugar de longitud de onda. La longitud de onda λ es igual a la velocidad de la luz C dividida por la frecuencia f en GHz ($\lambda = C/f$). Por consiguiente usando las unidades decibel, la ecuación (3.28) puede ser escrita.

$$L = 20 \log_{10} S + 20 \log_{10} f + 92.45 \text{ (dB)} \quad (3.30)$$

Donde el intervalo S está en kilómetros y la frecuencia f en GHz.

La constante es $10 \log_{10} (4\pi/c)^2 = 92.45 \text{ dB/km}^2 \cdot \text{GHz}^2$, donde C es $0.000299792 \text{ km GHz}$, o km/ns . A pesar de que la velocidad de la luz C podría ser escrito en unidades más convencionales ($C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), se necesitarían factores de conversión de tal manera que la distancia S y la frecuencia f estuvieran en km y GHz respectivamente.

Para satélites geoestacionarios la distancia S entre la estación terrestre y el satélite es una función de ubicación de la estación terrestre. La distancia mínima es $35,788 \text{ Km}$ para un satélite directamente encima (máxima elevación). Esto ocurre para una estación terrestre en el ecuador de la longitud del satélite. La máxima distancia es $41,679 \text{ km}$ para una estación terrestre, en el borde de la tierra. En este caso el satélite esta en la elevación mínima cerca del horizonte. Los valores típicos de las pérdidas de trayectoria son dados en la tabla 3.4 para varias frecuencias.

3.4.6 TEMPERATURA DE RUIDO TS

La potencia portadora recibida absoluta C es importante solamente cuando se compara al ruido presente en el sistema. Cada uno de los varios enlaces involucrado en un servicio satelital añaden ruido. El conjunto, fin a fin o razón de la portadora a ruido del sistema (C/N) es la composición de cada uno de estos enlaces.

| Free Space Path Losses* | | | |
|-------------------------|------------|-------------|------------|
| Uplink | | Downlink | |
| f_u (GHz) | L_u (dB) | f_d (GHz) | L_d (dB) |
| 1.6 | 188 | 1.5 | 187 |
| 6 | 200 | 4 | 196 |
| 14 | 207 | 11 | 205 |
| 18 | 209 | 12 | 206 |
| 30 | 214 | 20 | 210 |

* Approximate values for geostationary orbit.

Tabla 3.4

El ruido puede ser expresado en varias maneras. En comunicaciones satelitales es frecuentemente expresado como una temperatura de ruido equivalente T_s . La temperatura de ruido del sistema esta compuesto de varios factores, tales como la temperatura de ruido de la antena y la temperatura de ruido del receptor. Hay muchas otras fuentes de ruido. Algunas pueden no estar relacionadas a una temperatura actual, pero la potencia del ruido puede ser expresada como una temperatura de ruido.

El ruido de la antena esta frecuentemente relacionado a la temperatura del plano al cual la antena esta apuntando. La temperatura de ruido de una antena en una estación terrestre puede variar de 30 K para una buena antena viendo al espacio a 10,000 K o más alto para una antena que apunte al sol. Para antenas receptoras satelitales viendo a la tierra, la temperatura de ruido de la antena es alrededor de 290 K.

La razón (G/T_s) de la ganancia de la antena receptora a la temperatura de ruido es usado como una figura de mérito para el sistema receptor. La razón de potencia portadora recibida C a ruido es comúnmente expresada de 3 maneras: C/T , C/KT_2 , C/KTB . Estas razones son descritas en las siguientes secciones.

3.4.7 FIGURA DE MÉRITO G/Ts PARA UN SISTEMA RECEPTOR.

Los 2 parámetros importantes para el sistema receptor son la ganancia de la antena receptora G_r y la temperatura de ruido del sistema receptor T_s . La última es la suma del ruido de la antena, el amplificador de bajo ruido (LNA) y el ruido de cualquier pérdida de los elementos entre la antena y el LNA. La razón de G_r a T_s es llamada la figura de mérito, escrita como G/T_s . Las estaciones receptoras pueden ser mejoradas con una ganancia de la antena grande G_r (diámetro de la antena grande) ó , una temperatura de ruido baja T_s (mejor amplificador de bajo ruido).

La ganancia de la antena es usualmente dada en dBi (i para isotropico) y la temperatura de ruido del sistema T_s en K, de tal manera que la figura de mérito G/T_s esta en dBi/K. Los valores numéricos de la ganancia en dBi y la temperatura en K no pueden ser divididos. Uno esta en decibeles y el otro no lo esta. La temperatura de ruido puede ser convertida a decibeles y entonces combinada con la ganancia de la antena.

Considerando que el logaritmo de un cociente es igual a la diferencia de los logaritmos.

$$\log_{10} A/B = \log_{10} A - \log_{10} B \quad (3.31)$$

Entonces el cociente es encontrado sustrayendo la ganancia en dBi y la temperatura en dBk.

Este calculo puede ser expresado en la ecuación:

$$G/T_s = G_r - 10 \log_{10} T_s \quad (\text{dBi/K}) \quad (3.32)$$

Donde G_r esta en dBi, T_s en K y G/T_s en dBi/K.

La figura de merito de una antena del sistema (G/T_s) es casi siempre dada en dBi/K y es parte del vocabulario de un ingeniero en comunicaciones.

Como un ejemplo, suponga que la ganancia de la antena receptora G_r es 23 dBi y la temperatura de ruido del sistema T_s es 100 K. La temperatura de ruido convertida a decibeles es 20 dBk. Esto puede ser sustraído de la ganancia y el resultado es $G/T_s = 3$ dBi/K. En términos absolutos, la ganancia de 23 dB es una razón de 200, la temperatura es 100 K y la razón es 2 K^{-1} equivalente a 3 dBi/K.

La ecuación (3.32) actualmente significa.

$$10 \log_{10} (G/T_s)^* = 10 \log_{10} G_r^* - 10 \log_{10} T_s \text{ (dBi/K)} \quad (3.33)$$

cuando las cantidades están expresados en dB, los logaritmos no son escritos explícitamente.

Para un receptor satelital, la ganancia de la antena es diferente para transmisores en estaciones terrestres en diferentes localizaciones.

El operador del satélite usualmente proporciona esta información como un mapa de alcance. El mapa muestra diferentes valores G/T_s para diferentes localizaciones de los transmisores de estaciones terrestres.

Los receptores en estaciones terrestres típicas tienen una figura de mérito G/T_s en el intervalo de -18 a $+41$ dBi/K. La figura de mérito para un receptor satelital varia de -20 a 10 dBi/K.

3.4.8. RAZÓN DE LA PORTADA A RUIDO TÉRMICO C/T

Un criterio del desempeño del enlace es la razón de la potencia de la portadora a la temperatura de ruido T . Para calcular esta, se empieza con la ecuación (3.29):

$$C = \text{EIRP} - L + G_r \quad (\text{dBW}) \quad (3.34)$$

Esta es una ecuación en decibel. Cada una de las variables esta en decibeles, y la ecuación es una serie de logaritmos. Para calcular C/T , el termino $10 \log_{10} T$, es substraído de cada lado de la ecuación. El resultado puede ser escrito.

$$C/T = \text{EIRP} - L + G_r/T_s \quad (\text{dBW/K}) \quad (3.35)$$

La ecuación (3.35) es el corazón de un cálculo de enlace. La razón C/T es igual a el EIRP en dBW, menos la perdida de trayectoria L en dB, más la figura de mérito G_r/T_s del sistema de recepción en dBi/K. La razón esta entonces en dBW/K.

La razón para escribir la ecuación en esta forma es que los términos C/T y G_r/T_s , expresado en notación decibel, tiene un significado especifico para un ingeniero en comunicaciones.

Note que el EIRP es una función de la potencia transmitida y la antena, L es una función de la distancia (y la frecuencia) y G_r/T_s es una figura de mérito para el receptor.

Las unidades en la ecuación (3.35), puede ser checado, como fue hecho con la ecuación (3.13). en la ecuación (3.35) EIRP esta en dBW, L está en dB y G/T_s esta en dB/K.

Note primero que todos los términos están en decibeles. En relación con las unidades, dB/K es lo mismo como dB/K. La perdida de trayectoria L esta en dB (una razón pura) y puede ser usado..

Los otros 2 términos pueden ser combinados. $DBW + dB/K = dBW/K$. El resultado para C/T es dBW/K, donde C esta en dBW y T esta en dBk.

3.4.9 RAZÓN DE LA PORTADORA A DENSIDAD DE RUIDO C/N_0

Todos los objetos a una temperatura física T generan radiación electromagnética. Parte de esta radiación será en frecuencias de microondas y estará presente en un sistema de recepción. La potencia de ruido N de la radiación dentro de un ancho de banda B es:

$$N = KTB \text{ (W)} \quad (3.36)$$

Donde K es la constante de Boltzmann:

$$K = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ ws/k} = -228.60 \text{ dBW/Hz.k} \quad (3.37)$$

Donde Hz. K es igual a Hertz-Kelvin y no deberá ser confundido con KHz.

Para una temperatura de 290 K, y ancho de banda de 50 MHz, la potencia de ruido es 0.2×10^{-12} w ó 0.2 pw.

Una antena que es apuntada a una superficie (cuerpo negro) 290 K recibirá una potencia de ruido de 0.2 nw para cada 50 MHz de ancho de banda.

La densidad de ruido N_o es la potencia de ruido en un ancho de banda de 1 Hz y es uniforme a frecuencias de microondas.

Esto es:

$$N_o = N/B = KT \quad (\text{dBW/Hz}) \quad (3.38)$$

Y es igual a la constante de Boltzmann veces la temperatura de ruido.

Si la señal no ha sido demodulada, o el ancho de banda es desconocido, una medida del desempeño del sistema es la razón de la potencia de la portadora C a la densidad de ruido $N_o = KT$. Entonces esta razón de la portadora a la densidad de ruido es:

$$C/N_o = C/KT = C/T + 228.6 \quad (\text{dBHz}) \quad (3.39)$$

Esta razón es escrita como C/N_o , o como C/KT . Esta es la razón de la portadora a ruido térmico referida a un ancho de banda estándar de 1 Hz.

El valor absoluto de la constante de Boltzmann es un número muy pequeño, así en decibeles es un número negativo grande. En cálculos de enlace K esta usualmente en el

denominador, así un número negativo es substraído. Esto es lo mismo como sumar + 228.6, lo cual es equivalente a multiplicar por $1/K$, el recíproco de la constante de Boltzmann.

3.4.10 RAZÓN DE LA PORTADORA A RUIDO C/N

Un filtro en el receptor usualmente bloquea mucho de el ruido, y solamente la frecuencia del ancho de banda necesario para las comunicaciones se permite pasar. La razón de la portadora a ruido es entonces.

$$C/N = C/KTB = C/KT - 10 \log_{10} B(\text{dB}) \quad (3.40)$$

Donde la razón de la portadora o densidad de ruido C/KT ó C/N_0 esta en dBHz y el ancho de banda B esta en Hz.

Muchos enlaces de comunicaciones tienen una C/N de 10 dB ó más.

3.5 EJEMPLOS DE CÁLCULOS DE ENLACE

Los cálculos de enlace vienen en varias longitudes y estilos. No hay un calculo de enlace estándar. Los ejemplos presentados aquí consisten de un simple cálculo de enlace ascendente (tierra a satélite) y un simple calculo de enlace descendente (satélite a tierra). Algunos ejemplos numéricos son dados para cada uno.

Estos cálculos contienen solamente los componentes esenciales. Como los cálculos se vuelven más elaborados los resultados son más precisos e incluyen más información

para el usuario. Los cálculos simples son útiles, y los resultados de cálculos más elaborados pueden diferir por solamente unos pocos dB. Los cálculos presentes son considerados separadamente para el enlace ascendente y enlace descendente.

3.5.1 FORMA CORTA DE UN CÁLCULO DE ENLACE ASCENDENTE.

La tabla 3.5 muestra una forma corta para un cálculo de enlace ascendente. Comienza con alguna información de referencia, la cual es usada indirectamente en el cálculo de enlace. El nombre y/o localización de la estación terrestre transmisora es listada, a menudo como longitud y latitud. Si conocemos, la frecuencia exacta debe ser listada; de otra manera la frecuencia banda - media (ejemplo 14.25 GHz) es comúnmente usada. El diámetro de la antena transmisora puede ser usado en calcular la ganancia de la antena. El nombre del satélite o familia de satélites es listado. Si el satélite tiene varios haces, el haz usado, es identificado.

Uplink* Budget, Short Form (blank)

Transmit earth station location: _____
 Uplink frequency f_u : _____ GHz
 Transmit earth station antenna diameter: _____ m
 Satellite: _____ Uplink beam: _____

| Parameter | Sign | Value | Units |
|--|------|-------|------------|
| <u>Earth Station</u> | | | |
| Power at the antenna for $P^* = \text{_____ W/carrier}$ | | _____ | dBW |
| Transmit antenna gain G | + | _____ | dBi |
| Earth station EIRP | | _____ | dBW |
| <u>Earth to Satellite</u> | | | |
| Free space path loss L for $S_u = \text{_____ km}$ | - | _____ | dB |
| <u>Satellite</u> | | | |
| Satellite $G/T_{s,u}$ | + | _____ | dB/K |
| Carrier/thermal noise C_u/T_u | | _____ | dBW/K |
| $1/k$ ($k = \text{Boltzmann's constant}$) | + | 228.6 | dB(W/Hz K) |
| C_u/kT_u | | _____ | dBHz |

* The u subscript is for uplink quantities.

Tabla 3.5

Tres ecuaciones claves hacen un cálculo ascendente fácil:

$$\text{EIRP} = 10 \log_{10} P + G_r \text{ (dBW)} \quad (3.41)$$

$$C/T = \text{EIRP} - L + G_r \text{ (dBW/K)} \quad (3.42)$$

$$C/KT = C/T + 228.6 \text{ (dBHz)} \quad (3.43)$$

Para usar en un enlace ascendente (hacia arriba) las razones en las ecuaciones generales son etiquetadas con una “u” escrito debajo de la letra. En la primera ecuación, la potencia radiada equivalente isotrópicamente EIRP es calculada de la potencia transmisora P en W y la ganancia de la antena transmisora en dB. En la segunda ecuación la razón de la portadora a ruido térmico es igual a el EIRP en dBW, menos la pérdida de trayectoria en dB, más la figura de mérito de el equipo receptor en dB/K. Finalmente, la razón de la portadora a densidad de ruido es la razón de la portadora a el ruido térmico más el recíproco de la constante de Boltzmann.

Las ecuaciones de arriba son usadas en el cálculo de enlace mostrado en la tabla 3.5. el EIRP (línea 3) es calculada con la ecuación (3.41), la cual es la misma que la ecuación (3.21), sumando la potencia de la antena y la ganancia de la antena transmisora (línea 1 y 2). El C_u/T_u (línea 6) es calculada con la ecuación (3.42) o la ecuación (3.35), por adición y substracción. C_u/KT_u (línea 8) es calculada con la ecuación (3.43) o ecuación (3.39) sumando 228.6.

Esta forma tiene signos (+,-) para señalar sumas y restas y líneas horizontales para señalar totales. Muchos cálculos de enlace están escritos sin los signos.

El lector debe entonces saber o suponer como se calcula cada número. La pérdida de trayectoria es un número grande y es siempre substraido en un cálculo de enlace. La constante de Boltzmann puede ser confusa. Este es un número muy pequeño (1.38×10^{-23}).

²³), así de esta manera es decibeles es negativo (-228.60 dBw/ Hz K). En el cálculo de enlace la ecuación esta en el denominador, así un número negativo debe ser substraído. Esto es equivalente a sumar un número positivo. En la tabla 3.5 1/K es usado, como un número positivo (+228.6) sumando a la razón C_u/T_u .

3.5.2. FORMA CORTA DE UN CÁLCULO DE ENLACE DESCENDENTE

Las comunicaciones satelitales incluye un enlace ascendente (estación terrena a satélite) y un enlace descendente. (satélite a estación terrena). Aquí estas son calculadas separadamente.

Tres ecuaciones claves similares son usadas en un cálculo de enlace descendente simple:

$$C/T = EIRP - L + G/T \text{ (dBW/K)} \quad (3.44)$$

$$C/KT = C/T + 228.6 \text{ (dBHz)} \quad (3.45)$$

$$C/N = C/KT - 10\log_{10} B \text{ (dB)} \quad (3.46)$$

Para usar en un enlace descendente (hacia abajo) las razones en las ecuaciones generales son etiquetadas con una "d" escrito debajo de la letra:

Las ecuaciones principales para los dos enlaces son las mismas. Las ecuaciones (3.44) y (3.45) son las mismas que las ecuaciones (3.42) y (3.43) para el enlace ascendente (hacia arriba). Las diferencias son debido a los diferentes requerimientos y diferentes puntos de vista.

Para el enlace ascendente (hacia arriba) el operario de la estación terrena calcula el EIRP de la potencia del transmisor y la ganancia de la antena. Para el enlace descendente (hacia abajo) el EIRP esta en función del enlace ascendente. La relación entre la potencia recibida por el satélite y la potencia transmitida es una función de el satélite. Esto es determinado por la amplificación en el receptor y la ganancia de los transponders. Muchos satélites no demodulan las señales en un enlace ascendente. En el enlace descendente (hacia abajo) las señales son demoduladas y C_d/N_d puede ser calculada.

Un ejemplo de un cálculo de enlace descendente es mostrado en la tabla 3.6.

La información a la cabeza es similar al enlace ascendente, pero algunas además hacen referencia a la recepción de la estación terrena. Las primeras tres líneas son combinadas para obtener la razón de la portadora a ruido térmico C_d/T_d con las perdida de trayectoria substraída como antes.

Entonces las otras razones C_d/KT_d y C_d/N_d son calculadas.

Estos números refiere únicamente a el desempeño del enlace descendiente y asume que el enlace ascendente y las transmisiones satelitales están libre de ruido.

Downlink* Budget, Short Form (blank)

| Receiving earth station location: _____ | | | |
|---|------|----------------------|--------------------------|
| Downlink frequency f_d : _____ GHz | | | |
| Receiving earth station antenna diameter: _____ m | | | |
| Satellite: _____ | | Downlink beam: _____ | |
| Parameter | Sign | Value | Units |
| Satellite | | | |
| Satellite EIRP/carrier | | _____ | dBW |
| Satellite to Earth | | | |
| Free space path loss L for $S_d =$ _____ km | - | _____ | dB |
| Earth Station | | | |
| Earth station $G/T_{s,d}$ | + | _____ | dB/K |
| Carrier/thermal noise C_d/T_d | | _____ | dBW/K |
| $1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant) | + | 228.6 | dB(W/Hz K) ⁻¹ |
| C_d/kT_d | | _____ | dBHz |
| Bandwidth ($B^* =$ _____ Hz) | - | _____ | dBHz |
| Carrier-to-noise ratio C_d/N_d | | _____ | dB |

* The d subscript is for downlink quantities.

Tabla 3.6

3.5.3 EJEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS DE ENLACE.

Las tablas 3.5 y 3.6 son formas en blanco para calcular un simple enlace ascendente y el cálculo de un enlace descendente.

Los ejemplos numéricos ahora serán presentados. Estas ilustraran la aritmética y la variación en parámetros para diferentes tipos de comunicaciones satelitales. Al empezar a estudiar estos números pueden aparecer arbitrarios. Un ingeniero en comunicaciones puede ver un cálculo de enlace y determinar la calidad de el desempeño pero también puede improvisar.

Un ejemplo de un enlace de satélite móvil es mostrado en las tablas 3.7 y 3.8. La frecuencia del enlace ascendente es 1.6 GHz y la frecuencia del enlace descendente es 1.5 GHz. Las tablas ilustran las comunicaciones de una antena pequeña (12 cm de diámetro) montada sobre un automóvil en Washington DC a una antena grande de 5 m en New York. La potencia del transmisor y el EIRP son pequeños. El enlace ascendente y enlace descendente C/KT (50 y 51.5 dBHz) son también pequeños, pero el ancho de banda es 5000 Hz. (37 dBHz). Esto es adecuado para un enlace telefónico.

El siguiente ejemplo es para un satélite de servicio de radiodifusión, mostrado en las tablas 3.9 y 3.10. Las frecuencias asignadas son 18 y 12.5 GHz. Este servicio está diseñado para emitir un canal de T.V. (25 MHz) directamente hacia una antena pequeña para el hogar (50cm de diámetro). Para hacer esto el EIRP del satélite es un millón de veces más grande que el ejemplo anterior. Donde habrá muchas estaciones terrestres recibiendo la señal de T.V., es mejor tener una señal de satélite fuerte, también cada una de la estación terrestre puede ser menos extensa.

El último ejemplo, para un enlace internacional de T.V., es mostrada en las tablas 3.11 y 3.12. las frecuencias asignadas son 6 y 3.775 GHz. Las comunicaciones internacionales fue una de las mayores aplicaciones de los satélites geoestacionarios.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los diámetros de la antena de la estación terrena son grandes (15 m). El número de estaciones terrenas es pequeña, y ellos manejan gran cantidad de tráfico. Este ejemplo ilustra el uso para un canal de T.V. de 20 MHz, el cual represente únicamente una pequeña parte del tráfico total.

Tabla 3.7

Uplink Budget, Short Form for a Mobile Satellite Link

Transmit earth station location: Washington, DC, Beltway
 Uplink frequency f_u : 1.6 GHz Automobile
 Transmit earth station antenna diameter: 0.12 m
 Satellite: Mobile Uplink beam: Eastern USA

| Parameter | Sign | Value | Units |
|---|------|--------|--------------------------|
| Earth Station | | | |
| Power at the antenna for $P^* = 0.5$ W/carrier | | -3.0 | dBW |
| Transmit antenna gain G | + | 3.5 | dBi |
| Earth station EIRP | | 0.5 | dBW |
| Earth to Satellite | | | |
| Free space path loss L for $S_u = 37,700$ km | - | 188.1 | dB |
| Satellite | | | |
| Satellite $G/T_{s,u}$ | + | 9.0 | dBi/K |
| Carrier/thermal noise C_u/T_u | | -178.6 | dBW/K |
| $1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant) | + | 228.6 | dB(W/Hz K) ⁻¹ |
| C_u/kT_u | | 50.0 | dBHz |

Tabla 3.8

Downlink Budget, Short Form for a Mobile Satellite Link

Receiving earth station location: New York, NY
 Downlink frequency f_d : 1.5 GHz
 Receiving earth station antenna diameter: 5 m
 Satellite: Mobile Downlink beam: Eastern USA

| Parameter | Sign | Value | Units |
|--|------|--------|--------------------------|
| Satellite | | | |
| Satellite EIRP/carrier | | -4.6 | dBW |
| Satellite to Earth | | | |
| Free space path loss L for $S_d = 37,700$ km | - | 187.5 | dB |
| Earth Station | | | |
| Earth station $G/T_{s,d}$ | + | 15.0 | dBi/K |
| Carrier/thermal noise C_d/T_d | | -177.1 | dBW/K |
| $1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant) | + | 228.6 | dB(W/Hz K) ⁻¹ |
| C_d/kT_d | | 51.5 | dBHz |
| Bandwidth ($B^* = 5000$ Hz) | - | 37.0 | dBHz |
| Carrier-to-noise ratio C_d/N_d | | 14.5 | dB |

Tabla 3.9

Uplink Budget, Short Form for a Broadcasting Satellite Service (BSS) Link

Transmit earth station location: New York, N.Y., USA
 Uplink frequency f_u : 18 GHz
 Transmit earth station antenna diameter: 5 m
 Satellite: Broadcast Satellite Service Uplink beam: CONUS

| Parameter | Sign | Value | Units |
|--|------|---------------|--------------------------|
| Earth Station | | | |
| Power at the antenna for $P^* \approx$ <u>150</u> W/carrier | | <u>21.8</u> | dBW |
| Transmit antenna gain G | + | <u>56.9</u> | dBi |
| Earth station EIRP | | <u>78.7</u> | dBW |
| Earth to Satellite | | | |
| Free space path loss L for $S_a =$ <u>39,000</u> km | - | <u>209.4</u> | dB |
| Satellite | | | |
| Satellite $G/T_{s,b}$ | + | <u>0.0</u> | dBi/K |
| Carrier/thermal noise C_u/T_u | | <u>-130.7</u> | dBW/K |
| $1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant) | + | <u>228.6</u> | dB(W/Hz K) ⁻¹ |
| C_u/kT_u | | <u>97.9</u> | dBHz |

Tabla 3.10

Downlink Budget, Short Form, Broadcasting Satellite Service (BSS) Link

Receiving earth station location: A home in Indiana, USA
 Downlink frequency f_d : 12.5 GHz
 Receiving earth station antenna diameter: 0.5 m
 Satellite: Broadcast Satellite Service Downlink beam: Central USA

| Parameter | Sign | Value | Units |
|--|------|---------------|--------------------------|
| Satellite | | | |
| Satellite EIRP/carrier | | <u>55.0</u> | dBW |
| Satellite to Earth | | | |
| Free space path loss L for $S_d =$ <u>40,000</u> km | - | <u>206.4</u> | dB |
| Earth Station | | | |
| Earth station $G/T_{e,d}$ | + | <u>15.0</u> | dBi/K |
| Carrier/thermal noise C_d/T_d | | <u>-136.4</u> | dBW/K |
| $1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant) | + | <u>228.6</u> | dB(W/Hz K) ⁻¹ |
| C_d/kT_d | | <u>92.2</u> | dBHz |
| Bandwidth ($B^* =$ <u>25×10^6</u> Hz) | - | <u>74.0</u> | dBHz |
| Carrier-to-noise ratio C_d/N_d | | <u>18.2</u> | dB |

Uplink Budget, Short Form for International TV

Transmit earth station location: London, UK
 Uplink frequency f_u : 6 GHz
 Transmit earth station antenna diameter: 15 m
 Satellite: International Uplink beam: Global

| Parameter | Sign | Value | Units |
|---|------|---------------|--------------------------|
| Earth Station | | | |
| Power at the antenna for $P^* = 1000$ W/carrier | | <u>30.0</u> | dBW |
| Transmit antenna gain G | + | <u>56.9</u> | dBi |
| Earth station EIRP | | <u>86.9</u> | dBW |
| Earth to Satellite | | | |
| Free space path loss L for $S_u = 40,000$ km | - | <u>200.1</u> | dB |
| Satellite | | | |
| Satellite $G/T_{s,u}$ | + | <u>-18.0</u> | dB/K |
| Carrier/thermal noise C_u/T_u | | <u>-131.2</u> | dBW/K |
| $1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant) | + | <u>228.6</u> | dB(W/Hz K) ⁻¹ |
| C_u/kT_u | | <u>97.4</u> | dBHz |

Tabla 3.12

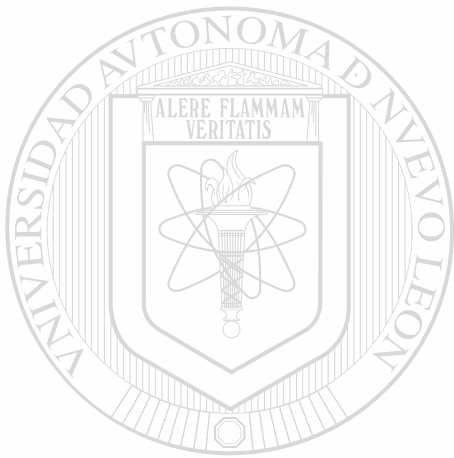
Downlink Budget, Short Form for International TV

Receiving earth station location: New York, NY, USA
 Downlink frequency f_d : 3.775 GHz
 Receiving earth station antenna diameter: 15 m
 Satellite: International Downlink beam: Global

| Parameter | Sign | Value | Units |
|--|------|---------------|--------------------------|
| Satellite | | | |
| Satellite EIRP/carrier | | <u>26.0</u> | dBW |
| Satellite to Earth | | | |
| Free space path loss L for $S_d = 40,000$ km | - | <u>196.0</u> | dB |
| Earth Station | | | |
| Earth station $G/T_{s,d}$ | + | <u>34.0</u> | dB/K |
| Carrier/thermal noise C_d/T_d | | <u>-136.0</u> | dBW/K |
| $1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant) | + | <u>228.6</u> | dB(W/Hz K) ⁻¹ |
| C_d/kT_d | | <u>92.6</u> | dBHz |
| Bandwidth ($B^* = 20 \times 10^6$ Hz) | - | <u>73.0</u> | dBHz |
| Carrier-to-noise ratio C_d/N_d | | <u>19.6</u> | dB |

En todos los ejemplos el enlace descendente esta a una frecuencia más baja que el enlace ascendente. La atenuación es menor a frecuencias más bajas, así, de esta manera el enlace descendente requiere un transmisor menos poderoso.

Estos 3 tipos de servicio han sido asignados en diferentes bandas de frecuencia. Si un satélite de radiodifusión poderoso comparte la misma banda con un satélite de servicio movible, el satélite de radiodifusión abruma e interfiere con el servicio movible.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIÓN ARRIBA DE 10 GHZ.

4.1 INTRODUCCIÓN

Hay un creciente incremento en la demanda del espectro de radio - frecuencia en las naciones industrializadas del mundo. Esto es debido a la gran demanda de transferir información en nuestra sociedad, resultando en un rápido incremento en las telecomunicaciones y los enlaces que satisfacen esta conectividad requieren tener una gran capacidad.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El espectro más deseable para satisfacer estas necesidades es la banda entre 1 y 10 GHz. Esta es llamada la “ventana de ruido”, donde los ruidos galácticos y el producido por el hombre son mínimos. La absorción atmosférica puede generalmente ser despreciada en esta región.

La congestión en la región de 1 – 10 Ghz nos ha forzado a buscar frecuencias de operación por encima de 10 Ghz. La ingeniería ha encontrado que las frecuencias arriba de 10 Ghz pueden tener un desempeño equivalente o aproximadamente equivalente a aquellas abajo de 10 GHz.

Hemos seleccionado arbitrariamente 10 GHz como una línea de referencia. Generalmente, abajo de 10 GHz, en el diseño de radioenlaces, podemos despreciar el exceso de atenuación debido a la lluvia y la absorción atmosférica. Para frecuencias arriba de 10 GHz el exceso de atenuación debido a la lluvia y absorción atmosférica pueden tener importancia primordial en el diseño de un enlace.

En realidad, ciertas bandas de frecuencias muestran tanta absorción gaseosa que son inútiles para muchas aplicaciones.

4.2. PROBLEMA GENERAL DE PROPAGACIÓN ARRIBA DE 10 GHz

La propagación de ondas de radio a través de la atmósfera arriba de 10 GHz implica no únicamente las pérdidas en el espacio libre si no también otros factores importantes,

Estos son:

- 1.- La contribución gaseosa de la atmósfera homogénea debido a los mecanismos de polarización resonante y no resonante.
- 2.- La contribución de no homogeneidad en la atmósfera.
- 3.- La contribución particular debido a la lluvia, niebla, neblina, bruma, (polvo, humo y partículas de sal en el aire).

Del punto 1 estamos tratando la propagación de una onda a través de la atmósfera bajo el efecto de varias resonancias moleculares, tales como el vapor de agua H_2O a 22 y 183 GHz, oxígeno alrededor de 60 GHz y un oxígeno simple a una frecuencia de 119 GHz. Estos puntos con su respectiva atenuación son mostradas en la Fig. 4.1.

Otros gases resonantes también son N_2O , SO_2 , O_3 , NO_2 y NH_3 , pero debido a su baja densidad en la atmósfera, tienen despreciables efectos sobre la propagación.

El mayor ofensor es la atenuación por precipitación. Puede exceder a todas las otras fuentes de atenuación en la atmósfera arriba de 10 GHz.

La lluvia y sus efectos sobre la propagación son cubiertos extensamente.

Trataremos primeramente las pérdidas totales debido a la absorción y dispersión. Recordando que cuando una onda electromagnética incidente pasa sobre un objeto que tiene propiedades dieléctricas diferentes de un medio circundante, algo de energía es absorbida y algo es dispersada. Aquel que absorbe calor es un material absorbente; aquel que dispersa es casi - isotrópico y relaciona la longitud de onda de la onda incidente. El mas pequeño esparcimiento, la más isotrópica esta en dirección con respecto a la longitud de onda de la energía incidente.

Podemos desarrollar una formula para calcular las pérdidas de transmisión totales para un enlace dado.

$$\text{Atenuación (dB)} = 92.45 + 20 \log f_{\text{GHz}} + 20 \log D_{\text{KM}} + a + b + c + d + e \quad (4.1)$$

Donde f esta en gigahertz y D está en Kilómetros, También.

- a = Exceso de atenuación (dB) debido al vapor de agua.
- b = Exceso de atenuación (dB) debido a neblina y niebla
- c = Exceso de atenuación (dB) debido al oxígeno O_2
- d = Suma de las pérdidas de absorción (dB) debido a otros gases
- e = Exceso de atenuación (dB) debido a la lluvia.

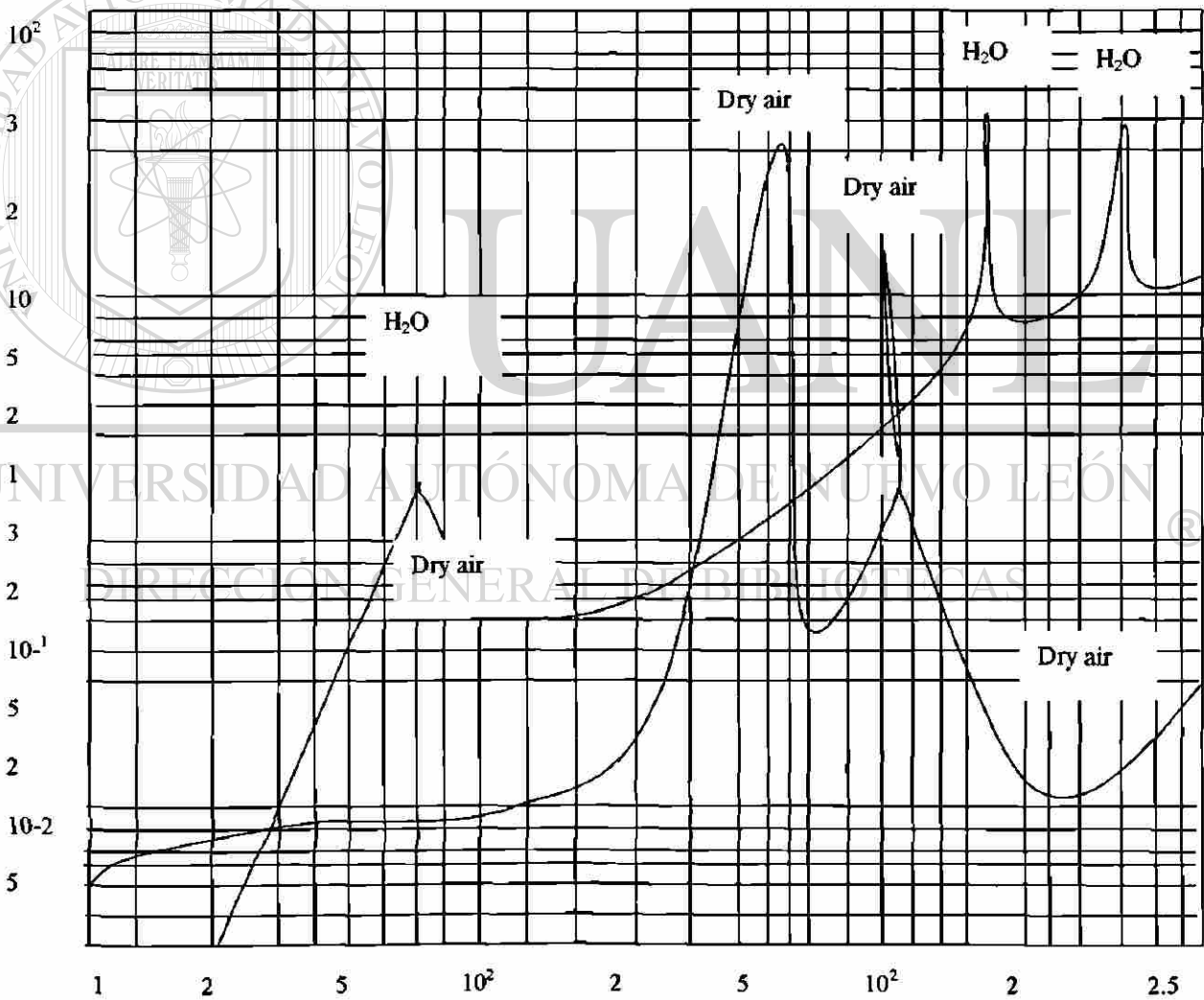


Figura 4.1

Notas y comentarios sobre la ecuación 4.1

1.- “a” varía con la humedad relativa, temperatura, presión atmosférica y altitud. El ingeniero de transmisión asume que el vapor de agua contenido es lineal con estos parámetros y que la atmósfera es homogénea (en realidad homogéneo horizontalmente pero estratificado verticalmente). Hay una banda de absorción de vapor de agua cerca de 22 GHz causada por resonancia moleculares.

2.- “c y d” se suponen que varían linealmente con la densidad atmosférica, pero directamente con la presión atmosférica y son una función de la altitud (se supone que la atmósfera es homogénea)

3.- “b y e” varían con la densidad de la célula de lluvia o nube y el tamaño de la caída de lluvia o partículas de agua tales como niebla o neblina. En este caso la atmósfera es más desde luego no homogénea; (las gotitas menores de 0.01 cm en diámetro son consideradas neblina/niebla, y más de 0.01 cm, lluvia). Normalmente la niebla produce una atenuación cercana a 0.1 dB/km. A 35 GHz incrementándose a 0.6 dB/km. A 75 GHz.

En la ecuación 4.1 los términos b y d pueden frecuentemente ser despreciados; los términos a y c son usualmente unidos y llamados atenuación atmosférica. Si instalamos un enlace “LOS” de 10 km. a 22 GHz en el cálculo de pérdidas de transmisión deberán ser añadidos 1.6 dB para que esta sea llamada atenuación atmosférica, pero es predominantemente absorción de vapor de agua, mostrada en la fig. 4.1

Notaremos en la figura 4.1 que hay bandas de frecuencia con relativamente altos niveles de atenuación por unidad de distancia; algunas son bandas bastante estrechas y algunas bastante anchas. Por ejemplo, la banda de absorción O_2 , cubre más o menos de

58 a 62 GHz, y con la guarda desciende a 50 y aumenta a 70 GHz. En el pico de 60 GHz, la atenuación a nivel del mar es aproximadamente de 15 dB/Km. Uno se puede preguntar: ¿En que se usan estas bandas?. Actualmente, la banda de 58 – 62 GHz es apropiadamente asignada para un satélite de enlace - cruzado. Estos enlaces operan en el espacio arriba de los límites de la atmósfera de la tierra, donde los términos α y ϵ pueden ser despreciados. Es particularmente atractivo los enlaces - cruzados en aplicaciones militares, teniendo una protección inherente de interferencias enemigas en bases terrestres por el significativo factor de atenuación atmosférica. Es también útil para enlaces militares de trayectoria muy corta tales como un sistema de comunicación segura de barco a barco. Además la atenuación atmosférica ofrece una seguridad adicional para interceptar señales (baja probabilidad de interceptar. LPI) y contra interferencias.

La figura 4.1 muestra un número de bandas que están relativamente abiertas. Estas aperturas son llamadas a menudo ventanas, tres de estas ventanas son sugeridas para un servicio punto a punto en la tabla 4.1

Windows for Point-to-Point Service

| Banda (GHz) | Excess Attenuation Due to Atmospheric Absorption (dB/km) |
|-------------|--|
| 20 < | 0.08 < |
| 28 – 42 | 0.13 |
| 75 – 95 | 0.4 |
| 125 - 140 | 1.8 |

Tabla 4.1

4.3 PERDIDAS POR LLUVIA

4.3.1. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LA LLUVIA (PRECIPITACIÓN)

De los factores “a” al “e” en la ecuación 4.1, el factor “e” es el exceso de atenuación debido a la lluvia, es el factor principal que afecta las pérdidas en la trayectoria. Para ilustrar en la gráfica de vapor de agua a 22 GHz, el exceso de atenuación debido a los gases atmosféricos acumula únicamente 0.165 dB/km., y para una trayectoria de 10 Km. únicamente 1.65 dB las cuales se suman a las pérdidas en el espacio - libre para compensar las pérdidas debido al vapor de agua. Esto es despreciable cuando se comparan las pérdidas en el espacio - libre, tal como 119.3 dB para el primer Kilómetro a 22 GHz, acumulando por lo tanto más o menos 6 dB cada vez que la longitud de la trayectoria es doblada (6 dB para 2 Km., 12 dB para 4 Km. etc.). Por consiguiente en una trayectoria de 10 Km. tendremos una pérdida de espacio - libre de 139.3 dB más 1.65 dB sumados por el exceso de atenuación debido al vapor de agua (22 GHz) da un total de 140.95 dB.

El exceso de atenuación debido a la lluvia es otro asunto. Ha sido una práctica común expresar, las pérdidas por lluvia como una función de la proporción de la precipitación. Tal proporción depende de la cantidad de agua líquida y de la velocidad de caída de las gotas. La velocidad, en cambio, depende del tamaño de la gota de lluvia. Por consiguiente nuestro interés en cuanto a la caída de lluvia se reduce al tamaño de la gota y a la distribución del tamaño de la gota. Toda esta información está diseñada para llevar al ingeniero de transmisión a ajustar el exceso de atenuación debido a la lluvia sobre una trayectoria particular como una función del tiempo y distribución del tiempo.

Una aproximación más reciente del análisis de lluvia es aquel dado en milímetros por hora. Usualmente esto se hace con instrumentos de medición, usando el promedio de la lluvia almacenada en un día o en periodo de días. Para el diseño de enlace arriba de 10 GHz estas estadísticas no son suficientes cuando necesitamos una disponibilidad de 99.9% y no se desea emplear medidas excesivas como procedimiento.

Como hemos mencionado, hay una falacia en usar la proporción de caída de lluvia anual como una base para el cálculo del exceso de atenuación debido a la caída de lluvia. Por ejemplo, varias semanas de llovizna ligera afectara la disponibilidad de la trayectoria a largo plazo mucho menos que varios buenos aguaceros que sean de corta vida (duración de 20 minutos)

Las estadísticas que necesitamos son para estas lluvias fuertes, estas lluvias fuertes son naturaleza celular. Nos preguntamos; ¿de que tamaño son las células?, ¿Cuál es la frecuencia de caída de las células? y ¿Cuál es el tamaño de las gotas y su distribución?.

Hoog sugiere el uso de dispositivos de medición de alta velocidad para hacer lecturas con análisis por computadora. Estas mediciones pueden proveer un análisis del índice de caída, minuto por minuto, cosa que no se puede hacer con medidas de tipo convencional. Por supuesto, sería deseable tener varios años de estadísticas para un enlace determinado, para tener la información necesaria para calcular la atenuación por lluvia, que influye para determinar parámetros como son: el espaciado entre repetidoras para enlace terrestre, el tamaño de antenas y diversos factores.

Esta información está disponible e indica una gran variación de algunas regiones a otras. Algunas interrupciones en algún enlace se pueden reducir aumentando la potencia de transmisión, mejorando el factor de ruido, aumentando el tamaño de la antena o empleando un sistema con diversidad, esto es transmitir la señal de 2 lugares distintos separados al menos 10 Km con un interruptor que escoja el camino con menos

atenuación, ya que hay poca probabilidad de que las gotas afecten de igual manera en ambos caminos. Para esto se requiere una cuidadosa ecualización de fase entre los 2 caminos, especialmente para la transmisión de altas velocidades de bits.

Ejemplo, en un periodo de medición fue encontrado que Miami, Florida, tiene un índice de lluvia máxima alrededor de 20 veces mayor que las lluvias que ocurren en Oregon. En Miami un promedio de lluvia puede exceder 700 mm/h. El efecto de 700 mm/h sobre trayectorias de 70 y 48 GHz puede ser extrapolado de la fig. 4.2. En la figura el promedio de lluvia en milímetros por hora se prolonga a 100, 100 mm/n suministra un exceso de atenuación de 25 a 30 dB/Km.

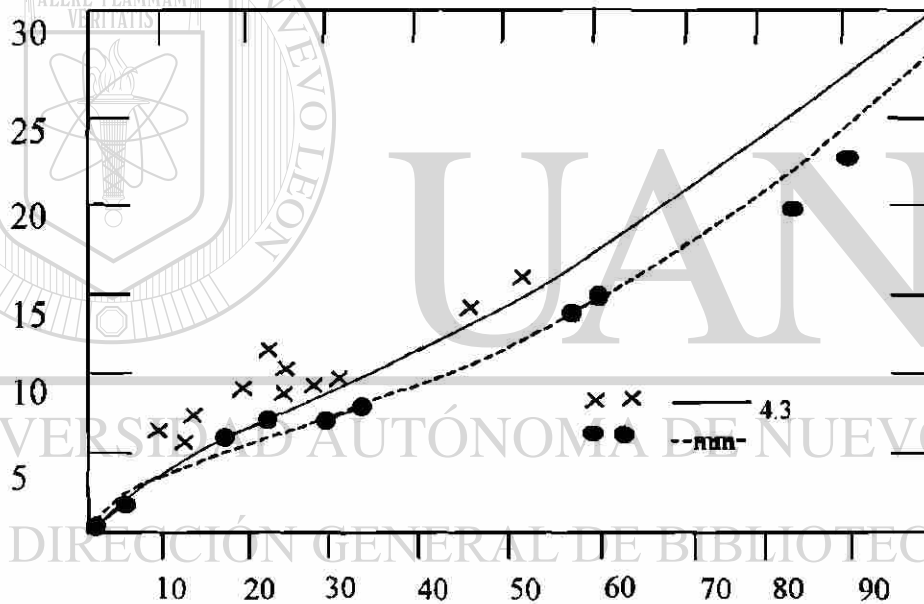


Figura 4.2

4.4 CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN DEBIDO A LLUVIA

La atenuación debido a lluvia en enlaces vía satélite está en función de la frecuencia de operación y del ángulo de elevación. Las de lluvia atenúan y dispersan la energía de las microondas a lo largo de un enlace tierra espacio.

4.4.1. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS GOTAS.

Varios investigadores han estudiado la distribución del tamaño de las gotas como una función de la intensidad de precipitación de la lluvia y el tipo de actividad de tormenta. Las tres distribuciones que se usan comúnmente son:

1. Distribución de Laws y Parsons (LP)
2. Distribución de Marshall – Palmer (MP)
3. Distribución de Joss – tormenta (J-T) y de llovizna (J-D) (D-drizzle)

La distribución LP es más adecuada para propósitos de diseño porque ha sido ampliamente probada para bajos niveles de precipitación y para tormentas donde los niveles de precipitación son altos. Y a frecuencias arriba de 10 Ghz, los valores de atenuación debido a lluvia de la distribución LP son mayores en comparación de la distribución J-T. Además se ha observado que el modelo se hace más preciso cuando se utiliza la temperatura de las gotas en 0°C, en lugar de 20°C. Para la mayoría de ángulos de elevación altos en enlaces vía satélite, las gotas de lluvia son más frías para mayores altitudes y se van calentando al caer hacia la tierra.

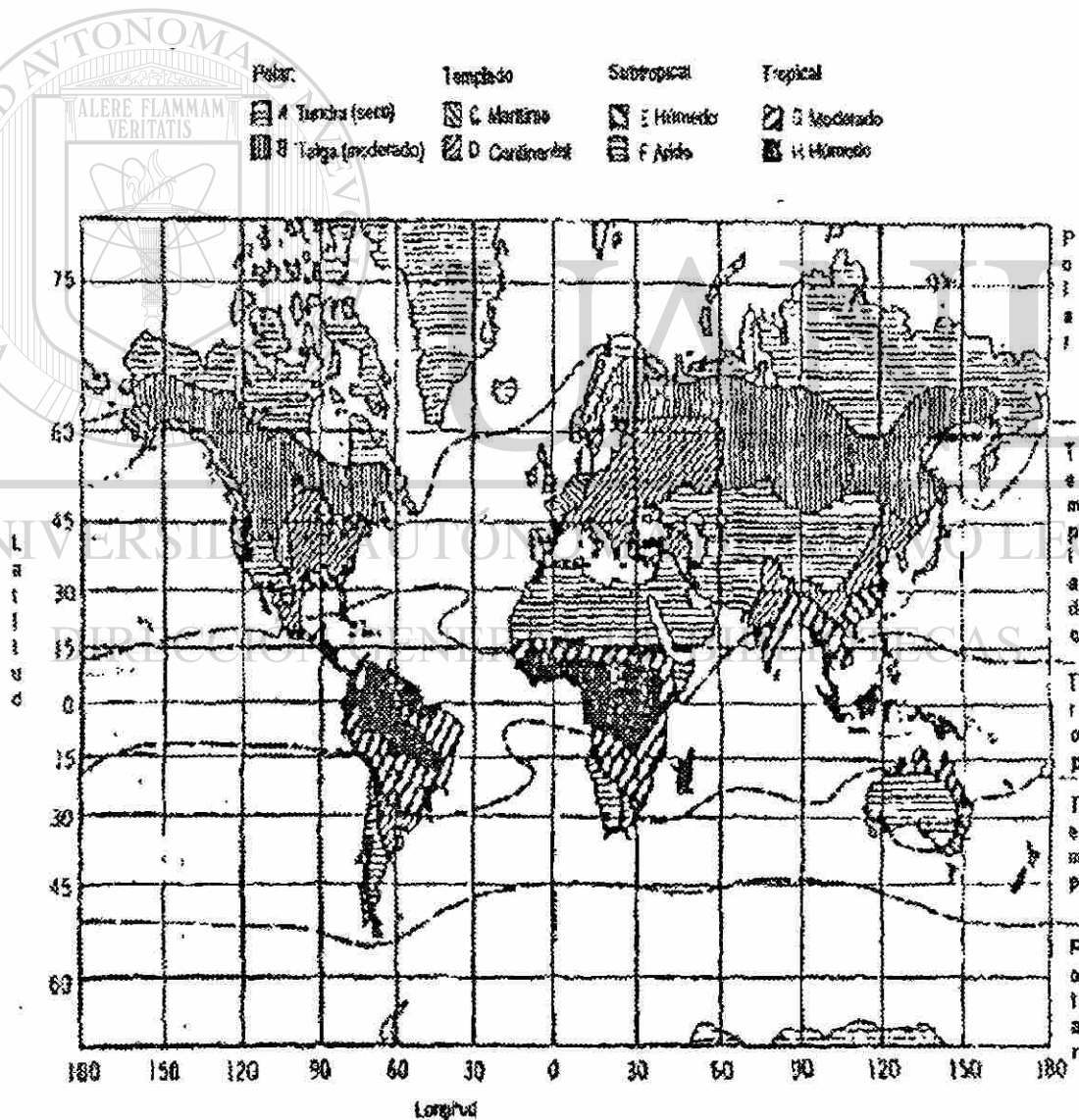
4.5. MODELO PROPUESTO POR LA NASA (MODELO GLOBAL)

El modelo global usa un modelo específico de lluvia basado en su totalidad en observaciones meteorológicas y no en mediciones de atenuación. Sin embargo, el modelo de lluvia en combinación con la estimación de la atenuación, se ha probado con mediciones de atenuación.

El modelo en su totalidad está basado en el uso de estimaciones independientes derivadas meteorológicamente para acumular distribuciones puntuales de precipitación

pluvial, promedios de precipitación pluvial en trayectorias horizontales, la distribución vertical de intensidad de lluvia y una relación derivada teóricamente entre la atenuación específica y la intensidad de lluvia obtenida a partir de medias en observaciones de distribuciones de tamaño de gota en un número determinado de frecuencias de lluvia.

El primer paso es determinar la distribución instantánea puntual de frecuencia de lluvia R_p . El modelo presenta medias de distribución estimadas para ocho regiones de lluvia, de la A a la H cubriendo el orbe. Las cuales se muestran en las figuras 4.3 y 4.4 para continentes y regiones oceánicas, y en la figura 4.5 se muestran las regiones de lluvia para la República Mexicana. Figura. 4.3



Las regiones climáticas son muy amplias. El error en el cálculo de la atenuación puede ser reducido usando las distribuciones actuales de intensidad de lluvia para el área de interés si se dispone de estas estadísticas de largo plazo.

Ya identificada la región de lluvia de interés, el valor de R_p lo obtenemos de las gráficas de intensidad de lluvia de la figura 4.6. En la figura 4.6, se dan las curvas para las ocho regiones designadas en la A a la H para un promedio de intensidad de lluvia de superficie de un minuto como una función de un porcentaje de año en el cual la intensidad de lluvia se ha excedido. Los valores de R_p se muestran en la siguiente de acuerdo al porcentaje del año (tabla 4.2)

| % del año | A. | B. | C. | D. | E. | F. | G. | H. | minutos por año | Horas por año |
|-----------|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----------------|---------------|
| 0.001 | 28 | 54 | 80 | 106.33 | 164 | 66 | 129 | 251 | 5.3 | 0.09 |
| 0.002 | 24 | 40 | 62 | 88.33 | 144 | 51 | 109 | 220 | 10.5 | 0.18 |
| 0.005 | 19 | 26 | 41 | 65 | 117 | 34 | 85 | 178 | 26 | 0.44 |
| 0.01 | 15 | 19 | 28 | 49.66 | 98 | 23 | 67 | 147 | 53 | 0.88 |
| 0.02 | 12 | 14 | 18 | 36.66 | 77 | 14 | 51 | 115 | 105 | 1.75 |
| 0.05 | 8.8 | 9.5 | 11 | 23 | 52 | 8.0 | 33 | 77 | 263 | 4.38 |
| 0.1 | 6.5 | 6.8 | 7.2 | 16 | 35 | 5.5 | 22 | 51 | 526 | 8.77 |
| 0.2 | 4.0 | 4.8 | 4.8 | 10.33 | 21 | 3.8 | 14 | 31 | 1,052 | 17.5 |
| 0.5 | 2.5 | 2.7 | 2.8 | 5.4 | 8.5 | 2.4 | 7.0 | 13 | 2,630 | 43.8 |
| 1.0 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 3.06 | 4.0 | 1.7 | 3.7 | 6.4 | 5,260 | 87.66 |
| 2.0 | 1.1 | 1.2 | 1.2 | 1.86 | 2.0 | 1.1 | 1.6 | 2.8 | 10,520 | 175.3 |

Tabla 4.2

| Polar | Templado | Subtropical | Tropical |
|----------|---------------|-------------|------------|
| A Tundra | C Marítimo | E Húmedo | G Moderado |
| B Talga | D Continental | F Árido | H Húmedo |

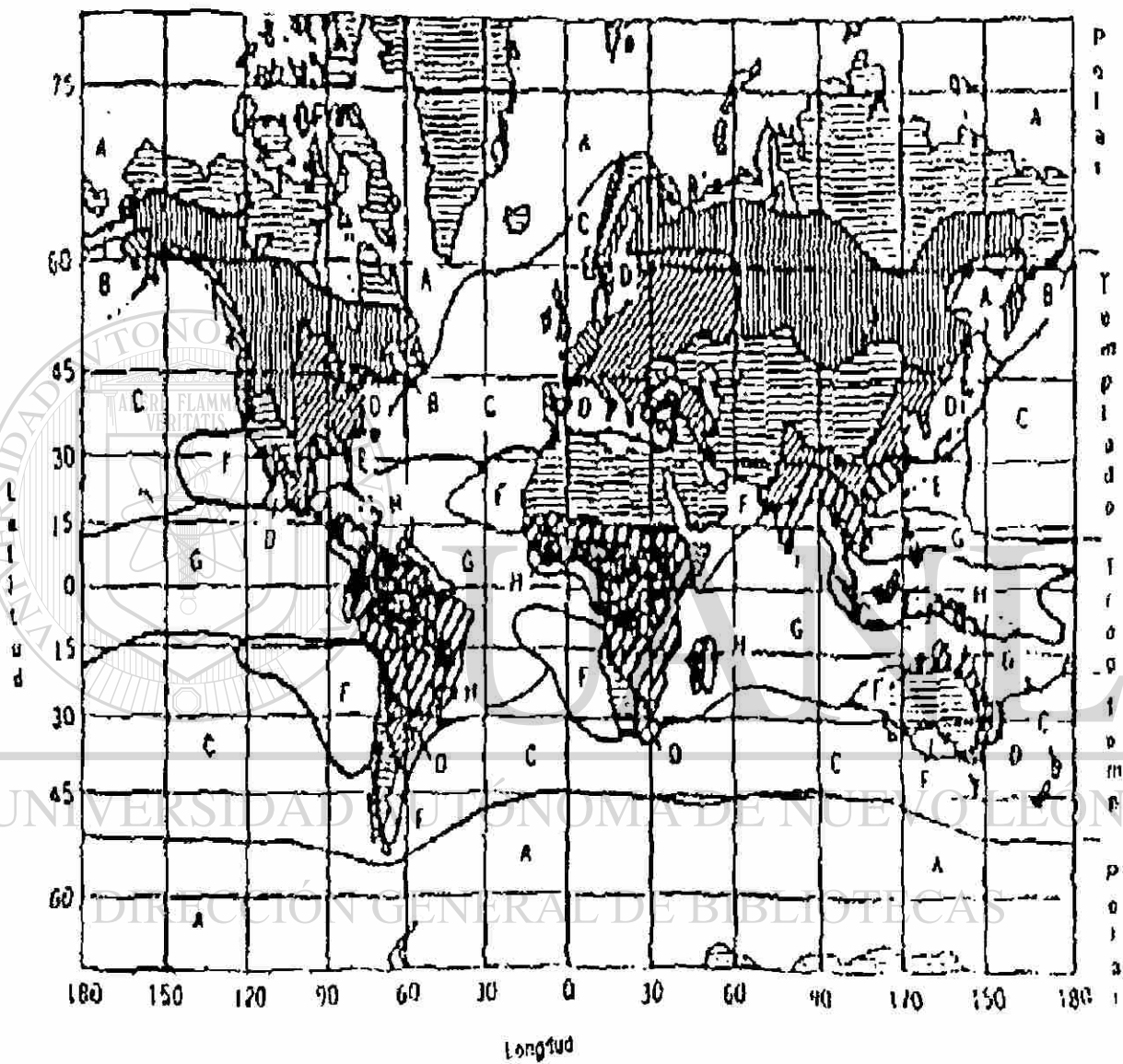


Figura 4.4

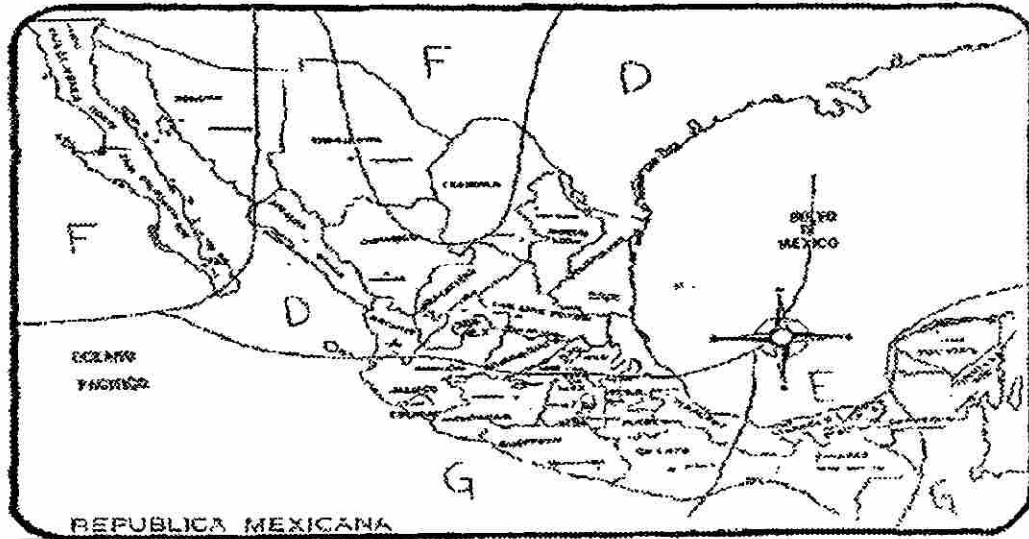
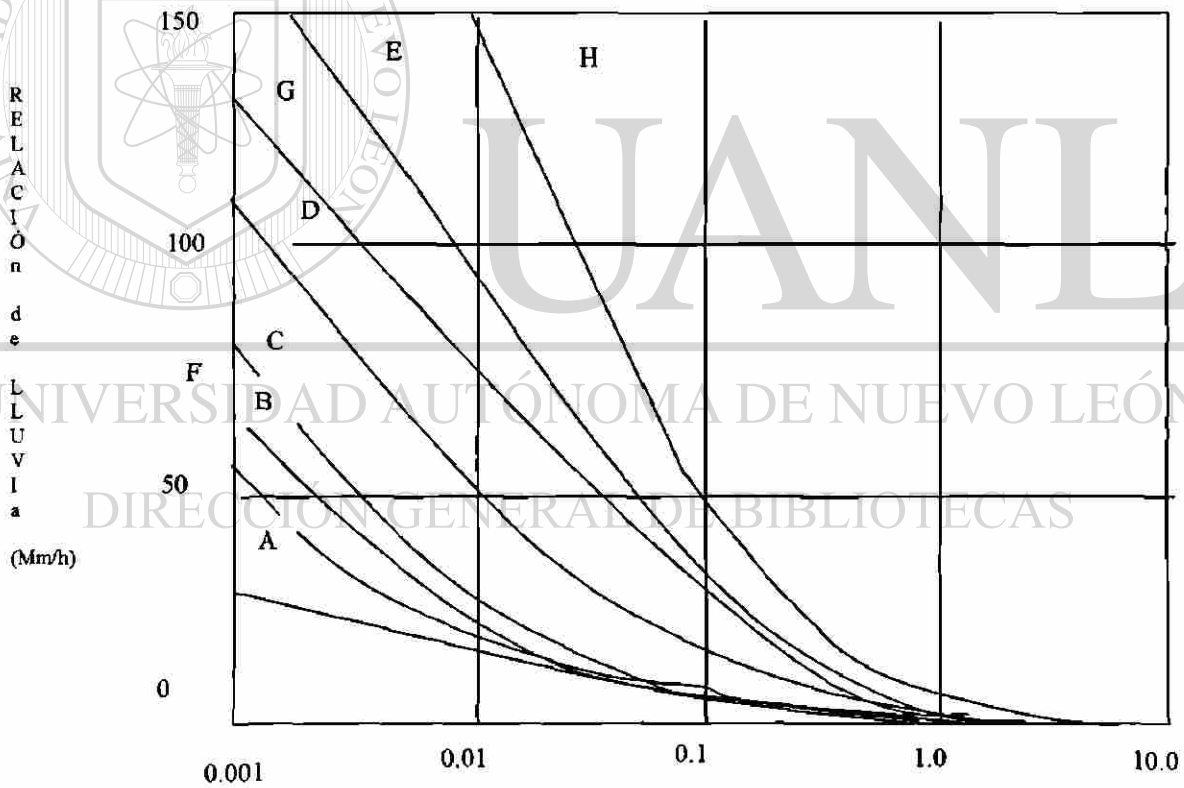


Figura 4.5



Porcentaje del año en el cual se excede la relación de lluvia.

Figura 4.6

4.5.1. DISCUSIÓN DEL MODELO

En enlaces vía satélite la atenuación específica varía con la altura. La temperatura de la atmósfera disminuye con la altura, arriba de cierta altura las partículas de precipitación serán en su totalidad partículas de hielo. La nieve y el hielo no producen atenuación significativa. Solo las regiones en la atmósfera con partículas de agua líquidas son de interés para el cálculo de la atenuación. El tamaño y el número de gotas de lluvia por unidad de volumen varían con la altura. Mediciones de radares climatológicos han demostrado que la reflectividad de un volumen de lluvia varía con la altura, pero en promedio la reflectividad es constante para los 0°C isotérmicos y va decreciendo para valores mayores de altura. La intensidad de lluvia puede ser considerada constante a la altura de los 0°C isotérmicos para intensidades bajas de lluvia, y esta altura se usa para definir la frontera superior de la región de atenuación. Sin embargo, para intensidades de lluvia altas, la correlación entre la altura de 0°C y la altura en la cual las gotas aparecen como líquidas no se puede tomar iguales, porque las gotas líquidas largas son acarreadas arriba de los 0°C debido a la fricción del aire de acuerdo al fuerte núcleo de células de intensa lluvia. Por lo que en este caso debemos estimar la altura de la capa de lluvia apropiada para el enlace antes de proceder al cálculo de la atenuación. La altura de los 0°C isotérmicos dependen de la latitud y las condiciones generales de lluvia.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Con el modelo global, la altura promedio de los 0°C isotérmicos para días con lluvia fue tomada para corresponder a la altura esperada para 1% del año. La altura máxima observada con lluvia ha sido tomada para el verano a una altura de 5°C isotérmicos que corresponde a un valor esperado para 0.001% del año.

Las curvas resultantes de las alturas dependiendo de la latitud, esperadas para intensidades de lluvia puntual de superficie, mostrando la probabilidad de que excedan estos datos desde 1% a 0.001% del año se muestran en la figura 4.7.

La relación entre los valores de la altura de 0°C isotérmicos y los eventos de precipitación excesiva muestran una tendencia de relación lineal entre R_p y la altura de los 0°C isotérmicos H_o , para altos valores de R_p

Para alta intensidad de lluvia, la función de distribución de intensidad de lluvia despliega una relación casi lineal entre R_p y el $\log(P)$ donde P es la probabilidad de ocurrencia. El modelo de interpolación usado para la estimación de H_o para P entre 0.001% y 1%, tiene la forma:

$$H_o = a + b \log (P)$$

Las relaciones usadas para proveer los valores intermedios están en la figura 4.7a. En la figura 4.7b los 0°C isotérmicos están ilustrados para varias latitudes y las estaciones del año.

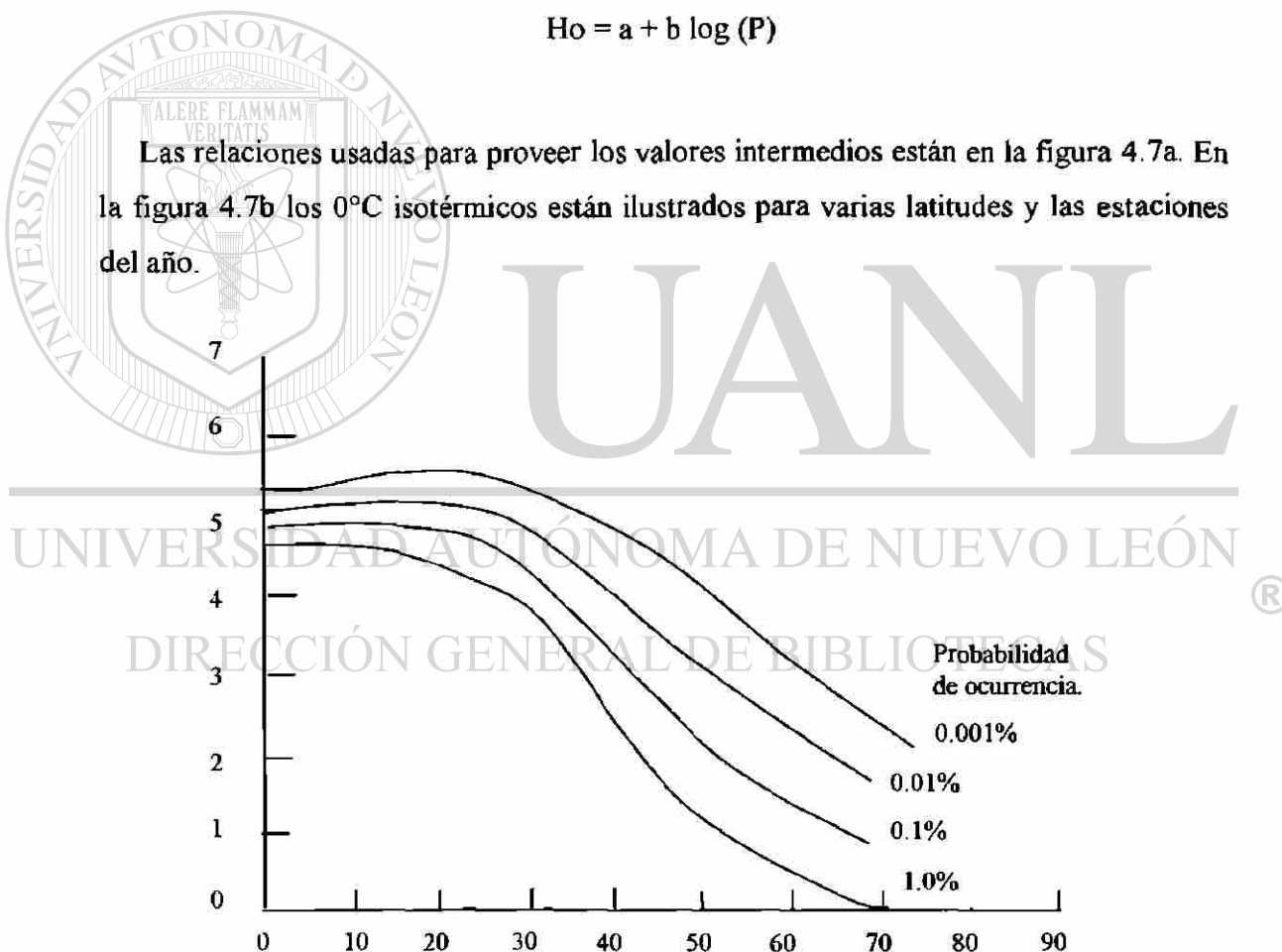
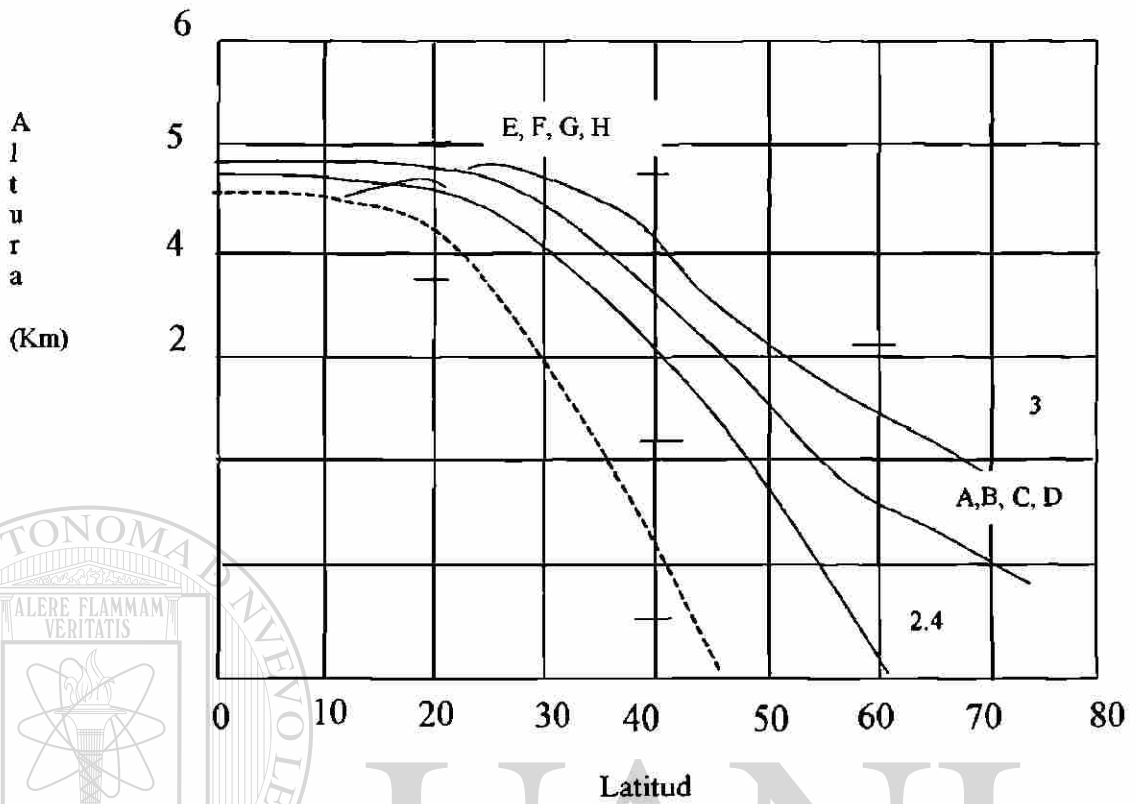


Figura 4.7a



Modelo para la relación lluvia para los climas A a la H.

----- Anual

————— Por estación

- 1.- Invierno
- 2.- Primavera
- 3.- Verano
- 4.- Otoño

Figura 4.7b

4.5.2 EL MODELO DE ATENUACIÓN

Para calcular el exceso de atenuación debido a la lluvia en un enlace vía satélite, primero determinamos la distancia vertical entre la altura o altitud de la estación terminal y la altura de los 0°C isotérmicos. $H_o - H_g$, donde H_g es la altura de la estación para el porcentaje del año o el valor R_p de interés. La distancia de la trayectoria con proyección horizontal D , puede ser calculada de la siguiente manera:

$$D = \frac{H_o - H_g}{\tan \theta} \quad \text{para } \theta \geq 10^\circ$$

$$D = E \Psi \quad (\Psi \text{ en radianes}) \quad \text{para } \theta < 10^\circ$$

Donde:

H_o = altura de los 0°C isotérmicos

H_g = altura de la estación terrestre

θ = ángulo de elevación

E = radio efectivo de la tierra (8500 Km)

Ψ = ángulo central del enlace

Donde:

$$\psi = \sin^{-1} \left\{ \frac{\cos \theta}{H_o + E} \left[(H_g + E)^2 \sin^2 \theta + 2E (H_o - H_g) + H_o^2 - H_g^2 - (H_g + E) \sin \theta \right]^{1/2} \right\}$$

La atenuación específica puede ser calculada para un conjunto de gotas de lluvia si su tamaño y densidad son conocidas. La experiencia ha mostrado que resultados adecuados se pueden obtener usando el modelo LP para obtener un número de densidad, entonces se ajusta una relación para valores calculados para expresar la dependencia de la

atenuación específica basada en frecuencias de lluvia, obteniendo así la relación aproximada entre A y Rp:

$$A = a R_p^b$$

Donde a y b están en función de la frecuencia y la temperatura de la lluvia. A es la atenuación específica (dB/km) y Rp es la intensidad puntual de lluvia (mm/h). La atenuación específica está en función de la frecuencia de operación, los valores apropiados de a y b se pueden obtener de la tabla que se presenta a continuación, (Tabla 4.3) para la trayectoria ascendente y descendente, estos valores se obtienen mediante una regresión.

| Frecuencia f (GHz) | Multiplicador a (f) | Exponente b(f) |
|--------------------|---------------------|----------------|
| 1 | 0.00015 | 0.95 |
| 4 | 0.00080 | 1.17 |
| 5 | 0.00138 | 1.24 |
| 6 | 0.00250 | 1.28 |
| 7.5 | 0.00482 | 1.25 |
| 10 | 0.0125 | 1.18 |
| 12.5 | 0.0228 | 1.145 |
| 15 | 0.0357 | 1.12 |
| 17.5 | 0.0524 | 1.105 |
| 20 | 0.0699 | 1.10 |
| 25 | 0.113 | 1.09 |
| 30 | 0.170 | 1.075 |
| 35 | 0.242 | 1.04 |
| 40 | 0.325 | 0.99 |
| 50 | 0.485 | 0.90 |
| 60 | 0.650 | 0.84 |
| 70 | 0.780 | 0.79 |
| 80 | 0.875 | 0.753 |
| 90 | 0.935 | 0.730 |
| 100 | 0.965 | 0.715 |

Tabla 4.3

4.5.3 CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN DEBIDO A LLUVIA POR LA TÉCNICA DE ALTURA ISOTÉRMICA VARIABLE.

La técnica de altura isotérmica variable está basada en el hecho de que la altura efectiva del medio de atenuación cambia dependiendo del tipo de evento de precipitación, también toma en consideración que varios tipos de eventos de precipitación influyen selectivamente en varios porcentajes del tiempo durante el ciclo de lluvia.

Por lo tanto existe una relación entre la altura isotérmica efectiva y el porcentaje del tiempo en el cual ocurre el evento de precipitación (esta relación fue mostrada anteriormente en la figura 4.7a).

La atenuación total se obtiene integrando la atenuación específica a través de la trayectoria del enlace. La ecuación resultante que se usa para calcular la atenuación a través de la trayectoria "A", es:

$$A = \frac{aRp^b}{\cos \theta} \left\{ \frac{e^{Uz} * -1}{Ub} - \frac{X^b e^{YZ}}{Yb} + \frac{X^b e^{YZ}}{Yb} \right\} \theta \geq 10^\circ$$

Donde U, X, Y y Z, son constantes empíricas que dependen de la relación puntual de lluvia. Estas constantes son:

$$U = \frac{1}{Z} [\ln(Xe^{YZ})]$$

$$X = 2.3Rp^{-0.17}$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(Rp)$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(Rp)$$

Para ángulos de elevación menores ($\theta < 10^\circ$)

$$A = \frac{L}{D} aRp^b \left[\frac{e^{Uzb} - 1}{Ub} - \frac{X^b e^{Yzb}}{Yb} + \frac{X^b e^{YDb}}{YB} \right]$$

Donde

$$L = [(E + Hg)^2 + (E + Ho)^2 - 2(E + Hg) \cos \psi]^{1/2}$$

ψ es el ángulo central de la trayectoria.

4.5.4 PASOS A SEGUIR PARA APLICAR EL MODELO DE ALTURA ISOTÉRMICA VARIABLE A UNA TRAYECTORIA GENERAL TIERRA - ESPACIO, ESPACIO - TIERRA.

Paso # 1.- Con la latitud y longitud de la estación terrena, obtener la región apropiada de clima de las ocho regiones (A - H), usando las figuras 4.3, 4.4 ó 4.5. Sin embargo si se tienen estadísticas de precipitación de largo plazo para la localidad de la estación terrena, es conveniente usar estos datos en lugar de las regiones para mayor precisión.

Paso # 2.- Seleccionar la posibilidad de ocurrencia (P) que cubra el rango de interés en términos del porcentaje del tiempo en el cual la intensidad de lluvia es excedido. Esto por supuesto está basado en la disponibilidad requerida para el enlace. Si la disponibilidad del enlace requerida es de 99.9%, entonces P debe ser igual a 0.1%

Paso # 3.- Obtener la relación puntual de lluvia Rp (mm/h) usando la tabla 4.2 o valores medidos previamente si se dispone de la información. Esto es la relación de

lluvia versus el porcentaje del año en el cual es excedido en la región climática y probabilidades de ocurrencia (paso #2).

Paso # 4.- Para un enlace vía satélite a través de la atmósfera entera, obtener la altura de la capa de lluvia de la altura de los 0°C isotérmicos (capa de derretimiento) H_o , con la latitud de la estación terrena usando la figura 4.7ª. Las alturas varían de acuerdo a las probabilidades de ocurrencia. Para interpolar, trazar H_o (P) versus \log (P) y usar una línea recta para relacionar H_o a P.

Paso # 5.- Obtener la proyección horizontal de la trayectoria D, de la trayectoria oblicua a través del volumen de lluvia:

$$D = \frac{H_o - H_g}{\tan \theta} \quad \theta \geq 10^\circ$$

$H_o = H_o$ (P) = altura (Km) 0°C isotérmicos para la probabilidad P

H_g = Altura de la estación terrena (Km)

θ = Angulo de elevación del enlace.

Paso # 6.- Comparar $D \leq 22.5$ Km; si es verdadero continuar con el paso # 7. Pero si $D \geq 22.5$ Km, la trayectoria tiende a tener el mismo valor de atenuación que una trayectoria de 22.5 Km, pero la probabilidad de ocurrencia es ajustada de la siguiente manera:

Nueva probabilidad de ocurrencia,

$$P' = P \left(\frac{D}{22.5 \text{ Km}} \right)$$

Donde D es la longitud de la trayectoria en la superficie (> 22.5 K).

Paso # 7.- Obtener los parámetros $a(f)$ y $b(f)$, relacionando la atenuación específica a la relación de lluvia, de la tabla 4.3.

Paso # 8.- Calcular la atenuación total debido a la lluvia usando R_p , a , b θ y D :

$$A = \frac{aR_p^b}{\cos\theta} \left[\frac{e^{UZb} - 1}{Ub} - \frac{X^b e^{YZb}}{Yb} + \frac{X^b e^{YDb}}{Yb} \right] \theta \geq 10^\circ$$

Donde:

A = Atenuación total de la trayectoria debido a lluvia (dB)

a, b = Parámetros que relacionan la atenuación específica a la relación de lluvia

(paso #7)

Atenuación específica:

$$\alpha = aR_p^b$$

R_p = Relación puntual de lluvia (paso # 3)

θ = Angulo de elevación de la trayectoria

D = Distancia horizontal de la trayectoria (paso # 5) $Z \leq D \leq 22.5$ Km si $D < Z$, entonces:

$$A = \frac{aR_p^b}{\cos\theta} \left[\frac{e^{UbD} - 1}{Ub} \right]$$

o si $D = 0$, $\theta = 90^\circ$, entonces:

$$A = (H_o - H_g) (a R_p)^b$$

4.6 MODELO PROPUESTO POR LA ITU - R

Tanto para el enlace ascendente como para el descendente, la portadora debe cruzar la atmósfera. Son dos las regiones de la atmósfera que tienen influencias sobre la señal, la troposfera y la ionosfera. La troposfera se extiende prácticamente desde la superficie de la tierra hasta una altura aproximada de 15 Km. La ionosfera está situada entre 70 Km y 1000 Km aproximadamente.

La ocurrencia de precipitación se define como el porcentaje del tiempo durante el cual se excede un nivel de intensidad dado, intensidades bajas con efectos despreciables corresponden a altos porcentajes del tiempo (típicamente 20%), estas condiciones se definen como "cielo despejado". Las intensidades altas de lluvia con efectos significativos, corresponden a porcentajes de tiempo bajos (típicamente 0.01%), estas condiciones pueden degradar la señal de manera considerable.

La intensidad de precipitación. Es medida por la relación de lluvia R_p expresada en (mm/h). La estadística de precipitación esta dada por la distribución de probabilidad acumulada, que indica el porcentaje del año $p(\%)$ durante el cual un valor dado de relación de R_p es excedido.

4.6.1 -PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO

$R_{0.01}$: relación puntual de lluvia en la localidad para el 0.01% del año

h_s :Altura sobre el nivel del mar de la estación terrena (Km)

θ :Angulo de elevación

ϕ :Latitud de la estación terrena (grados)

f :Frecuencia de operación (GHz)

Con estos datos podemos calcular:

h_r : altura de la lluvia para la latitud ϕ

L_s : Longitud inclinada de la trayectoria (Km)

L_G : Proyección horizontal de la trayectoria inclinada (Km)

$r_{0.01}$: Factor de reducción para el 0.01% del tiempo

γ_r : Atenuación específica (dB/Km)

$A_{0.01}$: Atenuación excedida para el 0.01% del año

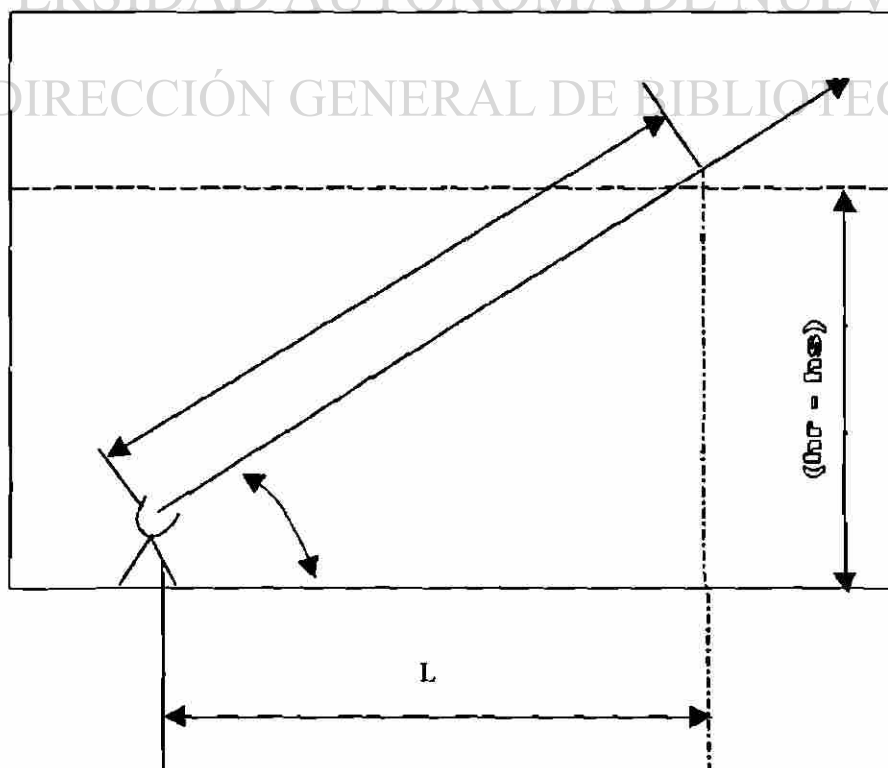
Representación esquemática de la trayectoria - espacio para el modelo de atenuación.

A: Precipitación congelada

B: Altura de la lluvia

C: Precipitación líquida

D: Trayectoria tierra - espacio.



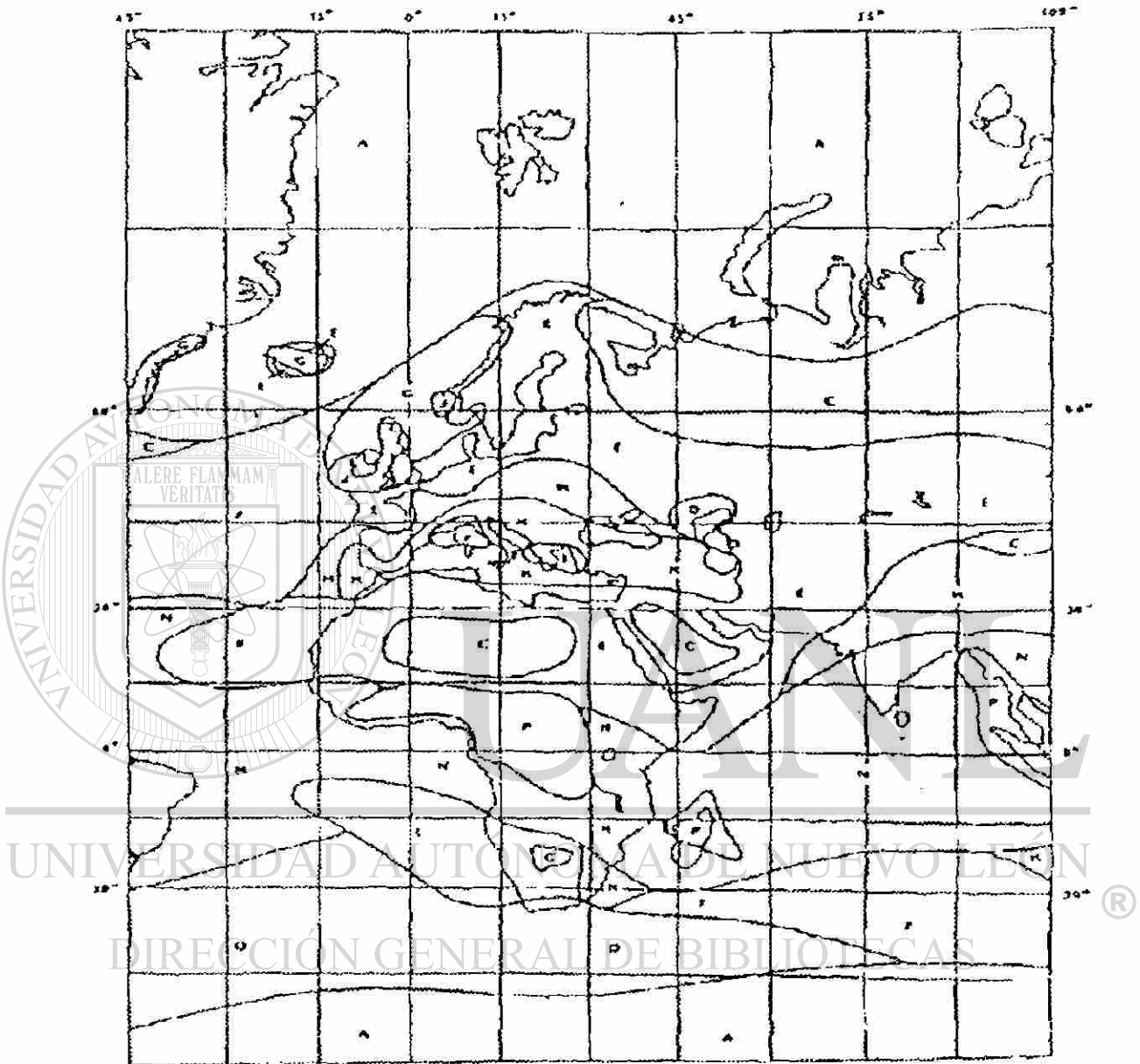


Figura 4.9.

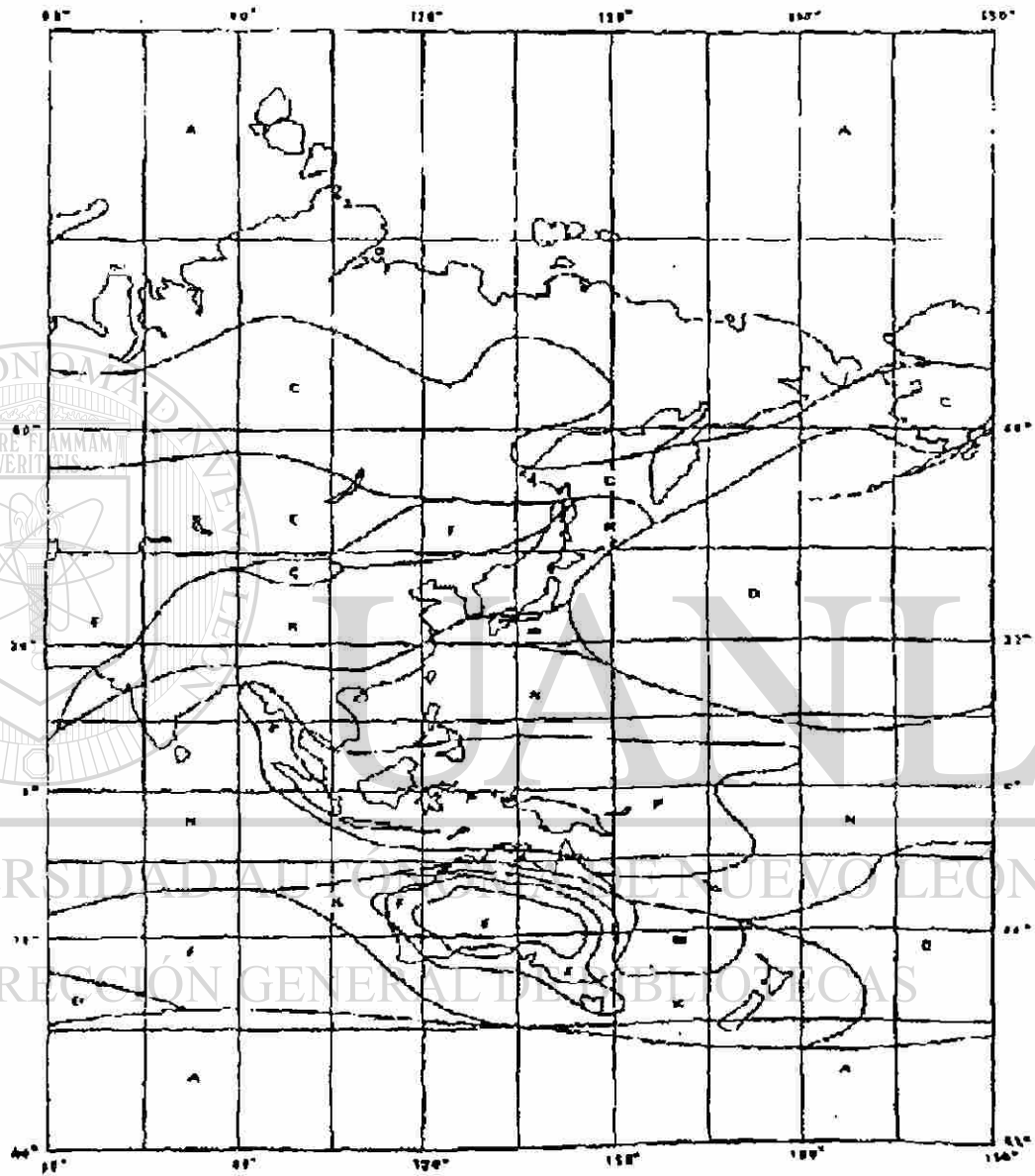


Figura 4.10

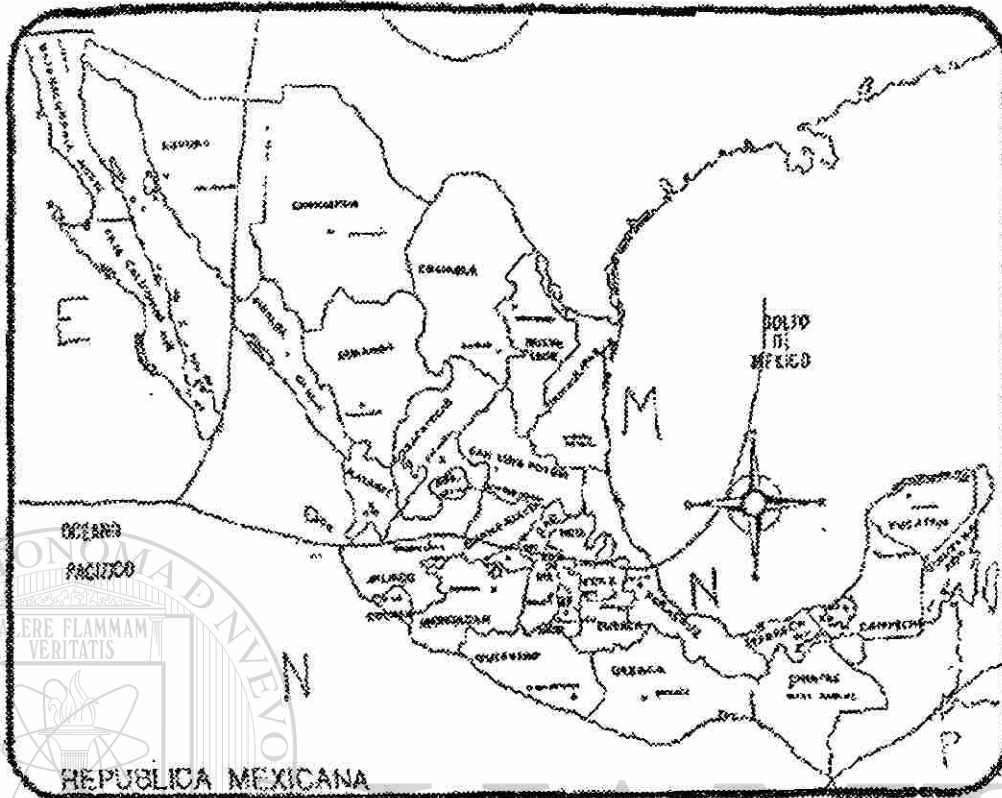


Figura 4.11

4.6.2 PASOS A SEGUIR PARA APLICAR EL MODELO A UNA TRAYECTORIA GENERAL TIERRA - ESPACIO, ESPACIO - TIERRA

El método propuesto por ITU- R consiste en siete pasos para el cálculo de la atenuación que excede el 0.01% del año y un octavo paso para otros porcentajes.

Paso # 1.- La altura de la lluvia h_R se calcula a partir de la latitud de la estación terrena.

$$h_R = 4.0 \quad 0 < \varphi < 36^\circ$$

$$h_R = 4.0 - 0.075 (\varphi - 36) \quad \varphi \geq 36^\circ$$

Paso # 2.- Para $\theta \geq 5^\circ$ la trayectoria inclinada L_s por debajo de la altura de la lluvia se obtiene de:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\text{sen } \theta} \quad (\text{Km})$$

Para $\theta < 5^\circ$ se debe usar una fórmula más precisa:

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{[\text{sen}^2 \theta + 2(h_R - h_s) / \text{Re}]^{1/2} + \text{sen } \theta}$$

Paso # 3. La proyección horizontal L_G de la trayectoria inclinada se encuentra de:

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (\text{Km})$$

Paso # 4.- El factor de reducción es $r_{0.01}$ para 0.01% del tiempo puede ser calculado de la siguiente manera

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.045 L_G}$$

Paso # 5.- Obtener la intensidad de lluvia $R_{0.01}$ excedida para 0.01% del año. Esto se puede estimar usando los mapas de las figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11 y de la siguiente tabla. (4.4)

| % t | A | B | C | D | E | F | G | H | J | K | L | M | N | P |
|-------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1.0 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 8 | 2 | 2 | 4 | 5 | 12 |
| 0.3 | 1 | 2 | 3 | 5 | 3 | 4 | 7 | 4 | 13 | 6 | 7 | 11 | 15 | 34 |
| 0.1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 6 | 8 | 12 | 10 | 20 | 12 | 15 | 22 | 35 | 65 |
| 0.03 | 5 | 6 | 9 | 13 | 12 | 15 | 20 | 18 | 28 | 23 | 33 | 40 | 65 | 105 |
| 0.01 | 8 | 12 | 15 | 19 | 22 | 28 | 30 | 32 | 35 | 42 | 60 | 63 | 95 | 145 |
| 0.003 | 14 | 21 | 26 | 29 | 41 | 54 | 45 | 55 | 45 | 70 | 105 | 95 | 140 | 200 |
| 0.001 | 22 | 32 | 42 | 42 | 70 | 78 | 65 | 83 | 55 | 100 | 150 | 120 | 180 | 250 |

Tabla 4.4

Paso # 6.- Obtener la atenuación específica γ_r , usando los coeficientes que dependen de la frecuencia que se dan en la siguiente tabla (4.5) (los subíndices de las constantes indican el tipo de polarización, horizontal o vertical) y la relación de lluvia (paso #5), para usar la siguiente relación:

$$\gamma_r = a (R0.01)^b$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

| Frecuencia (GHz) | ah | av | bh | bv |
|------------------|-----------|-----------|-------|-------|
| 1 | 0.0000387 | 0.0000352 | 0.912 | 0.880 |
| 2 | 0.000154 | 0.000138 | 0.963 | 0.923 |
| 4 | 0.000650 | 0.000591 | 1.121 | 1.075 |
| 6 | 0.00175 | 0.00152 | 1.308 | 1.265 |
| 7 | 0.00301 | 0.00265 | 1.332 | 1.312 |
| 8 | 0.00454 | 0.0395 | 1.327 | 1.310 |
| 10 | 0.0101 | 0.00887 | 1.276 | 1.264 |
| 12 | 0.0188 | 0.0168 | 1.217 | 1.200 |
| 15 | 0.0367 | 0.0335 | 1.154 | 1.128 |
| 20 | 0.0751 | 0.0691 | 1.099 | 1.065 |
| 25 | 0.125 | 0.113 | 1.061 | 1.030 |
| 30 | 0.187 | 0.167 | 1.021 | 1.000 |
| 35 | 0.267 | 0.233 | 1.979 | 0.963 |
| 40 | 0.350 | 0.310 | 0.939 | 0.929 |
| 45 | 0.442 | 0.393 | 0.903 | 0.897 |
| 50 | 0.536 | 0.479 | 0.873 | 0.868 |
| 60 | 0.707 | 0.642 | 0.826 | 0.824 |
| 70 | 0.851 | 0.784 | 0.793 | 0.793 |
| 80 | 0.975 | 0.906 | 0.769 | 0.769 |
| 90 | 1.06 | 0.999 | 0.753 | 0.754 |
| 100 | 1.12 | 1.06 | 0.743 | 0.744 |
| 120 | 1.18 | 1.13 | 0.731 | 0.732 |
| 150 | 1.31 | 1.27 | 0.710 | 0.711 |
| 200 | 1.45 | 1.42 | 0.689 | 0.690 |
| 300 | 1.36 | 1.32 | 0.688 | 0.689 |
| 400 | 1.32 | 1.31 | 0.683 | 0.684 |

Tabla 4.5

Paso # 7.- La atenuación excedida para 0.01% del año, se obtiene de la siguiente forma:

$$A_{0.01} = \gamma r L_s r 0.01 \quad (\text{dB})$$

Paso # 8.- La atenuación que excede otros porcentajes del año en el rango de 0.001% a 1%, puede ser calculado a partir de la atenuación para 0.01% del año usando la siguiente relación:

$$\frac{Ap}{A_{0.01}} = 0.12 p^{-(0.546 + 0.043 \log p)}$$

Esta formula de interpolación de factores de 0.12, 0.38, 1 y 2.14 para 1%, 0.1%, 0.01% y 0.001% respectivamente.

4.7. APLICACIÓN DE LOS MODELOS A CIUDADES DE LA REPÚBLICA MEXICANA.

4.7.1 CALCULO DEL ÁNGULO DE ELEVACIÓN

El ángulo de elevación se calcula con la siguiente formula:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left[\frac{\cos \mu - RT / (RT + h)}{[\text{sen } \mu]} \right]$$

$$\mu = \cos^{-1}(\cos(\text{lat}) \cos(\Delta L))$$

ΔL = Longitud del satélite - longitud de la ciudad (estación terrena).

Donde:

lat :Es la latitud de la estación terrena

RT :Es el radio de la tierra ≈ 6378 km

H :Altura del satélite sobre el nivel del mar ≈ 36000 km (para satélites geostacionarios).

ΔL :Es la separación angular entre la longitud de la estación terrena y la longitud del satélite.

Nótese que:

$$RT/(RT + h) = 150.5026 \text{ E } -3$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
4.7.2 CÁLCULO PARA ENSENADA, BAJA CALIFORNIA NORTE ®
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Datos Generales:

Ubicación Geográfica de Ensenada:

Latitud Norte = 31.52°

Longitud Oeste = 116.37°

Altura promedio sobre el nivel del mar = 13 m.

Suponer que el enlace se hace a través del satélite satcom C5 cuya longitud oeste es $\lambda_e = 139^\circ$.

Cálculo del ángulo de elevación:

$$\Delta L = 139^\circ - 116.37^\circ = 22.63^\circ$$

$$\mu = \cos^{-1}(\cos(31.52^\circ) \cos(22.63^\circ)) = 38.11$$

$$\theta = \tan^{-1}\left[\frac{\cos(38.11) - 150.5026E-3}{\sin(38.11)}\right] = 45.875^\circ$$

4.7.2a MODELO GLOBAL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La región climática de acuerdo a la figura 4.5 es la "F"

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.7.2 a1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 15 GHZ

La disponibilidad requerida es 99.99% por lo tanto $p = 0.01\%$

De la figura 4.7a, obtenemos $H_0 = 4.7 \text{ Km}$

$$D = \frac{4.7Km - 0.013Km}{\tan(45.875^\circ)} = 4.546Km$$

De la tabla 4.2, obtenemos $R_p = 23 \text{ mm/h}$

Se obtienen los valores de $a(f)$ y $b(f)$ a partir de la tabla 4.3:

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

Cálculo de las constantes empíricas:

$$X = 2.3 (23)^{-0.17} = 1.3497$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(23) = -0.06806$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(23) = 1.9187$$

$$U = \frac{1}{1.9187} [\ln(1.3497 e^{((-0.06806 \times 1.9187)})}] = 0.088234$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Sustituyendo en la siguiente ecuación, se obtiene la atenuación debido a lluvia para el enlace:

$$A = \frac{aR_p^b}{\cos \theta} \left\{ \frac{e^{UZb} - 1}{Ub} - \frac{X^b e^{YZb}}{Yb} + \frac{X^b e^{YZb}}{Yb} \right\}$$

$$A = 8.57459 \text{ dB}$$

4.7.2 a2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ

$$H_o = 4.7 \text{ km}$$

$$D = 4.546 \text{ km}$$

$$p = 0.01 \%$$

$$R_p = 23 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

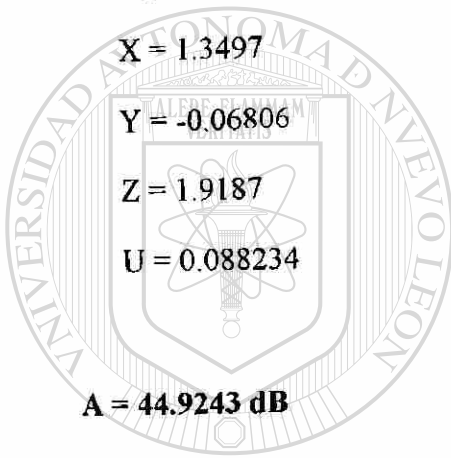
$$X = 1.3497$$

$$Y = -0.06806$$

$$Z = 1.9187$$

$$U = 0.088234$$

$$A = 44.9243 \text{ dB}$$



UANL

4.7.2 a3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 15 GHZ

$$p = 0.1\%$$

$$H_o = 4.1 \text{ km}$$

$$D = \frac{4.1\text{Km} - 0.013\text{Km}}{\tan(45.875^\circ)} = 3.964\text{Km}$$

$$R_p = 5.5 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

$$X = 2.3 (5.5)^{-0.17} = 1.7213$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

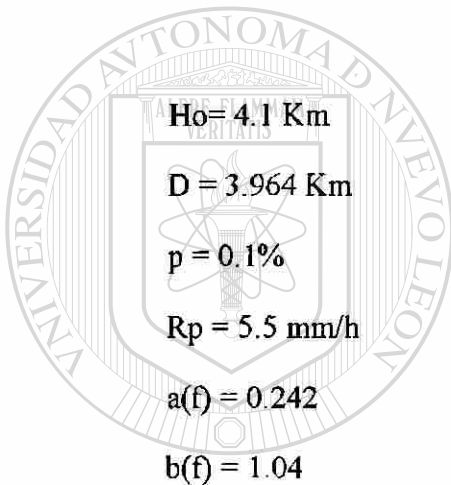
$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(5.5) = 0.025142$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(5.5) = 2.777$$

$$U = \frac{1}{2.777} [\ln(1.7213e^{((-0.025142) \times 2.777)})] = 0.17042$$

$$A = 1.9536 \text{ dB}$$

4.7.2a4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

$$X = 1.7213$$

$$Y = -0.025142$$

$$Z = 2.777$$

$$U = 0.17042$$

$$A = 11.256 \text{ dB}$$

4.7.2.b. MODELO ITU - R

Como $\varphi = 31.52^\circ$, $H_R = 4 \text{ Km}$

$$Ls = \frac{(4 - 0.013)}{\sin(45.875^\circ)} = 5.5543 \text{ Km}$$

$$LG = (5.5543) \cos(45.875^\circ) = 3.86705 \text{ Km}$$

$$r_{0.01} \frac{1}{1 + 0.045(3.86705)} = 0.85177$$

De acuerdo a la figura 4.8, la región de lluvia es la E.

De la tabla 4.4, obtenemos; $R_{0.01} = 22 \text{ mm/h}$

4.7.2 b1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 15 GHZ.

Suponer que la señal tiene una polarización vertical.

Obtenemos los valores de las constantes que dependen de la frecuencia de la tabla

4.5.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$a_v = 0.0335$$

$$b_v = 1.128$$

Cálculo de la atenuación específica.

$$\gamma_r = (0.0335)(22)^{(1.128)} \approx 1.0947$$

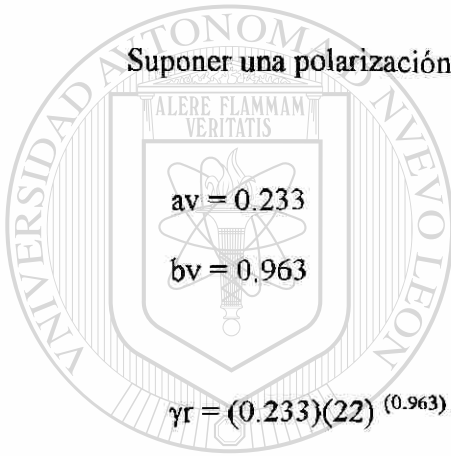
Cálculo de la atenuación total:

$$A_{0.01} = (1.0947) (5.5543) (0.85177)$$

$$A_{0.01} = 5.179 \text{ dB}$$

4.7.2b2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ.

Suponer una polarización vertical.



$$\gamma r = (0.233)(22)^{(0.963)} = 4.572$$

$$A_{0.01} = (4.572) (5.5543) (0.85177) = 21.63$$

$$A = 21.63 \text{ dB}$$

4.7.2 b3 DISPONIBILIDAD 99.9 %, F = 15 GHZ

$$A_{0.1} = (0.38)(5.179)$$

$$A = 1.968 \text{ dB}$$

4.7.2 b4 DISPONIBILIDAD 99.9% F = 35 GHZ

$$A_{0.1} = (0.38) (21.63)$$

$$A = 8.2194 \text{ dB}$$

4.7.3 CÁLCULO PARA HERMOSILLO, SONORA.

Datos generales:

Ubicación geográfica de Hermosillo:

$$\text{Latitud Norte} = 29.04^\circ$$

$$\text{Longitud Oeste} = 110.58^\circ$$

$$\text{Altura promedio sobre el nivel del mar} = 237 \text{ m}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Suponer que el enlace se hace a través del satélite solidaridad II cuya longitud oeste es de 113.6°

Cálculo del ángulo de elevación

$$\Delta L = 113.6^\circ - 110.58^\circ = 3.02^\circ$$

$$\mu = \cos^{-1} (\cos (29.04^\circ) \cos (3.02^\circ)) = 29.183$$

$$\theta = \text{tg}^{-1}\left[\frac{\cos(29.183) - 150.5026E-3}{\text{sen}(29.183)}\right] = 55.987^\circ$$

4.7.3 a MODELO GLOBAL

La región climática de acuerdo a la figura 4.5 es la "F"

4.7.3 a1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 14.348 GHZ

La disponibilidad requerida es 99.99%, por lo tanto $p = 0.01\%$

De la figura 4.7a, obtenemos $H_0 = 4.4 \text{ Km}$

$$D = \frac{4.4 \text{ Km} - 0.237 \text{ Km}}{\tan(55.987^\circ)} = 2.80935 \text{ Km}$$

De la tabla 4.2, obtenemos $R_p = 23 \text{ mm/h}$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la aplicación del modelo se usará la frecuencia de operación del transponder 14K del satélite *solidaridad II* que corresponde a 14.348 Ghz (frecuencia ascendente).

Interpolando para obtener los valores de $a(f)$ y $b(f)$ a partir de la tabla 4.3, se obtiene como resultado:

$$a(f) = 0.032335$$

$$b(f) = 1.12652$$

Cálculo de las constantes empíricas:

$$X = 2.3 (23)^{-0.17} = 1.3497$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln (23) = -0.06806$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln (23) = 1.9187$$

$$U = \frac{1}{1.9187} [\ln(1.3497 e^{((-0.06806) \times 1.9187)})] = 0.088234$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación, se obtiene la atenuación debido a lluvia para el enlace:

$$A = \frac{aRp^b}{\cos \theta} \left\{ \frac{e^{Uzb} - 1}{Ub} - \frac{X^b e^{Yzb}}{Yb} + \frac{X^b e^{YDb}}{Yb} \right\}$$

$$A = 6.23838 \text{ dB}$$

4.7.3 a2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F =35 GHZ

$$H_o = 4.9 \text{ Km}$$

$$D = 3.146773 \text{ Km}$$

$$p = 0.01\%$$

$$R_p = 23 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$B(f) = 1.04$$

$$X = 1.3497$$

$$Y = -0.06806$$

$$Z = 1.9187$$

$$U = 0.088234$$

$$A = 35.2756 \text{ dB}$$

4.7.3 a3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 14.348 GHZ

$$p = 0.1\%$$

$$H_0 = 4.4 \text{ Km}$$

$$D = \frac{4.4 \text{ Km} - 0.237 \text{ Km}}{\tan(55.987^\circ)} = 2.80935 \text{ Km}$$

$$R_p = 5.5 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.032335$$

$$b(f) = 1.12652$$

$$X = 2.3 (5.5)^{-0.17} = 1.7213$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(5.5) = -0.025142$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(5.5) = 2.777$$

$$U = \frac{1}{2.777} [\ln(1.7213 e^{((-0.025142)(2.777)})}] = 0.17042$$

$$A = 1.46875$$

4.7.3 a4 DISPONIBILIDAD 99.9% F = 35 GHZ

$$H_o = 4.4 \text{ Km}$$

$$D = 2.80935 \text{ Km}$$

$$p = 0.1\%$$

$$R_p = 5.5 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

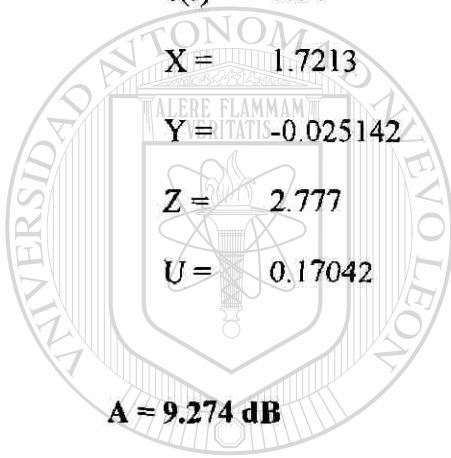
$$X = 1.7213$$

$$Y = -0.025142$$

$$Z = 2.777$$

$$U = 0.17042$$

$$A = 9.274 \text{ dB}$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

4.7.3 b MODELO ITU-R

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
La región de lluvia es la "E"

Como $\varphi = 29.04^\circ$, $h_R = 4 \text{ Km}$

$$L_s = \frac{(4 - 0.237)}{\text{sen}(55.987^\circ)} = 4.5397 \text{ Km}$$

$$L_G = (4.5397) \cos(55.987^\circ) = 2.5394 \text{ Km}$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.045(2.5394)} = 0.89745$$

De acuerdo a la figura 4.8, la región de lluvia es la E.

De la tabla 4.4, obtenemos: $R_{0.01} = 22 \text{ mm/h}$

4.7.3 b1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 14.348 GHZ.

La frecuencia ascendente para el transponder 14K tiene polarización horizontal.

Obtenemos los valores de las constantes que dependen de la frecuencia (a_h y b_h , porque la señal lleva polarización horizontal), interpolando los valores de la tabla 4.5. para f obtenemos:

$$a_h = 0.03281$$

$$b_h = 1.1677$$

Cálculo de la atenuación específica:

$$\gamma_r = (0.03281)(22)^{(1.1677)} = 1.21214$$

Cálculo de la atenuación total

$$A_{0.01} = (1.21214)(4.5397)(0.89745)$$

$$A_{0.01} = 4.93844 \text{ dB}$$

4.7.3 b2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ.

Suponer una polarización vertical

$$a_v = 0.233$$

$$b_v = 0.963$$

$$\gamma_r = (0.233)(22)^{(0.963)} = 4.572$$

$$A_{0.01} = (4.572) (4.5397) (0.89745) = 18.627$$

$$A = 18.627 \text{ Db}$$

4.7.3 b3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 14.348 GHZ

$$A_{0.1} = (0.38) (4.93844) = 1.8766$$

$$A = 1.8766 \text{ dB}$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.7.3 b4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ

$$A_{0.1} = (0.38) (18.627) = 7.07826$$

$$A = 7.07826 \text{ dB}$$

4.7.4. CÁLCULO PARA MONTERREY, NUEVO LEÓN

Datos Generales:

Ubicación geográfica de Monterrey;

Longitud Norte = 25.4°

Longitud Oeste = 100.19°

Altura promedio sobre el nivel del mar = 538 m

Suponer que el enlace se hace a través del satélite Anik E2 cuya longitud oeste es de $= 107.3$

Cálculo del ángulo de elevación:

$$\Delta L = 107.3^\circ - 100.19^\circ = 7.11^\circ$$

$$\mu = \cos^{-1}(\cos(25.4^\circ) \cos(7.11^\circ)) = 26.3126$$

$$\theta = \tan^{-1}\left[\frac{\cos(26.3126) - 150.5026E-3}{\sin(26.3126)}\right] = 59.2776^\circ$$

4.7.4a MODELO GLOBAL

La región climática de acuerdo a la figura 4.5 es la "D".

4.7.4 a1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 15 GHZ

La disponibilidad requerida es 99.99%, por lo tanto $p = 0.01\%$

De la figura 4.7a, obtenemos $H_o = 5 \text{ Km}$

$$D = \frac{5\text{Km} - 0.538\text{Km}}{\tan(59.2776^\circ)} \approx 2.6517\text{Km}$$

De la tabla 4.2, obtenemos $R_p = 49.667 \text{ mm/h}$

Se obtienen los valores de $a(f)$ y $b(f)$ a partir de la tabla 4.3:

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

Calculo de las constantes empíricas:

$$X = 2.3 (49.667)^{-0.17} = 1.18412$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(49.667) = -0.09116$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(49.667) = 1.4568$$

$$U = \frac{1}{1.4568} [\ln(1.18412 e^{((-0.09116)(1.4568)})}] = 0.024847$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación, se obtiene la atenuación debido a lluvia para el enlace:

$$A = \frac{aR_p^b}{\cos\theta} \left\{ \frac{e^{UZb} - 1}{Ub} - \frac{X^b e^{YZb}}{Yb} + \frac{X^b e^{YDb}}{Yb} \right\}$$

$$A = 14.741 \text{ dB}$$

4.7.4 a2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ

$$H_o = 5 \text{ Km}$$

$$D = 2.6517 \text{ Km}$$

$$p = 0.01\%$$

$$R_p = 49.667 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.1842$$

$$Y = -0.09116$$

$$Z = 1.4568$$

$$U = 0.024847$$

$$A = 73.097 \text{ dB}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.7.4 a3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 15 GHZ

$$p = 0.1\%$$

$$H_o = 4.6 \text{ km}$$

$$D = \frac{4.6 \text{ Km} - 0.538}{\tan(59.2776^\circ)} = 2.414 \text{ Km}$$

$$R_p = 16 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

$$X = 2.3 (16)^{-0.17} = 1.43558$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(16) = -0.057177$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(16) = 2.13644$$

$$U = \frac{1}{2.13644} [\ln(1.43558 e^{((0.057177)(2.13644))})] = 0.11206$$

$$A = 4.38198 \text{ dB}$$

4.7.4. a4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

$$H_o = 4.6 \text{ Km}$$

$$D = 2.414 \text{ Km}$$

$$p = 0.1\%$$

$$R_p = 16 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.43558$$

$$Y = -0.057177$$

$$Z = 2.13644$$

$$U = 0.11206$$

$$A = 23.533 \text{ dB}$$

4.7.4 b MODELO ITU-R

Como $\varphi = 25.4^\circ$, $h_R = 4 \text{ Km}$

$$L_s = \frac{(4 - 0.538)}{\sin(59.2776^\circ)} = 4.0272 \text{ Km}$$

$$L_G = (4.0272) \cos(59.2776^\circ) = 2.0574 \text{ Km}$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.045(2.0574)} = 0.91526$$

De acuerdo a la figura 4.8, la región de lluvia es la M

De la tabla 4.4, obtenemos: $R_{0.01} = 63 \text{ mm/h}$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

4.7.4 b1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F= 15 GHZ

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Suponer que la señal tiene una polarización vertical.

Obtenemos los valores de las constantes que dependen de la frecuencia de la tabla 4.5:

$$a_v = 0.0335$$

$$b_v = 1.128$$

Cálculo de la atenuación específica:

$$\gamma_r = (0.0335) (63)^{(1.128)} = 3.58675$$

Cálculo de la atenuación total:

$$A_{0.01} = (3.58675) (4.0272) (0.91526)$$

$$A_{0.01} = 13.2205 \text{ dB}$$

4.7.4 b2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ

Suponer una polarización vertical

$$a_v = 0.233$$

$$b_v = 0.963$$

$$\gamma_r = (0.233) (63)^{(0.963)} = 12.5927$$

$$A_{0.01} = (12.5927) (4.0272) (0.91526)$$

$$A = 46.41587 \text{ dB}$$

4.7.4 b3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 15 GHZ.

$$A_{0.1} = (0.38) (13.2205)$$

$$A = 5.0238 \text{ dB.}$$

4.7.4 b4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

$$A_{0.1} = (0.38) (46.41587)$$

$$A = 17.638 \text{ dB}$$

4.7.5 CÁLCULO PARA MÉXICO DF.

Datos Generales:

Ubicación geográfica de México DF.

$$\text{Latitud Norte} = 19.35^\circ$$

$$\text{Longitud Oeste} = 99.01^\circ$$

$$\text{Altura Promedio sobre el nivel del Mar} = 2400 \text{ m.}$$

Suponer que el enlace se hace a través del satélite Solidaridad II cuya longitud oeste es de $= 113.6^\circ$.

Cálculo del ángulo de elevación:

$$\Delta L = 113.6^\circ - 99.01^\circ = 14.59^\circ$$

$$\mu = \cos^{-1} (\cos (19.35^\circ) \cos (14.59^\circ)) = 24.0645$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left[\frac{\cos(24.0645) - 150.5026E-3}{[\text{sen}(24.0645)]} \right] = 61.866^\circ$$

4.7.5a MODELO GLOBAL

La región climática de acuerdo a la figura 4.5 es la "G".

4.7.5 a1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 15 GHZ.

La disponibilidad requerida es 99.99%, por lo tanto $p = 0.01\%$

De la figura 4.7a, obtenemos $H_o = 5.1 \text{ Km}$.

$$D = \frac{5.1 \text{ Km} - 2.4 \text{ Km}}{\tan(61.866^\circ)} = 1.4437 \text{ Km}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

De la tabla 4.2, obtenemos $R_p = 67 \text{ mm/h}$.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se obtienen los valores de $a(f)$ y $b(f)$ a partir de la tabla 4.3:

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

Cálculo de las constantes empíricas:

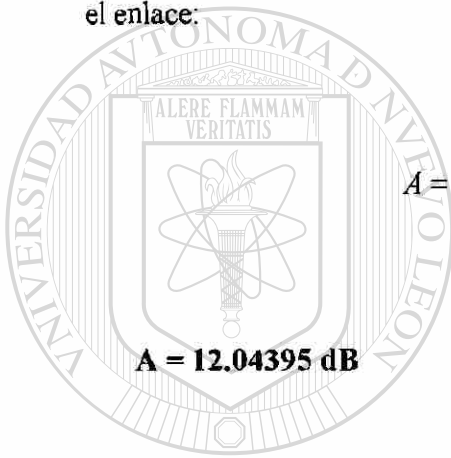
$$X = 2.3 (67)^{-0.17} = 1.12537$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln (67) = -0.1$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln (67) = 1.2772$$

$$U = \frac{1}{1.2772} \left[\ln(1.12537 e^{((-0.1)(1.2772))}) \right] = -0.007523$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación, se obtiene la atenuación debido a lluvia para el enlace:



$$A = 12.04395 \text{ dB}$$

$$A = \frac{aRp^b}{\cos \theta} \left\{ \frac{e^{Uz^b} - 1}{Ub} - \frac{X^b e^{Yz^b}}{Yb} + \frac{X^b e^{YDb}}{Yb} \right\}$$

UANL

4.7.5 a2 DISPONIBILIDAD 99.99 %, F = 35 GHZ.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$H_o = 5.1 \text{ Km}$$

$$D = 1.4437 \text{ Km}$$

$$p = 0.01 \%$$

$$R_p = 67 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.12537$$

$$Y = -0.1$$

$$Z = 1.2772$$

$$U = -0.007523$$

$$A = 58.351 \text{ dB}$$

4.7.5 a3 = DISPONIBILIDAD 99.9 %, F = 15 GHZ.

$$p = 0.1\%$$

$$H_0 = 4.85 \text{ Km}$$

$$D = \frac{4.85 \text{ Km} - 2.4 \text{ Km}}{\tan(61.866^\circ)} = 1.30895 \text{ Km}$$

$$R_p = 22 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

$$X = 2.3 (22)^{-0.17} = 1.35993$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(22) = -0.06673$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(22) = 1.9454$$

$$U = \frac{1}{1.9454} \left[\ln(1.35993 e^{((-0.06673) \times 1.9454)}) \right] = 0.0913$$

A = 3.38048 dB (como $D < Z$ se aplico otro formula, ver teoría)

4.7.5 a4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

$$H_o = 4.85 \text{ Km}$$

$$D = 1.30895 \text{ Km}$$

$$p = 0.1\%$$

$$R_p = 22 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

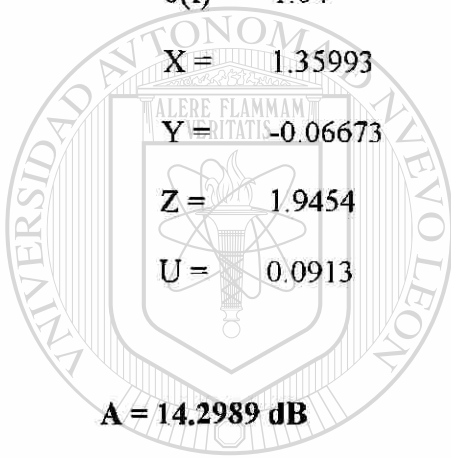
$$X = 1.35993$$

$$Y = -0.06673$$

$$Z = 1.9454$$

$$U = 0.0913$$

$$A = 14.2989 \text{ dB}$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Como $\varphi = 19.35^\circ$, $hR = 4 \text{ Km}$

$$L_s = \frac{(4 - 2.4)}{\text{sen}(61.866^\circ)} = 1.81437 \text{ Km}$$

$$L_g = (1.81437) \cos(61.866^\circ) = 0.85554 \text{ km}$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.045(0.85554)} = 0.96293$$

De acuerdo a la figura 4.8, la región de lluvia es la N.

De la tabla 4.4, obtenemos: $R_{0.01} = 95 \text{ mm/h}$

4.7.5 b1 DISPONIBILIDAD 99.99 %, F = 15 GHZ

Suponer que la señal tiene una polarización Horizontal.

Obtenemos los valores de las constantes que dependen de la frecuencia de la tabla

4.5:

$$a_h = 0.0367$$

$$b_h = 1.154$$

Cálculo de la atenuación específica.

$$\gamma_r = (0.0367) (95)^{(1.154)} = 7.03$$

Cálculo de la atenuación total:

$$A_{0.01} = (7.03) (1.81437) (0.96293)$$

$$A_{0.01} = 12.2821 \text{ dB}$$

4.7.5 b2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ.

Suponer una polarización horizontal.

$$a_h = 0.263$$

$$b_h = 0.979$$

$$\gamma r = (0.263) (95)^{(0.979)} = 22.7063$$

$$A_{0.01} = (22.7063) (1.81437) (0.96293) = 39.6704$$

$$A = 39.6704 \text{ dB.}$$

4.7.5 b3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 15 GHZ.

$$A_{0.1} = (0.38) (12.2821).$$

$$A = 4.66719 \text{ dB}$$

4.7.5 b4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

$$A_{0.1} = (0.38) (39.6704)$$

$$A = 15.07475 \text{ dB}$$

4.7.6 CÁLCULO PARA TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.

Datos Generales:

Ubicación Geográfica de Ensenada

Latitud Norte = 16.45°

Longitud Oeste = 93.07°

Altura promedio sobre el nivel del mar = 530 m.

Suponer que el enlace se hace a través del satélite Solidaridad I cuya longitud oeste es de 109.2° .

Cálculo del ángulo de elevación:

$$\Delta L = 109.2^\circ - 93.07^\circ = 16.13^\circ$$

$$\mu = \cos^{-1}(\cos(16.45^\circ) \cos(16.13^\circ)) = 22.8813$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{\cos(22.8813) - 150.5026E-3}{\operatorname{sen}(22.8813)} \right] = 63.232^\circ$$

4.7.6 a MODELO GLOBAL

La región climática de acuerdo a la figura 4.5 es la "E".

4.7.6 a1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 15 GHZ.

La disponibilidad requerida es 99.99%, por lo tanto p es = 0.01%

De la figura 4.7a, obtenemos $H_0 = 5.1$ Km.

$$D = \frac{5.1Km - 0.53Km}{\tan(63.232^\circ)} = 2.3053Km$$

De la tabla 4.2 obtenemos $R_p = 98$ mm/h

Se obtienen los valores de $a(f)$ $b(f)$ a partir de la tabla 4.3

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

Cálculo de las constantes empíricas:

$$X = 2.3 (98)^{-0.17} = 1.0549$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(98) = -0.11155$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(98) = 1.049$$

$$U = \frac{1}{1.049} \left[\ln(1.0549 e^{((-0.11155)(1.049))}) \right] = -0.0606$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación, se obtiene la atenuación debido a lluvia para el enlace:

$$A = \frac{aR_p^b}{\cos\theta} \left\{ \frac{e^{Uzb} - 1}{Ub} - \frac{X^b e^{Yzb}}{Yb} + \frac{X^b e^{YDb}}{Yb} \right\}$$

$$A = 28.21685 \text{ dB.}$$

4.7.6 a2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ.

$$H_o = 5.1 \text{ Km}$$

$$D = 2.3053 \text{ Km}$$

$$p = 0.01\%$$

$$R_p = 98 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

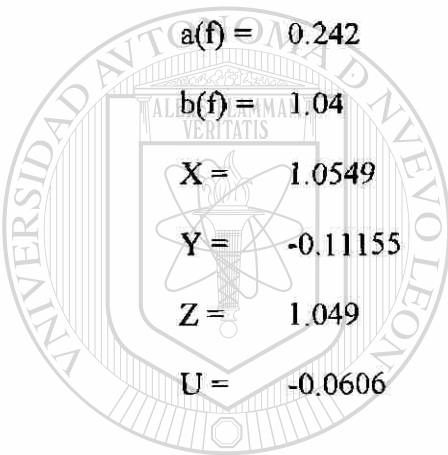
$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.0549$$

$$Y = -0.11155$$

$$Z = 1.049$$

$$U = -0.0606$$



UANL

$$A = 133.431 \text{ dB}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



4.7.6 a3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 15 GHZ.

$$p = 0.1\%$$

$$H_o = 4.9 \text{ Km}$$

$$D = \frac{4.9 \text{ Km} - 0.53 \text{ Km}}{\tan(63.232^\circ)} = 2.2044 \text{ Km}$$

$$R_p = 35 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

$$X = 2.3 (35)^{-0.17} = 1.2567$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(35) = -0.08066$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(35) = 1.6668$$

$$U = \frac{1}{1.6668} \left[\ln(1.2567 e^{((-0.08066) \times 1.6668)}) \right] = 0.0564225$$

$$A = 9.9497 \text{ dB}$$

4.7.6 a4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

$$H_o = 4.9 \text{ Km}$$

$$D = 2.2044 \text{ Km}$$

$$p = 0.1 \%$$

$$R_p = 35 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.2567$$

$$Y = -0.08066$$

$$Z = 1.6668$$

$$U = 0.0564225$$

$$A = 50.5307 \text{ dB}$$

4.7.6 b MODELO ITU - R

Como $\varphi = 16.45^\circ$, $h_R = 4\text{Km}$

$$L_S = \frac{(4 - 0.53)}{\sin(63.232^\circ)} = 3.8865\text{Km}$$

$$L_G = (3.8865) \cos(63.232^\circ) = 1.7504\text{ Km}$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.045(1.7504)} = 0.92698$$

De acuerdo a la figura 4.8, la región de lluvia es la N.

De la tabla 4.4, obtenemos: $R_{0.01} = 95\text{ mm/h}$

4.7.6 b1 DISPONIBILIDAD 99.9%, F =15 GHZ.

Suponer que la señal tiene una polarización vertical.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Obtenemos los valores de las constantes que dependen de la frecuencia de la tabla 4.5.

$$a_v = 0.0335$$

$$b_v = 1.128$$

Cálculo de la atenuación específica:

$$\gamma_r = (0.0335) (95)^{(1.128)} = 5.70055$$

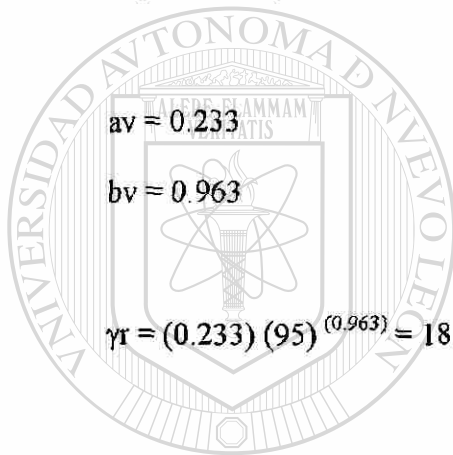
Cálculo de la atenuación total.

$$A_{0.01} = (5.70055) (3.8865) (0.92698)$$

$$A_{0.01} = 20.5374 \text{ dB.}$$

4.7.6. b2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ.

Suponer una polarización vertical



$$a_v = 0.233$$

$$b_v = 0.963$$

$$\gamma r = (0.233) (95)^{(0.963)} = 18.7027$$

$$A_{0.01} = (18.7027) (3.8865) (0.92698) = 67.38$$

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

$$A = 67.38 \text{ dB}$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



4.7.6 b3 DISPONIBILIDAD 99.9% F = 15 GHZ.

$$A_{0.1} = (0.38) (20.5374)$$

$$A = 7.80421 \text{ dB}$$

4.7.6 b4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ

$$A_{0.1} = (0.38) (67.38)$$

$$A = 25.6044 \text{ dB}$$

4.7.7. CÁLCULO PARA CHETUMAL, QUINTANA ROO.

Datos Generales:

Ubicación Geográfica de Chetumal:

$$\text{Latitud Norte} = 18.3^\circ$$

$$\text{Longitud Oeste} = 88.18^\circ$$

$$\text{Altura promedio sobre el nivel del mar} = 6 \text{ m.}$$

Suponer que el enlace se hace a través del satélite satcom C5 cuya longitud oeste es de 139°

Cálculo del ángulo de elevación:

$$\Delta L = 139^\circ - 88.18^\circ = 50.82^\circ$$

$$\mu = \cos^{-1}(\cos(18.3^\circ) \cos(50.82^\circ)) = 53.144$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left[\frac{\cos(53.144) - 150.5026E-3}{[\text{sen}(53.144)]} \right] = 29.3154^\circ$$

4.7.7 a MODELO GLOBAL

La región climática de acuerdo a la figura 4.5 es la "G"

4.7.7 aI DISPONIBILIDAD 99.99 %, F = 15 GHZ.

La disponibilidad requerida es 99.99%, por lo tanto $p = 0.01\%$

De la figura 4.7a, obtenemos $H_0 = 5.1 \text{ Km}$

$$D = \frac{5.1 \text{ Km} - 0.006 \text{ Km}}{\tan(29.3154^\circ)} = 9.07169 \text{ Km}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

De la tabla 4.2, obtenemos $R_p = 67 \text{ mm/h}$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se obtienen los valores de $a(f)$ y $b(f)$ a partir de la tabla 4.3:

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

Cálculo de las constantes empíricas:

$$X = 2.3 (67)^{-0.17} = 1.12537$$

$$Y = 0.026 - 0.3 \ln (67) = -0.1$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln (67) = 1.27772$$

$$U = \frac{1}{1.27772} \left[\ln(1.12537 e^{((-0.1)(1.27772)})} \right] = 0.00756$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación, se obtiene la atenuación debido a lluvia para el enlace:

$$A = \frac{aRp^b}{\cos \theta} \left\{ \frac{e^{UZb} - 1}{Ub} - \frac{X^b e^{YZb}}{Yb} + \frac{X^b e^{YZb}}{Yb} \right\}$$

$$A = 29.1406 \text{ dB}$$

4.7.7 a2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ

$$H_o = 5.1 \text{ Km}$$

$$D = 9.07169 \text{ Km}$$

$$p = 0.01 \%$$

$$R_p = 67 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.12537$$

$$Y = -0.1$$

$$Z = 1.27772$$

$$U = -0.00756$$

$$A = 144.291 \text{ dB}$$

4.7.7 a3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 15 GHZ

$$p = 0.1\%$$

$$H_o = 4.85 \text{ km}$$

$$D = \frac{4.85 \text{ Km} - 0.006 \text{ Km}}{\tan(29.3154^\circ)} = 8.6265 \text{ Km}$$

$$R_p = 22 \text{ mm/h}$$

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

$$X = 2.3 (22)^{-0.17} = 1.35993$$

$$Y = 0.026 - 0.03 \ln(22) = -0.06673$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(22) = 1.9454$$

$$U = \frac{1}{1.9454} [\ln(1.35993e^{((-0.06673)(1.9454))})] = 0.0913$$

$$A = 11.185 \text{ dB}$$

4.7.7 a4 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ.

$$H_o = 4.85 \text{ Km}$$

$$D = 8.6265 \text{ Km}$$

$$\begin{aligned}
 p &= 0.1 \% \\
 R_p &= 22 \text{ mm/h} \\
 a(f) &= 0.242 \\
 b(f) &= 1.04 \\
 X &= 1.35993 \\
 Y &= -0.06673 \\
 Z &= 1.9454 \\
 U &= 0.0913
 \end{aligned}$$

$$A = 59.198 \text{ Db}$$

4.7.7.b MODELO ITU - R

$$\text{Como } \varphi = 18.3^\circ, h_R = 4 \text{ Km}$$

$$L_s = \frac{(4 - 0.006)}{\sin(29.3154^\circ)} = 8.1574 \text{ km}$$

$$L_G = (8.1574) \cos(29.3154^\circ) = 7.1127 \text{ Km}$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.045(7.1127)} = 0.75753$$

De acuerdo a la figura 4.8, la región de lluvia es la N.

De la tabla 4.4, obtenemos: $R_{0.01} = 95 \text{ mm/h}$

4.7.7 b1 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 15 GHZ

Suponer que la señal tiene una polarización horizontal.

Obtenemos los valores de las constantes que dependen de la frecuencia de la tabla 4.5:

$$a_h = 0.0367$$

$$b_h = 1.154$$

Cálculo de la atenuación específica:

$$\gamma_r = (0.0367) (95)^{(1.154)} = 7.03$$

Cálculo de la atenuación total:

$$A_{0.01} = (7.03) (8.1574) (0.75753)$$

$$A_{0.01} = 43.4417 \text{ dB}$$

4.7.7 b2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ.

Suponer una polarización horizontal

$$a_h = 0.263$$

$$b_h = 0.979$$

$$\gamma r = (0.263) (95)^{(0.979)} = 22.706$$

$$A_{0.01} = (22.706) (8.1574) (0.75753)$$

$$A = 140.311 \text{ dB}$$

4.7.7 b3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 15 GHZ.

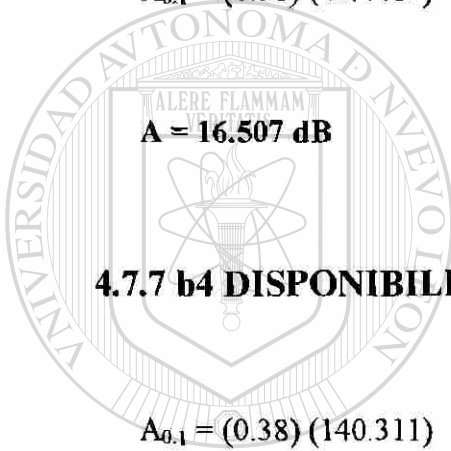
$$A_{0.1} = (0.38) (43.4417)$$

$$A = 16.507 \text{ dB}$$

4.7.7 b4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

$$A_{0.1} = (0.38) (140.311)$$

$$A = 53.3182 \text{ bdB}$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



4.8 CONCLUSIONES

En cuanto a los parámetros, la altura sobre el nivel del mar de la ciudad influye en que mientras más alta esté la ciudad, se acorta la distancia hacia el nivel de lluvia. A su vez la altura de la lluvia depende de la latitud de la ciudad: a mayor latitud menor altura de la lluvia.

Por su parte cabe recalcar que el ángulo de elevación es fundamental debido a que mientras menor sea este, la señal atraviesa mayor cantidad de lluvia.

Nótese que los datos correspondientes a las regiones de precipitación propuestas por los modelos son de gran dimensión. Un análisis más detallado requeriría de datos locales más precisos.

La disponibilidad del enlace significa la cantidad de lluvia en (mm/h) que suponemos se va a exceder para un cierto porcentaje del año. Mientras menor sea la disponibilidad suponemos que se va a exceder una menor cantidad de lluvia, mientras que si es menor el porcentaje del año, esperamos que en ese tiempo sea mayor la cantidad de lluvia que creemos se va a exceder.

A continuación resumiré las respuestas a las dos preguntas de investigación incluidas en los objetivos:

La primera pregunta es: ¿Cuáles son las diferencias en el planteamiento teórico o metodología de la investigación de ambos métodos ?.

Las respuestas son las siguientes:

1.- El modelo de la ITU es más sencillo de aplicar y se basa en calcular la longitud efectiva en la cual la señal es afectada por la lluvia, suponiendo una altura de lluvia constante para las latitudes de 0° a 36° . Mientras que el modelo global está basado en el hecho de que la altura efectiva del medio de atenuación cambia dependiendo del tipo de evento de precipitación; esto es que existe una relación entre la altura isotérmica efectiva y el porcentaje del tiempo en el cual este evento ocurre.

2.- Hay que destacar que las regiones geográficas de lluvia son diferentes en los modelos, por lo que son distintas las relaciones de lluvia para una región en particular.

3.- El método de la ITU hace énfasis en el tipo de polarización de la señal, al estimar las constantes que dependen de la frecuencia. Ya que la señal polarizada horizontalmente sufre una mayor atenuación que la polarizada verticalmente. Esto es debido a que generalmente las gotas de lluvia son esferoides achatadas por los polos, alineadas con un eje de rotación vertical y eje mayor en forma horizontal. Para una polarización circular, hay que calcular la media de la atenuación horizontal y vertical. El método de la NASA no toma en cuenta lo anterior, definiendo las constantes que dependen de la frecuencia iguales para cualquier polarización de señal.

La segunda pregunta es: ¿ Los resultados empíricos de la aplicación de los métodos difieren o son similares ?

La respuesta es:

Con base en la siguiente tabla (4.6), he encontrado que los resultados de la aplicación de ambos métodos difieren por completo. También pienso que no hay forma

de saber que método es el mejor, debido a que para esto hay que realizar múltiples pruebas prácticas las cuales llevarían mucho tiempo para recopilar estadísticas confiables y se requeriría equipo sofisticado de medición.

| Ciudad | Método | disp 99.99%, | disp 99.99%, | disp 99.9%, | disp 99.9%, |
|-----------------|----------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| | | f = 15 GHz | f = 35 GHz | f = 15 GHz | f = 35 GHz |
| 1.- Ensenada | global | 8.57459 dB | 44.9243 dB | 1.9536 dB | 11.256 dB |
| B.C.N | ITU | 5.179 dB | 21.63 dB | 1.968 dB | 8.2194 dB |
| 2.- Hermosillo | * global | 6.23838 dB | 35.2756 dB | 1.46875 dB | 9.274 dB |
| Sonora | * ITU | 4.93844 dB | 18.627 dB | 1.8766 dB | 7.07826 dB |
| 3.- Monterrey | global | 14.741 dB | 73.097 dB | 4.38198 dB | 23.533 dB |
| Nuevo León | ITU | 13.2205 dB | 46.41587 dB | 5.0238 dB | 17.638 dB |
| 4.- México | global | 12.04395 dB | 58.351 dB | 3.38048 Db7 | 14.2989 dB |
| D.F. | ITU | 12.2821 dB | 39.6704 dB | 4.66719 dB | 15.07475 dB |
| 5.- Tuxtla Gtz. | global | 28.21685 dB | 133.431 dB | 9.9497 dB | 50.5307 dB |
| Chiapas | ITU | 20.5374 dB | 67.38 dB | 7.80421 dB | 25.6044 dB |
| 6.- Chetumal | global | 29.1406 dB | 144.291 dB | 11.185 dB | 59.198 dB |
| Quintana Roo | ITU | 43.4417 dB | 140.311 dB | 16.507 dB | 53.3182 dB |

Tabla 4.6

- Datos para una frecuencia de operación de 14.348 GHz.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES PRÁCTICAS DE LAS COMUNICACIONES SATELITALES ARRIBA DE 10 GHZ.

5.1 PRÁCTICA # 1 (ORIENTACIÓN DE ANTENAS)

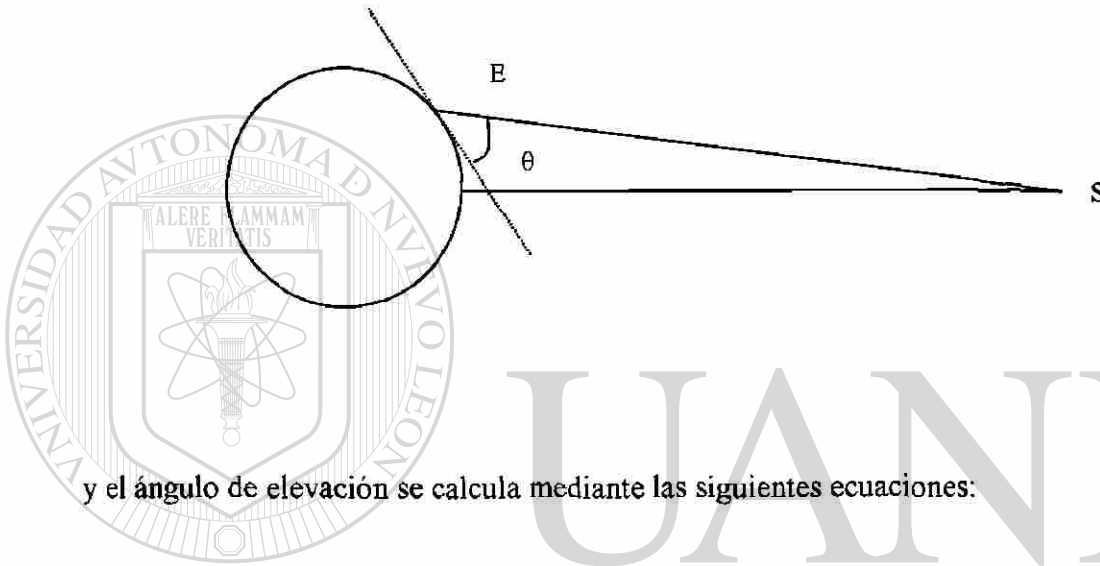
5.1.1 INTRODUCCIÓN

Para poder orientar la antena, primero es necesario conocer la posición exacta del satélite con respecto a la posición de la estación terrena en la superficie de la tierra. Por lo menos se requiere del ángulo de elevación y el azimut para realizar una orientación inicial de la antena. Estos valores se pueden obtener a partir de la latitud y longitud de la estación terrena y de la longitud del satélite.

Para determinar la latitud y longitud de la estación terrena, utilice un mapa, atlas o sistema de navegación (por ejemplo LORAN).

ÁNGULO DE ELEVACIÓN:

El ángulo de elevación del satélite es aquel cuyo vértice está en el sitio de la antena, formado por las líneas imaginarias del horizonte de la tierra y el que une la estación terrena con el satélite.



y el ángulo de elevación se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos B - 0.15126}{\sin B} \right)$$

donde

$$B = \cos^{-1} (\cos \text{LAT} \cos \text{DLONG})$$

LAT = latitud de la estación terrena.

DLONG = [Long. Estación Terrena - Long. Satélite]

Por otro lado, el ángulo de elevación resulta ser un parámetro muy importante, ya que determina el grado de interferencia atmosférica. En los sitios con ángulos bajos, la

onda radiada viaja una distancia considerable a través de la atmósfera, sufriendo una alta interferencia; para un funcionamiento adecuado se recomienda mantener ángulos de elevación mayores de 5°.

Azimut

El valor del Azimut se puede obtener aplicando las siguientes ecuaciones:

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{\tan DLONG}{\sin LAT} \right)$$

y dependiendo de la posición de la estación terrena con respecto al satélite se requiere hacer las siguientes correcciones:

Estación Terrena en el hemisferio norte

Estación terrena al este del Satélite

$$\text{Azimut} = 180^\circ + A$$

Estación terrena al oeste del Satélite

$$\text{Azimut} = 180^\circ - A$$

Estación terrena en el hemisferio Sur:

Estación terrena al oeste del Satélite

$$\text{Azimut} = A$$

Estación terrena al este del Satélite

$$\text{Azimut} = 360^\circ - A$$

Se debe tomar en cuenta que el Azimut se mide con respecto al norte geográfico de la Tierra y por esto se debe hacer una corrección por desviación magnética cuando se orienta la antena parabólica utilizando una brújula.

5.1.2 OBJETIVO

Que el alumno se familiarice con las técnicas de localización de satélites, y con la ayuda de los instrumentos adecuados, localice dos satélites distintos orientando dos antenas respectivamente.

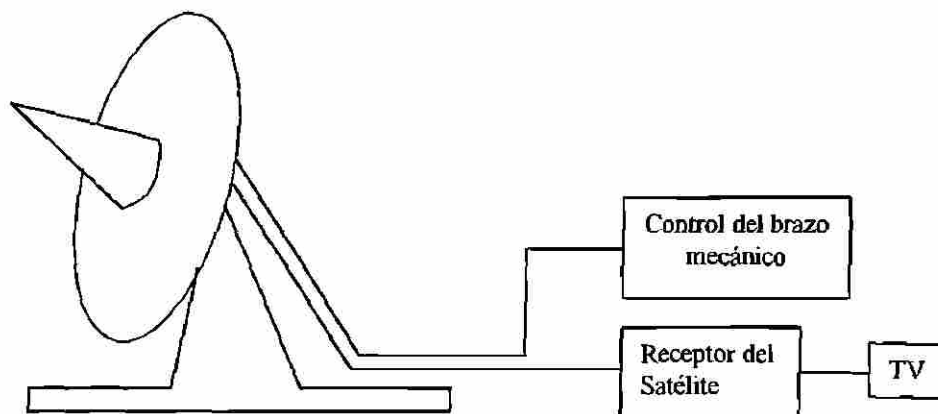
Material Utilizado

- Un Inclínómetro
- Una brújula
- Dos antenas parabólicas.
- Un LNB para banda C y un LNB para banda Ku
- Un receptor de satélite modelo UNIDEN VST -9000
- Una televisión
- Cable coaxial y conectores
- Mapa geográfico de la región .

Esquema de Medición

El esquema de medición que se utilizó para esta práctica fue el siguiente, donde las antenas que se utilizaron fueron:

- Una antena parabólica con LNB para banda C
- Una antena parabólica de foco corrido con LNB para banda Ku.



5.1.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

1.-El alumno realizará la orientación de una antena parabólica de la siguiente manera:

- a) Recopilación de Información sobre el satélite y la estación terrena.

El primer paso para realizar la práctica fue recopilar la información sobre el satélite así como toda la información referente a la estación terrena.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Información obtenida para la estación terrena.

- Latitud = 31.8722°
- Longitud = 116.6647°
- Corrección magnética = 13.9°

Información obtenida para el satélite MORELOS 2 en banda C

- Longitud = 116.8°

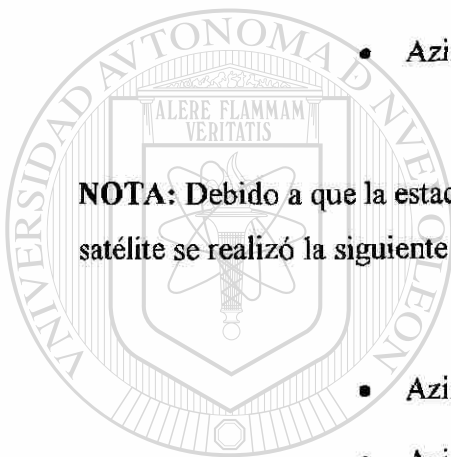
b) Cálculo teórico para la localización del satélite (manual o computacional)

Utilizando las ecuaciones anteriores se obtuvieron los siguientes valores de ángulo de elevación y azimut.

- Ángulo de elevación = 52.88°
- Azimut = 0.25°

NOTA: Debido a que la estación terrena se encuentra en el hemisferio norte y al este del satélite se realizó la siguiente corrección al valor del Azimut:

- Azimut = $180^\circ + A$
- Azimut = 180.25°



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

c) Orientación de la antena hacia el satélite.

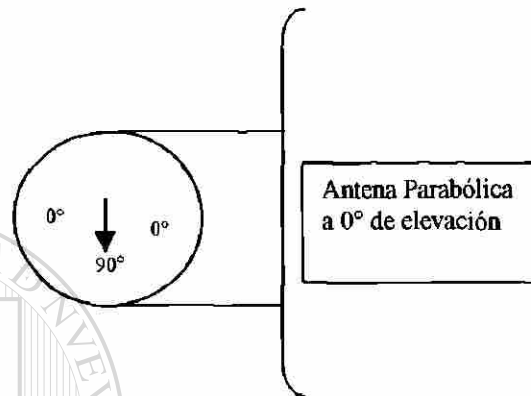
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Con los valores anteriores se procedió a la orientación de la antena parabólica, el primer paso que se realizó fue ajustar el ángulo de elevación y luego se ajustó el azimut de la antena parabólica.

Ángulo de elevación:

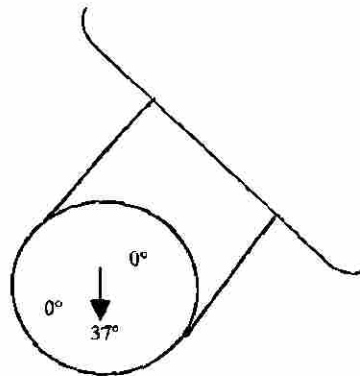
Para fijar el ángulo de elevación de la antena parabólica se utilizó un inclinómetro; éste se colocó en la parte posterior de la parabólica, de tal forma que estando la antena con 0° de elevación, el inclinómetro indicaba 90° .



Por lo tanto para obtener la lectura correcta en el inclinómetro se obtiene el ángulo complementario a los 90° :

- Ángulo en el inclinómetro = $90^\circ - \text{ángulo de elevación calculado}$

- Ángulo en el inclinómetro = $90^\circ - 52.88^\circ = 37.12$



Azimut:

Para orientar la antena utilizando una brújula, primero se debe realizar un ajuste al valor obtenido de azimut debido al corrimiento del campo magnético de la tierra con respecto al norte geográfico:

- Ángulo brújula = azimut - desviación magnética.
- Ángulo brújula = $180.25^\circ - 13.9^\circ = 166.35^\circ$

d) Obtención de la señal de máxima calidad.

Para obtener la señal de máxima calidad, primero se colocó el receptor de la antena parabólica en un canal conocido, según la guía de canales satelitales ORBIT el canal 14 de M2 transmite en banda C, luego se procedió a realizar pequeños movimientos tanto en el ángulo de elevación como el ángulo de azimut hasta que se obtenía la mejor imagen en la televisión.

Una vez obtenida la mejor imagen, se procedió a ajustar todos los tornillos para fijar la antena parabólica.

2.- Repetir el paso anterior con otra antena y otro satélite.

a) Recopilación de información sobre el satélite y la estación terrena

- Latitud = 31.8755°
- Longitud = 116.6647°
- Corrección magnética = 13.9°

Información obtenida para el satélite TELESTAR 401(T1) en banda Ku:

- Longitud = 97°

b) Cálculo teórico para la localización del satélite (manual o computacional)

Utilizando las ecuaciones anteriores se obtuvieron los siguientes valores de ángulo de elevación y azimut:

- Ángulo de elevación = 47.19°
- Azimut = 34.08°

NOTA 1: debido a que se utilizó una parabólica de foco corrido, es necesario hacer la siguiente corrección al valor del ángulo de elevación.

- Ángulo de elevación = $47.19^\circ - 23.5^\circ$

- Ángulo de elevación = 23.69°

NOTA 2: debido a que la estación terrena se encuentra en el hemisferio norte y al oeste del satélite se realizó la siguiente corrección al valor del azimut:

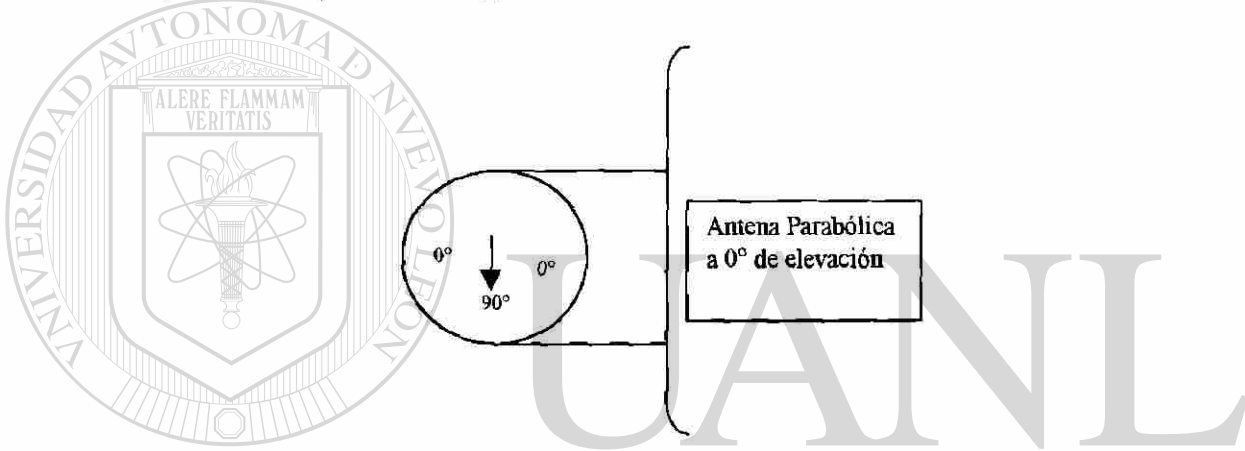
- Azimut = $180^\circ - A$
- Azimut = 145.92°

c) Orientación de la antena hacia el satélite.

Con los valores anteriores se procedió a la orientación de la antena parabólica, el primer paso que se realizó fue ajustar el ángulo de elevación y luego se ajustó el azimut de la antena parabólica.

Ángulo de elevación:

Para fijar el ángulo de elevación de la antena parabólica se utilizó un inclinómetro; éste se colocó en la parte posterior de la parabólica, de tal forma que estando la antena con 0° de elevación, el inclinómetro indicaba 90°

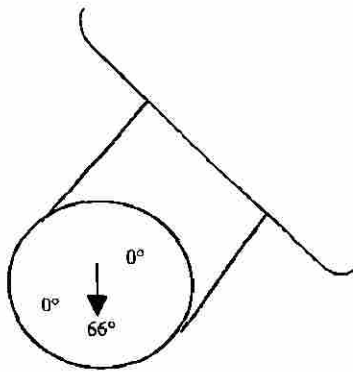


Por lo tanto para obtener la lectura correcta en el inclinómetro se obtiene el ángulo complementario a los 90°

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

- Ángulo en el inclinómetro = $90^\circ - \text{ángulo de elevación calculado}$
- Ángulo en el inclinómetro = $90^\circ - 23.69^\circ = 66.31^\circ$

Finalmente, se eleva la antena parabólica hasta llegar al valor que se calculó debe indicar el inclinómetro, una vez obtenida la elevación se ajustan los tornillos (de movimiento de elevación) y se procede a ajustar el azimut.



Azimet:

Para orientar la antena utilizando una brújula, primero se debe realizar un ajuste al valor obtenido de azimet debido al corrimiento del campo magnético de la tierra con respecto al norte geográfico:

- ángulo brújula = azimet - desviación maagnética.
- ángulo brújula = $145.92^\circ - 13.9^\circ = 132.02^\circ$

d) Obtención de la señal de máxima calidad.

Para obtener la señal de máxima calidad, primero se colocó el receptor de la antena parabólica en un canal conocido, según la guía de canales satelitales ORBIT el canal 11 del T1 transmite en banda Ku, luego se procedió a realizar pequeños movimiento tanto en el ángulo de elevación como en el ángulo de azimet hasta que se obtenía la mejor imagen de la televisión

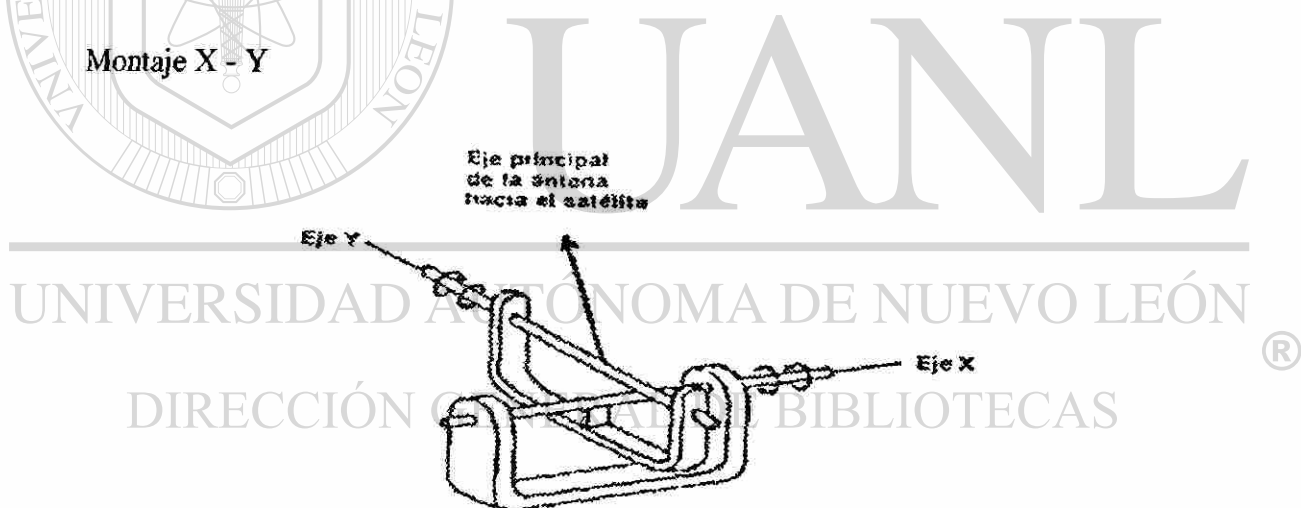
Una vez obtenida la mejor imagen, se procedió a ajustar todos los tornillos para fijar la antena parabólica.

3.- Describir el principio de orientación de antenas por los siguientes métodos.

a) Manual (X, Y).

El montaje X-Y tiene su eje primario colocado horizontalmente, y el eje secundario es perpendicular a él. La configuración es práctica para rastrear con facilidad un satélite cuando éste pasa por el cenit - o sea, directamente arriba de la estación, en la zona ecuatorial-, puesto que se evita hacer desplazamientos de la antena tan rápidos como los que si se necesitan hacer con los montajes Elevación - Azimut; pero resulta inadecuada para rastrear satélites cerca del horizonte. En general, el montaje X - Y es más apropiado para las antenas que se comunican con satélites de órbita baja que con satélites geostacionarios.

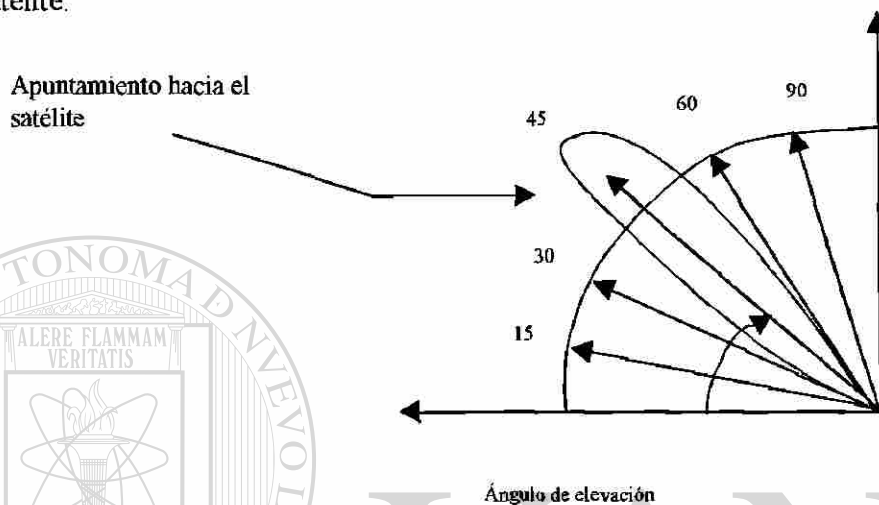
Montaje X - Y



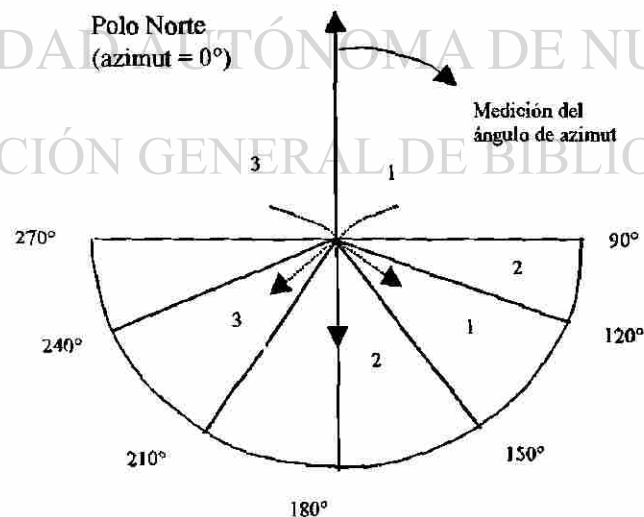
b) Elevación - Azimut.

La orientación de la antena de una estación terrena hacia un satélite geostacionario se realiza ajustando dos ángulos, en elevación y azimut; los valores de estos ángulos dependen de la posición geográfica de la estación - en latitud y longitud - y de la ubicación en longitud del satélite. Tomando como referencia el eje de simetría del plato

parabólico, que coincide con su eje de máxima radiación, el ángulo de elevación es aquél formado entre el piso y dicho eje de simetría dirigida hacia el satélite; por su parte, el ángulo de azimut es la cantidad de grados que hay que girar la antena en el sentido de las manecillas del reloj - con relación al norte geográfico de la Tierra- para que ese mismo eje de simetría - prolongado imaginariamente - pase por su posición en longitud del satélite.



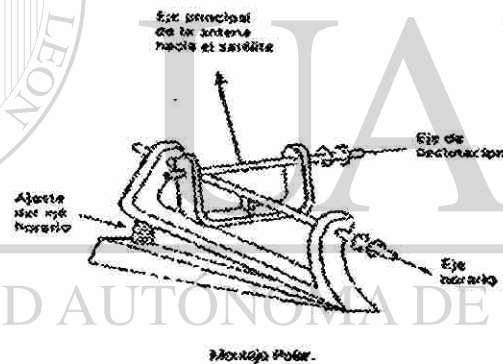
Definición del ángulo de elevación de la antena de una estación terrena.



Definición del ángulo de azimut de la antena de una estación terrena.

c) Polar.

En el montaje ecuatorial, su eje primario (horario) es paralelo al eje de rotación de la Tierra, y el secundario es un eje perpendicular de declinación; como el eje primario es paralelo al eje polar de la Tierra, a este montaje también se le llama polar. Normalmente se usa para montar radiotelescopios, pues permite que la antena siga a un objeto celeste con sólo girarla sobre su eje horario, y se utiliza muy poco en estaciones terrenas de comunicaciones. Sin embargo, es posible que en el futuro se emplee en mayor grado en estaciones con antenas pequeñas o medianas localizadas en latitudes intermedias, considerando que sus haces de radiación son relativamente anchos y que pueden orientarse hacia distintos satélites con un solo movimiento alrededor de un eje, sin importar los muy pequeños cambios asociados en la declinación.



Montaje Polar

5.1.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados que se obtuvieron de los cálculos, según las ecuaciones para el posicionamiento en el elevación y azimut, fue posible lograr la orientación de las antenas parabólicas utilizadas hacia los satélites deseados.

Los resultados que nos proporcionaron los cálculos nos dieron una muy buena idea de la posición exacta del satélite, de tal forma que al realizar una orientación inicial solamente se requirió de pequeñas correcciones tanto en elevación como en azimut para obtener una mejor calidad de la señal.

Como se puede ver, en los cálculos se tuvieron que tener muchos detalles en cuenta, como por ejemplo la desviación magnética que produce una diferencia entre el norte de la brújula y el norte geográfico de la tierra, por otro lado también se tuvieron que hacer correcciones al valor del azimut dependiendo de la posición de la estación terrena con respecto al satélite. Además, en las antenas de foco desplazado se requiere tomar en cuenta un ángulo de corrimiento para el cálculo de la elevación de la antena.

Es importante también el buen uso del material, ya que un uso inadecuado del inclinómetro no podría dar información incorrecta del ángulo de elevación, por otro lado también es importante saber leer las indicaciones de la brújula, de lo contrario obtendremos un valor de azimut incorrecto. En ambos casos tendremos una mala orientación de nuestra antena parabólica.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

5.1.5 CONCLUSIONES.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Resultado de gran utilidad contar con la guía de satélites ORBI, ya que con la información proporcionada por esta guía se pudieron encontrar canales específicos a localizar para poder determinar el satélite al que queríamos orientar la antena.

Resultó de gran importancia el conocimiento previo del cálculo de orientación de una antena parabólica en elevación y azimut, ya que al tener una idea correcta de los conceptos asociados se pudo hacer un mejor uso del material a utilizar como lo fue el inclinómetro y al brújula.

También es importante saber operar el receptor de satélite, de lo contrario resulta difícil localizar algún canal de televisión probablemente a que nos encontramos en una polaridad opuesta o que el ajuste final (skew) debe moverse para lograr obtener la imagen. Otro aspecto que también se debe saber operar es la frecuencia del audio, ya que algunos canales de televisión transmiten el audio en 6.2 Mhz y otros en 6.8 Mhz. En general, un buen conocimiento del aparato receptor nos evitará largas horas de problemas.

Por otro lado, algunos receptores de satélite también incluyen la operación del brazo mecánico, de tal forma que se pueden programar las posiciones de todos los satélites y con solo indicar una clave el receptor moverá la antena parabólica al satélite deseado.

En general, una buena orientación de la antena parabólica nos garantizará una buena recepción de señal ya sea de datos o vídeo y evitará problemas en la señal recibida principalmente debido a atenuación por una mala orientación de la antena parabólica. Como se sabe, la señal transmitida por el satélite sufre grandes atenuaciones y por tanto es muy importante no introducir atenuaciones adicionales no deseadas debido a una mala orientación de la antena.

5.2 PRÁCTICA # 2 (MEDICIÓN DEL VALOR DE C/N EN RECEPCIÓN)

5.2.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los factores que determina el desempeño del enlace de un sistema de comunicaciones es la relación portadora a ruido (C/N). Esta relación es conveniente expresarla en decibeles:

$$C/N_{DOWN-LINK} \approx PIRE_{SAT} - Pa + \frac{G}{T_{ET}} - k - 10 \log B - Pm - M_v - BOo$$

donde

$PIRE_{SAT}$ = Potencia Isotrópica Radiada Efectiva del satélite.

Pa = Pérdidas por atenuación en el espacio libre.

G/T_{ET} = Figura de mérito de la antena de la estación terrena.

K = Constante de Boltzman

Pm = Pérdida miscelánea por error de posicionamiento y atenuaciones en el sistema transmisor y receptor.

M_{LL} = Margen por lluvia.

BOo = Back - off de salida del satélite.

Como se puede observar de la ecuación anterior, la relación C/N depende de varios factores, dentro de los cuales algunos están bajo nuestro control, como por ejemplo la razón G/T que es la figura de mérito de la antena receptora, otro factor manejable es el ruido que introduce el LNB en el receptor, utilizando un buen LNB podemos reducir la contribución de ruido adicional a nuestra señal.

La razón portadora a ruido se define como la razón entre la portadora de la señal de vídeo y el nivel RMS de ruido. Esta razón se expresa en decibeles.

En el receptor de televisión también se requiere tener un nivel de C/N adecuado para poder tener una buena imagen de televisión. El umbral de perceptibilidad del ruido en un receptor de televisión ocurre a una razón de C/N de aproximadamente 47 dB. Se puede tener una imagen de razonable calidad con una razón C/N de 43 dB en algunos receptores de televisión.

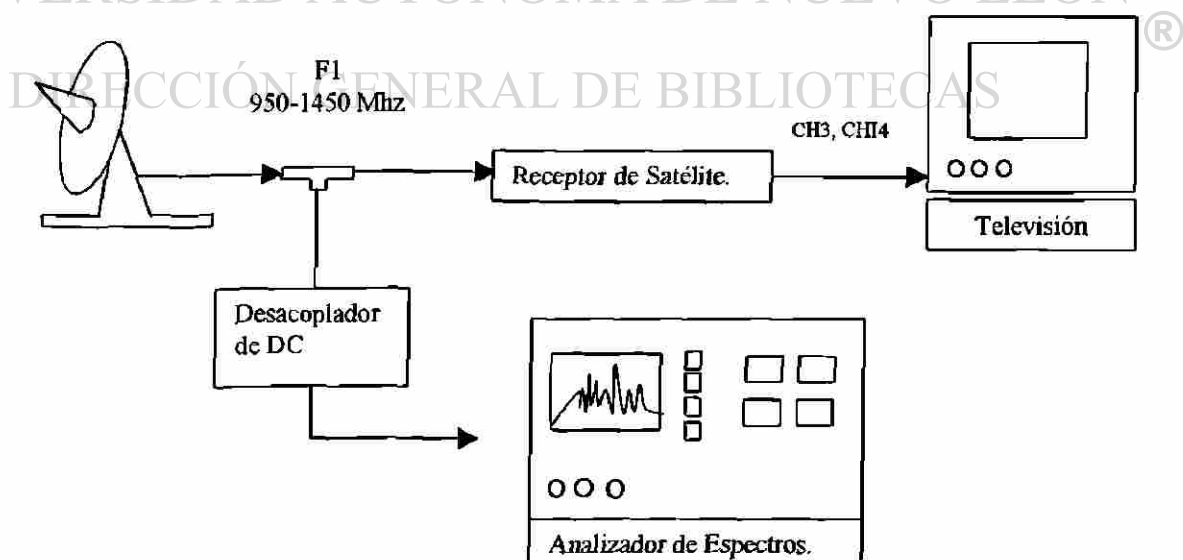
5.2.2 OBJETIVOS.

Que el alumno realice mediciones de potencia en distintas etapas de frecuencia en una estación receptora de satélite y obtenga una medida de la calidad del enlace mediante el uso de equipo de laboratorio adecuado.

Material Utilizado

- Una antena parabólica.
- Receptor de satélite modelo UNIDEN UST - 9000.
- Analizador de espectros modelo ADVANTEST R4131D.
- Cable coaxial y conectores.
- Desacoplador de DC.

Esquema de Medición



5.2.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO.

1.- El alumno realizará mediciones de potencia en un canal de satélite de la siguiente manera:

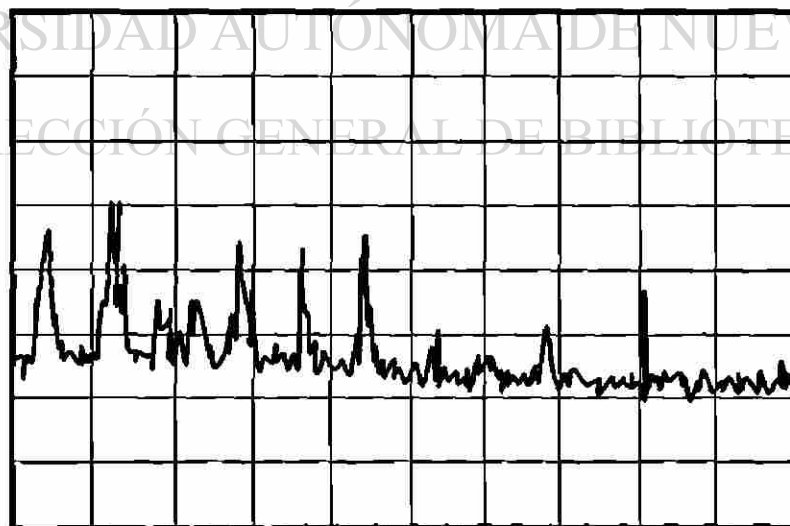
a).- Interconectar el analizador de espectro a la salida del LNA de una antena dada, cuidando de aislar el aparato de medición del influjo de corriente directa en al entrada RF.

b).- Realizar mediciones de ancho de banda de Transponder y de ancho de banda de un canal.

c).- Realizar mediciones de potencia de la señal y potencia de ruido en cada canal del transponder.

- 30 dBm

1200 MHz



500 MHz
10 dB/ 10
kHzw

ST 0.2 w/

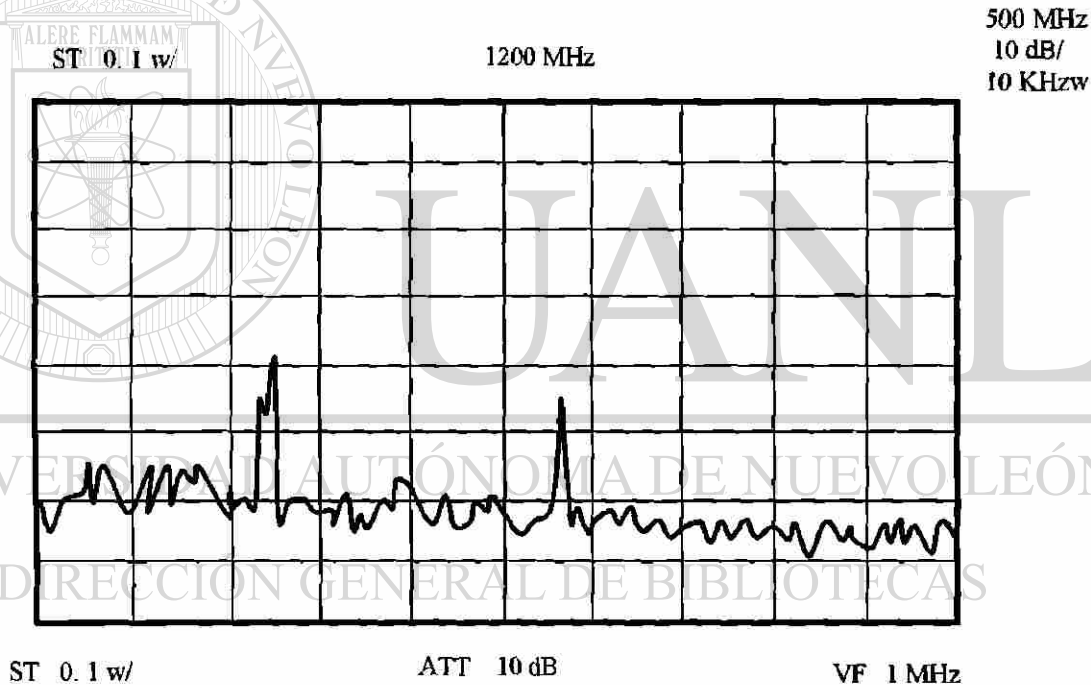
ATT 10dB

VF 1 MHz.

d).- Conectar ahora el analizador de espectro a la salida del conversor de frecuencia y realizar mediciones a la señal de F1

Para esta práctica se realizaron todas las mediciones a la salida del LNB, es decir, se analizó la señal de F1 (950 - 1450 Mhz) que llega al receptor de satélite.

El satélite que se utilizó fue el MORELOS 2, en la siguiente figura se muestra el espectro en frecuencia de la señal tanto en polaridad horizontal como en polaridad vertical:



Espectro en frecuencia en polaridad vertical (950 . 1450 Mhz.)

En el analizador de espectro se procedió a realizar la medición de potencia de la señal y del ruido para cada canal.

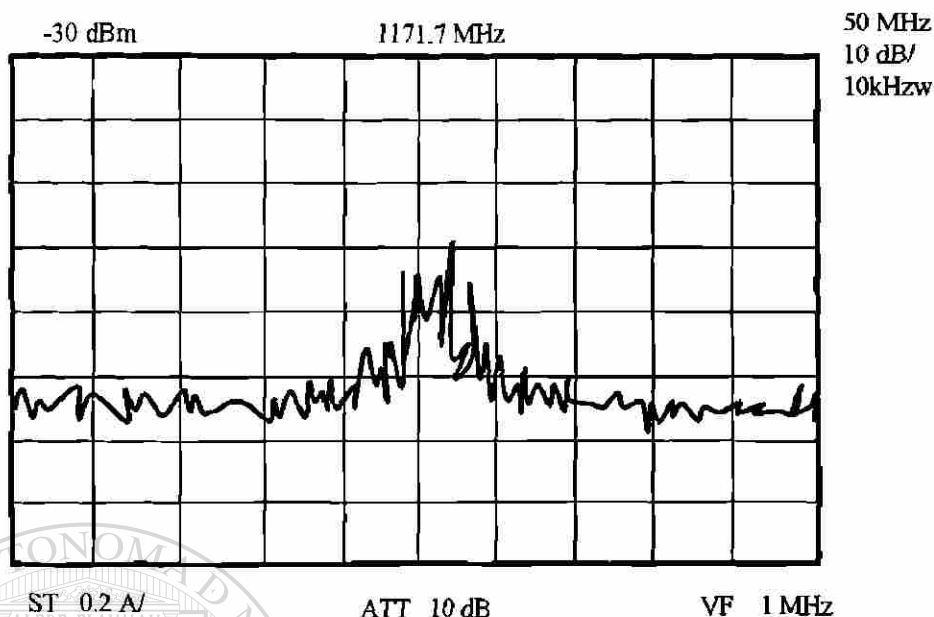
- Para polaridad horizontal tenemos:

| Señal a la frecuencia (Mhz) | Ancho de Banda (Mhz) | Potencia de la Señal (dBm) | Potencia del Ruido (dBm) | Relación C/N (dB) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------|
| 972.6 | 30 | -48.8 | -70.4 | 21.6 |
| 1012.6 | 25 | -50.0 | -71.6 | 21.6 |
| 1092.6 | 20 | -50.8 | -71.0 | 20.2 |
| 1132 | 15 | -56.6 | -70.8 | 14.2 |
| 1170 | 20 | -54.8 | -75.6 | 20.8 |
| 1251.6 | 20 | -64.4 | -75.8 | 11.4 |
| 1291.6 | 20 | -66.4 | -73.4 | 7 |

Para polaridad vertical tenemos:

| Señal a la frecuencia (Mhz) | Ancho de Banda (Mhz) | Potencia de la Señal (dBm) | Potencia del Ruido (dBm) | Relación C/N (dB) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1071 | 20 | -51.8 | -70.8 | 19 |
| 1230 | 15 | -72.8 | -86.2 | 13.4 |

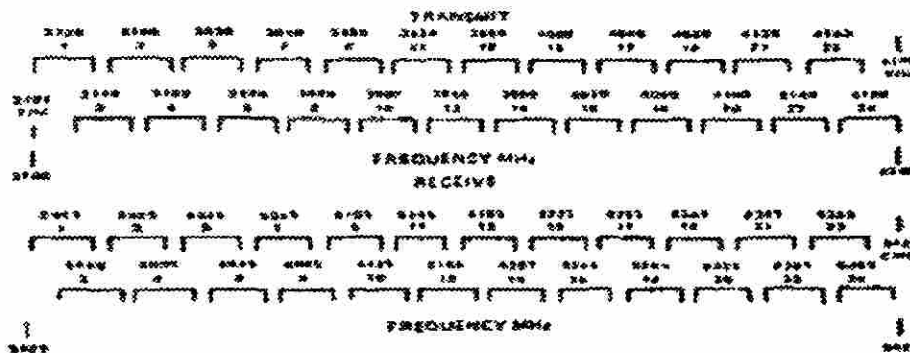
En la siguiente figura se muestra ha mayor detalle uno de los canales que se observaron en el osciloscopio. El canal que se muestra esta centrado a la frecuencia 1170 Mhz en polaridad horizontal.



5.2.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los resultados podemos observar que existen canales en polaridad horizontal y otros canales en polaridad vertical, como se puede ver en las figuras las señales en ambas polaridades no se traslapan, es decir, no existe una señal a la misma frecuencia para las dos polaridades.

A la salida del LNB se tiene una frecuencia intermedia entre 950 - 1450 Mhz, que significa un ancho de banda de 500 Mhz, si dividimos estos 500 Mhz entre 24 canales posibles que se reciben en el receptor de satélite tenemos que para cada canal le corresponde un ancho de banda de 20.83 Mhz. Este dato no concuerda con el ancho de banda de 36 Mhz que requiere una señal de televisión. Lo que en realidad sucede es que existen 12 canales en polaridad horizontal y 12 canales en polaridad vertical, los cuales se distribuyen dentro de los 500 Mhz de ancho de banda total, como se puede observar en la siguiente figura.



Frecuencia MHz.

Como se observa en la figura anterior existe un traslape de espectros pero la interferencia entre los canales se reduce debido a que los canales adyacentes van en polaridad opuesta.

Otro dato que se puede obtener de las mediciones, es la potencia de la señal y la potencia del ruido, de tal forma que se puede tener una medida de la relación señal a ruido. Como se puede observar de los datos anteriores, la mayoría de los canales en polaridad horizontal tiene una relación C/N mayor a 20 dB, lo cual significa que la potencia de la señal es mayor en 100 veces la potencia de la señal de ruido.

Los canales en polaridad vertical no tenían valores de C/N mayores a 20 dB, el más cercano estaba a 19 dB. Probablemente esto se debe a que el ajuste del polarizador estaba dando más ganancia a los canales en polaridad horizontal. Este problema se podía resolver modificando el ángulo del polarizador para dar un poco de más ganancia a los canales en polaridad vertical.

En la práctica también se modificó el ángulo del polarizador. Al variar este ángulo se observaba claramente como las espigas correspondientes a una polaridad iban creciendo en potencia mientras que las espigas correspondientes a la otra polaridad iban reduciendo su potencia. Durante este experimento se observó claramente como no existían dos señales con polaridad opuesta a la misma frecuencia.

5.2.5 CONCLUSIONES

Como se vio en la práctica, el LNB recibe la señal desde el satélite a una frecuencia entre 4 - 6 GHz. para banda C. La función del LNB es la de amplificar la débil señal que se recibe y luego trasladarla a un rango de frecuencia intermedia entre 950 a 1450 Mhz.

El receptor de satélite recibe la señal que proviene del LNB en frecuencia intermedia y se encarga de transmitir hacia la televisión el canal que se sintonice en éste.

Como se observó en esta práctica existen varios canales en polaridad horizontal y también en polaridad vertical; se debe observar un aspecto muy importante, no existe una señal a la misma frecuencia en diferente polaridad, ya que de lo contrario se tendría interferencia entre las señales. Es por esto que los canales adyacentes existen en polaridades opuestas, con el fin de reducir la interferencia entre canales adyacentes.

Un factor importante en la recepción es la relación C/N, ya que ésta nos da una idea de la calidad de la recepción de la señal. Un valor de C/N grande significa que la potencia de la señal recibida es mayor que la potencia del ruido, y en general es esto lo que se desea ya que de esta forma es posible la recuperación de la señal sin errores; por otro lado un valor de C/N pequeño significa que la potencia de la señal recibida es cercana al valor de la potencia del ruido y esto significa que existirán más errores en la recuperación de la señal debido a problemas de discriminación entre la señal de la portadora y de la señal de ruido.

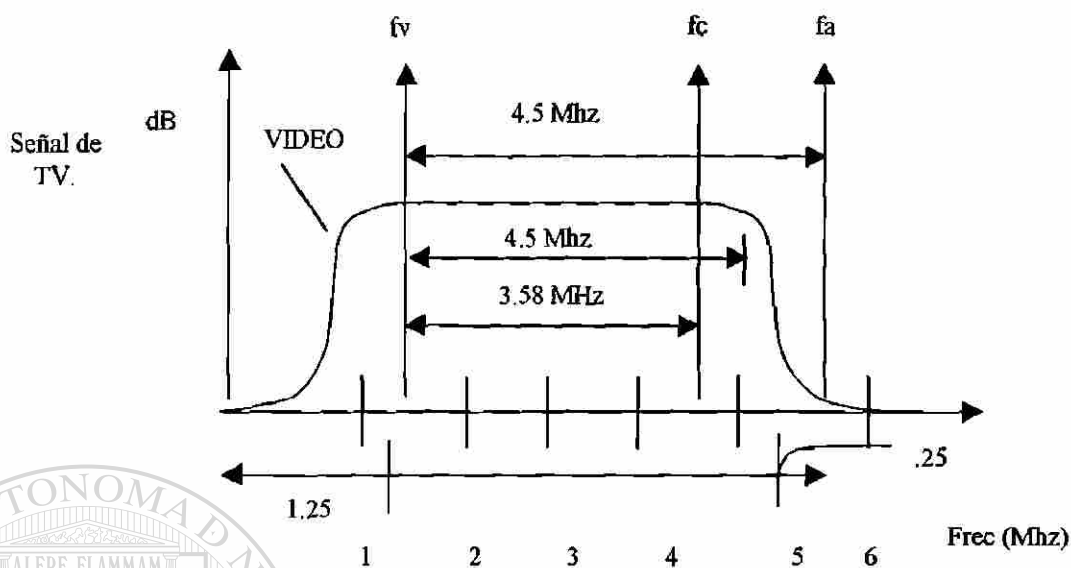
Por otro lado, con el desarrollo de esta práctica nos familiarizamos con el manejo del equipo de recepción del satélite, así como del posicionador del brazo mecánico para mover la antena parabólica.

5.3 PRÁCTICA # 3 (MEDICIONES EN BANDA BASE)

5.3.1 INTRODUCCIÓN

Toda la señal de T.V. proveniente del espacio, se encuentra modulada con portadores en Radio Frecuencia, por lo que el equipo receptor de satélite requiere "bajar" esa señal a Frecuencia Intermedia (FI), en donde sale modulada en la banda de VHF para los canales de T.V. 3 ó 4 generalmente en donde el aparato de receptor de T.V. se encarga una vez más de volver a demodular la señal de Televisión en Banda Base (6 Mhz), para poder extraer las portadoras de video, color y audio. La mayoría de los receptores de satélite, también demodulan la señal de FI a Banda Base, conteniendo conectores para salidas de audio y video de la señal en Banda Base.

La idea de ésta práctica para mediciones en Banda Base, es primeramente observar la señal de T.V. proveniente del satélite modulada en VHF entrante al canal 3 ó 4 del aparato de T.V., y posteriormente ya en Banda Base. Se puede decir que la señal de TV en Banda Base es la forma original de la señal transmitida por la fuente transmisora. En esta señal de Banda Base que ocupa un ancho de banda de 6 Mhz, se encuentran incluidas las portadoras de video de la señal de TV ($f_v = 1.25$ Mhz), la portadora de color ($f_c = 3.58$ Mhz) y la portadora de audio ($f_a = 4.5$ Mhz), como lo muestra la siguiente gráfica:



El ancho de banda de 6 Mhz para las señales de TV, se encuentra entre los siguientes intervalos de los canales utilizados:

Para Canal 03: entre 60 - 66 Mhz y para Canal 04: 66 - 72 Mhz.

5.3.2 OBJETIVO

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

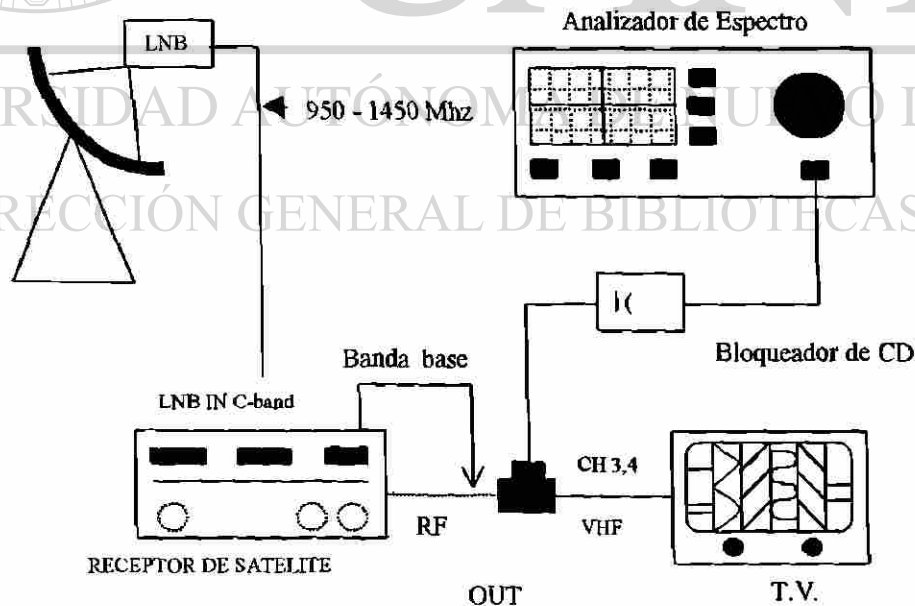
Que el alumno conozca los principales tipos de emisiones vía satélite, identifique su origen y describa sus características, mediante el uso del equipo apropiado de laboratorio.

III.- MATERIAL UTILIZADO Y ESQUEMA DE MEDICIÓN

En esta práctica se utilizó el siguiente material y equipo:

- Antena parabólica instalada en terraza del edificio Física Aplicada.
- Receptor de TV a color.
- Equipo receptor de satélite para TV (Para banda C y banda Ku) marca Echostar SDR-4000
- Localizador de satélite EQ-US S - 330.
- Cables coaxiales y conectores.
- Splitter o derivador de señal.
- Analizador de espectro marca Advantest R4131D

El esquema de medición en Radio Frecuencia para ésta práctica fue muy similar al de la práctica anterior, solo que en ésta, el analizador de espectro se conecta a la salida de FI del receptor de satélite, y a las salidas de audio y vídeo en banda base:



5.3.3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

1.- El alumno mencionará las distintas técnicas TX de datos vía Satélite.

Las técnicas de transmisión de datos vía satélite, son las ya conocidas para algún otro medio. El satélite representa otro medio de transmisión. La diferencia es el equipo utilizado para su modulación, lo que es el **MODEM**. Las técnicas que se utilizan para estos casos, son las diferentes formas de modular datos, es decir, la información digital puede canalizarse aun satélite mediante diferentes técnicas de acceso, con la información modulada en sus diferentes formas, pudiendo ser en **ASK, OOK, FSK, PSK**, y las diferentes variantes de la modulación en fase como **BPSK, QPSK**, etc.

Pueden multicanalizarse diferentes canales de datos o de voz para acceder un canal satelital, así como también señales de televisión.

En cuanto a las técnicas de acceso para transmisión por satélite, existen varios esquemas. Están por ejemplo los siguientes más conocidos:

FDMA ó Acceso Múltiple por División de Frecuencia, que es la más común que hay, en donde se asignan portadoras de frecuencia fijas a cada usuario, transmitiendo al mismo tiempo. Sus aplicaciones son en su mayoría en sistemas analógicos.

TDMA ó Acceso Múltiple por División de Tiempo, en donde se le asigna a cada usuario una ranura de tiempo para transmitir, con una sola portadora para todos. Se usa en comunicaciones digitales.

CDMA ó Acceso Múltiple por División de Código, que es la tercera técnica más común que hay para el acceso a transmisión de un satélite. Esta técnica se basa en el uso de un espectro esparcido, en donde los usuarios transmiten en una sola portadora y al

mismo tiempo. Se distingue por el uso de densidades de flujo de potencia pequeños para bajo tráfico. Tiene gran inmunidad a interferencias, pero con la desventaja de utilizar excesivo ancho de banda, ya que para transmitir un solo bit de información, puede utilizar 1023 bits de código para la información.

A parte de estas técnicas comunes, existen diferentes variantes a ellas como lo son el uso de protocolos de acceso aleatorio como DAMA basado en acceso por demanda, el cual puede utilizar los diferentes protocolos ALOHA para acceso por contienda.

2.- El alumno efectuará la identificación de señales de TV de la siguiente manera:

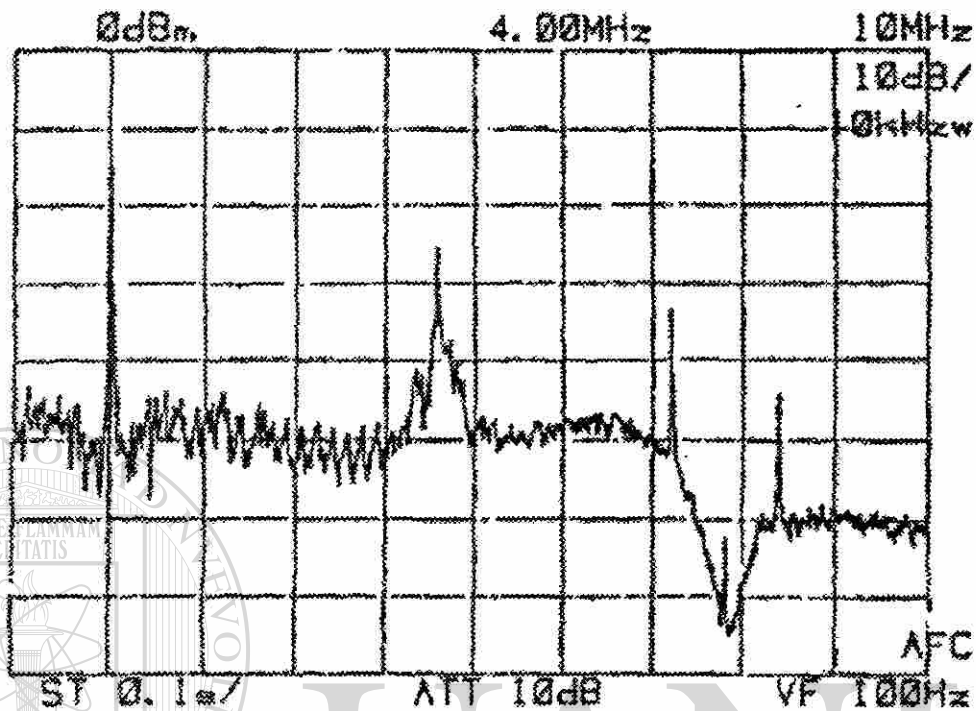
a).- Conectar el analizador de espectro a la señal de banda base de un receptor como lo muestra el esquema, e identificar lo siguiente:

i).- Ancho de banda total.

ii).- Subportadora de Video, Audio y Color.

iii).- Tipo de Modulación.

Para este primer caso al igual que los casos anteriores, se sintonizó un satélite conocido, para recibir una señal de TV. Como lo muestra el esquema de medición, primeramente se extrajo la señal de TV de un canal seleccionado (canal 14) en Banda Base de la salida del receptor de satélite, de donde se obtuvo la siguiente gráfica.



De acuerdo a ésta gráfica se obtienen los siguiente datos:

El ancho de banda total de esta señal de TV es de aproximadamente **7.75 Mhz**, y se puede apreciar las diferentes subportadoras, en donde se observa la de **VIDEO** primeramente **f_v** (de izq. a derecha) en **1.25 Mhz**. Después, a **3.58 Mhz** de la portadora de vídeo se aprecia la "espiga" de la portadora de **COLOR** (**f_c**), y por último a **6.2 Mhz** de la portadora de vídeo se observa una de las subportadoras de **AUDIO** (**f_a**). Y otras dos más a **6.8** y **7.4 Mhz** aproximadamente. Estas subportadoras de audio el receptor de satélite las demodula con estas portadoras en Banda Base, ya que por esa salida se extrajo la señal. Contiene otras dos salidas exclusivas de **AUDIO** y **VIDEO**, en donde la subportadora y de audio sale en **4.5 Mhz**. Dado el estándar NTSC, también cuando la señal en Banda Base del receptor de satélite se modula en RF (VHF) para los canales 3 ó 4, la subportadora de audio seleccionada en el receptor satelital viene también modulada con su portadora en los **4.5 Mhz**.

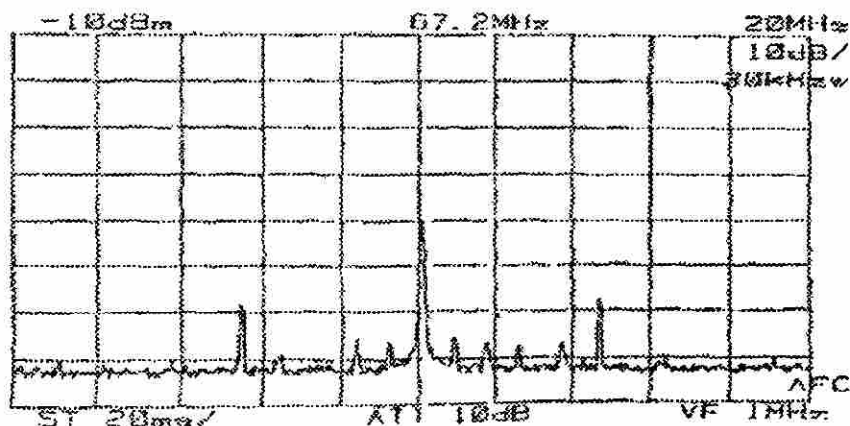
b).- A continuación se muestran los resultados obtenidos de la señal en Banda Base del receptor satelital, nivel recibido, y el tipo de modulación utilizado por las distintas subportadoras:

| PORTADORA | FRECUENCIA | NIVEL | MODULACION |
|------------------------|------------|----------|------------|
| Video | 1.25 Mhz. | -15 dB | |
| Color | 3.58 Mhz. | -24 dB | EN FASE |
| Subportadoras de Audio | 6.20 Mhz. | -34.8 dB | F.M. |
| | 6.80 Mhz. | -65.2 dB | |
| | 7.39 Mhz. | -47.2 dB | |

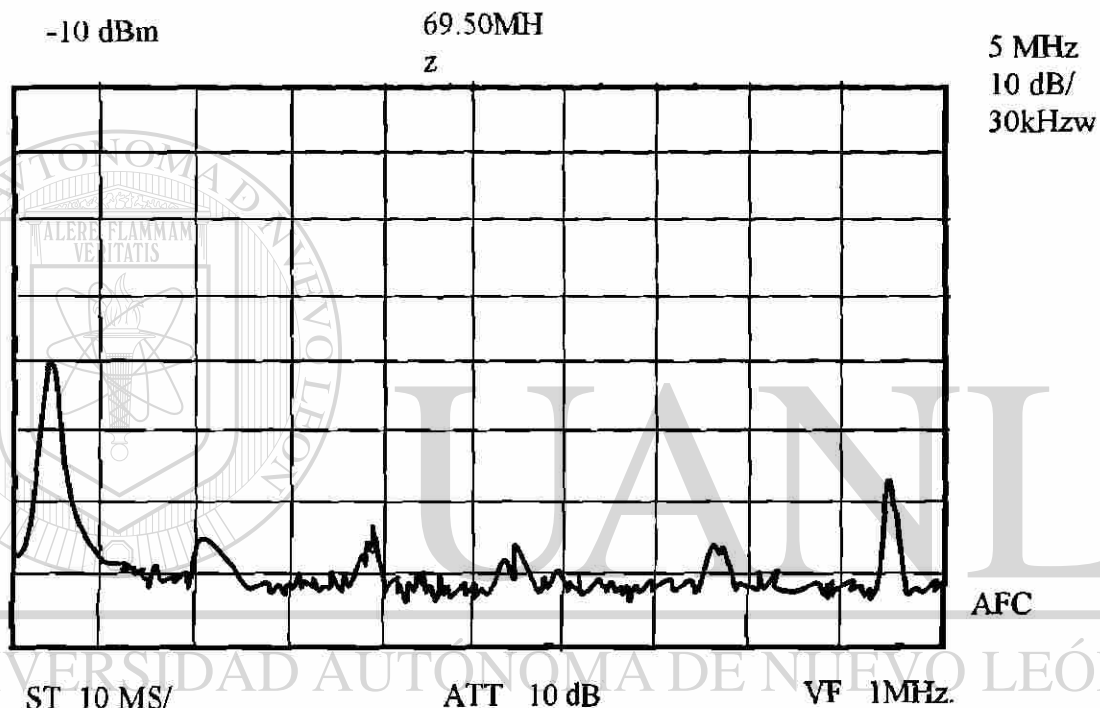
c).- Conectar ahora el analizador de espectro a la señal de FI e identificar lo siguiente:

- i) Ancho de banda de un canal.
- ii) Subportadoras de Video, Audio y Color.
- iii) Subportadoras de Datos (si existen).

Para este siguiente caso, el analizador se conecto a la salida de FI del receptor de satélite, modulado en el canal 4. La señal obtenida fue la siguiente:



Como se observa en el espectro en frecuencia de la señal de VHF para el canal 4 que se sintonizo en el aparato receptor de T.V., la señal compuesta de video esta modulada en Banda Lateral Doble, por lo que es simétrica en ambos lados del espectro. Se encuentra la misma información dentro de 6 Mhz para ambos lados; lo que sucede posteriormente es que la señal pasa a Banda Lateral Vestigial, en donde se elimina una Banda Lateral, y solo queda la información de una sola Banda, tomando parte de la



banda eliminada. De acuerdo a esto, se tomó una gráfica seleccionando la banda simétrica para ésta señal en canal 4. Esta gráfica es la siguiente:

Dado que se seleccionó el canal 4, cuyo rango de operación en RF es de 66 a 72 Mhz, como es de esperarse, la primera portadora que es la de imagen o de **VIDEO** (f_v) debe estar a 1.25 Mhz dentro del ancho de banda que ocupa, por lo que se supone debe estar en los $66 + 1.25 = 67.25$ Mhz. En la gráfica anterior se muestra el ancho entre 67 y 72 Mhz para mejor observación, cuyo ancho de banda medido es de 6 Mhz. En ese rango se aprecia la portadora de video precisamente en los 67.25 Mhz. La portadora de **COLOR** se encuentra a 3.58 Mhz de la portadora de video, es decir, en la frec. de 70.83 Mhz con

una amplitud mucho muy pequeña. Y por último a los 4.5 Mhz se observa con ligeramente mayor amplitud la portadora de **AUDIO** (71.75 Mhz).

d).- Tomar datos de lo anterior.

Para la señal de FI, los datos medidos sobre la gráfica del analizador de la señal de video para el canal 4 (66 - 72 Mhz) son los siguientes:

| PORTADORA | FRECUENCIA | AMPLITUD |
|-----------|------------|----------|
| Video fv | 67.23 Mhz | -49.2 dB |
| Color fc | 70.79 Mhz | -76.0 dB |
| Audio fa | 71.71 Mhz | -67.0 dB |

Finalmente, en la gráfica pasada se alcanzan a distinguir 3 subportadoras más de amplitud pequeña parecida a la portadora de color. Posiblemente algún tipo de información adicional como datos, o quizá algunas armónicas generadas.

5.3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los resultado que se fueron obteniendo en el desarrollo de las dos partes de esta práctica, en observación de la señal en banda base y en VHF a la entrada del televisor, se fueron analizando en el apartado anterior. Corroboramos el distanciamiento de las distintas subportadoras de una señal de televisión, como lo son las de VIDEO a 1.25 Mhz, la de COLOR a 3.58 Mhz, y la de AUDIO a 4.5 Mhz, dentro de un ancho de banda de 6 Mhz que tiene la señal de TV. Esto se observó tanto en VHF en el ancho de banda del canal 4 de la TV. (66 - 72 Mhz.) como en Banda Base. Pero lo que es necesario mencionar, es que la señal en Banda Base se obtuvo de la salida de BANDA BASE del

receptor de satélite, por lo que en este caso una señal de este tipo contiene otras 2 subportadoras más de audio, como lo mostró la gráfica es decir no se encuentra una sola a 4.5 Mhz, ni el ancho de banda es de los 6 Mhz, sino aproximadamente 7.5 Mhz. Los valores ya se anotaron, y de igual manera se pueden comprobar en forma física con el aparato receptor de satélite, en donde se puede seleccionar cualquiera de esas subportadoras de audio, en donde existe una sola que es la del canal transmitido, y al o las otras son de otro canal de diferente polaridad.

5.3.5 CONCLUSIONES

Como parte final de éste reporte, mencionamos en él algunas de las formas que existen para transmitir datos por un canal satelital, se comento en forma breve las técnicas demodulación ya estudiadas en otro curso para la transmisión de datos sobre algún medio analógico. De igual forma algunas de las técnicas de acceso que se utiliza en satélite para radiar y transmitir sus señales en las portadoras correspondientes a la banda utilizada.

Dentro de estas señales transmitidas y por lo tanto recibidas de los satélites, se encuentran las señales de TV, las cuales identificamos con el equipo de laboratorio requerido. Pudimos hacer mediciones de la señal a la salida de un receptor satelital, tanto en Banda Base, que es su forma original de transmisión dentro de un ancho de banda de 6 Mhz que también medimos y comprobamos, como en VHF modulada para captarla por un aparato televisor en canal 3 ó 4. En ambos casos observamos y conocimos los componentes de una señal de TV y alguna de sus características: identificamos sus diferentes portadoras que la componen, como son la de video, color y audio, realizando lecturas de frecuencia para comprobación, de amplitud y de ancho de banda total ocupado por ellas.

Comprobamos las mismas características de la señal en Banda Base como la modulada en VHF para los canales 3 ó 4. Se encuentran recorridas en frecuencia para poderlas ver en el canal de TV seleccionado. Como ya lo mencioné, encontramos en banda base una diferencia de ancho de banda total y frecuencia de portadora de audio, ya que existen otras subportadoras contenidas dentro de ese intervalo, y que de acuerdo al seleccionado en el receptor de satélite, al transmitirse en el estándar usado, el audio escogido se modula en la portadora de 4.5 Mhz que identifica a la señal de TV y que es recuperada por los aparatos de Televisión.

Fue interesante observar el espectro en frecuencia de éstas señales en sus dos formas, conocer sus componentes, y comprobar sobre todo sus anchos de banda y frecuencias portadoras.

5.4 PRÁCTICA # 4 (IDENTIFICACIÓN DE PORTADORAS T.V.)

5.4.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicación emplean el espectro de frecuencia electromagnética[®] (VLF, LF, MF, HF, VHF, UHF, SHF, EHF) para transmitir. Las frecuencias usadas para las comunicaciones por satélite están localizadas en super altas frecuencias (SHF) y extremadamente altas frecuencias (EHF), estas bandas de frecuencia son divididas tal y como se muestra en la tabla 1. El manejo del espectro es una importante actividad que facilita el uso ordenado del espectro de frecuencias electromagnéticas no únicamente para satélite si no para otras aplicaciones de telecomunicaciones. Todo esto es hecho bajo el auspicio de la unión internacional de telecomunicaciones (ITU), la cual es una agencia especializada de las Naciones Unidas (UN)

| Banda de frecuencia | Rango (GHz) |
|---------------------|-------------|
| L | 1 - 2 |
| S | 2 - 4 |
| C | 4 - 8 |
| X | 8 - 12 |
| Ku | 12 - 18 |
| K | 18 - 27 |
| Ka | 27 - 40 |

Tabla 1

Un sistema de satélite consiste básicamente de un satélite en el espacio enlazado con varias estaciones terrenas, tal y como se muestra esquemáticamente en la figura 1. El usuario genera la señal banda base la cual es enrutada a la estación terrena a través de la red terrestre. La red terrestre puede ser un teléfono o una línea dedicada a la estación terrena. En la estación terrena la señal banda base es procesada y transmitida por un modulador de radio frecuencia.

El satélite esencialmente amplifica la señal recibida, para después transmitirla a las estaciones terrenas. El primer método de modulación usado fue modulación en frecuencia (FM). En este modo de transmisión la señal no tiene fluctuación de amplitud. Debido a esto el transmisor puede ser operado en una manera más eficiente, esto es, a potencia completa. A menudo un usuario no requiere todo el ancho de banda completo de transponder. Varias señales pueden ser transmitidas simultáneamente e independientemente, proveyendo ello una amplificación sin problemas. Esto requiere que el amplificador sea lineal y menos eficiente. La ventaja es que los múltiples usuarios de estaciones terrenas pueden comunicarse simultáneamente a través del mismo canal del satélite. Esta técnica es llamada FDMA. (Frequency division multiple access)

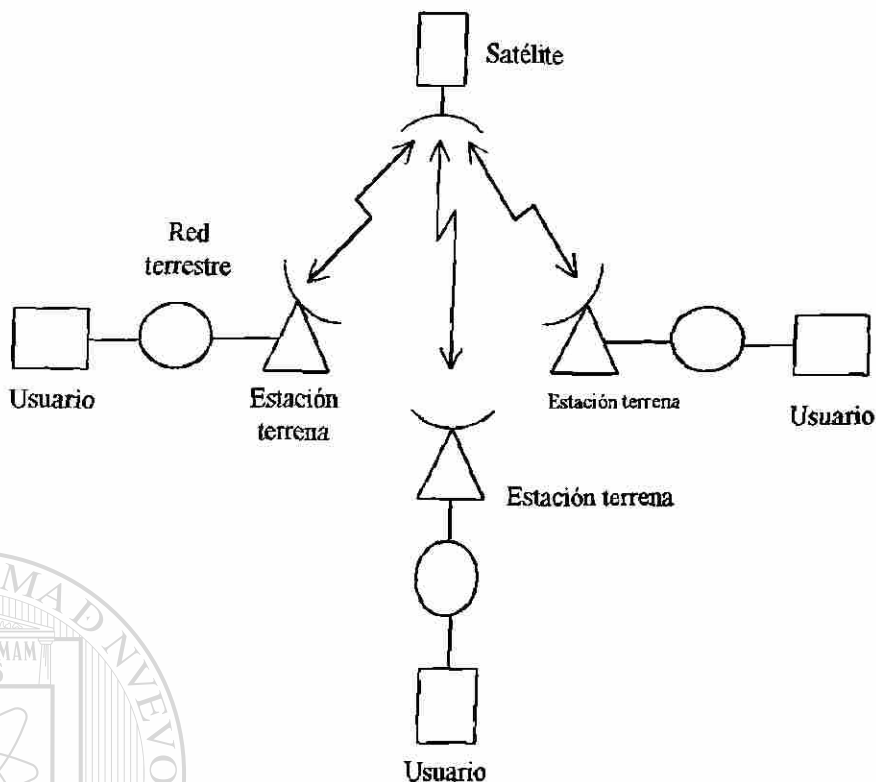


Figura 1

Comunicaciones comerciales de satélites usan una banda de frecuencia de 500 Mhz.

Usualmente los 500 Mhz son divididos en doce canales de aproximadamente 40 MHz cada uno. El nivel de potencia de transmisión para un canal de 40 MHz es típicamente del orden de 5 a 10 W.

Esto permite que cada transponder puede transportar un canal de TV ó alrededor de 1500 circuitos analógicos de voz. Si la modulación digital es usada, transponders con razón de datos de 50 a 100 Mb son permitidos.

Una vieja técnica de modulación llamada SSB (Single Sideband) está encontrando popularidad en las comunicaciones por satélite, debido a que tiene una gran capacidad de manejo de voz. Teóricamente alrededor de 10000 circuitos de voz pueden

ser transportados sobre un transponder de satélite sencillo, en la práctica alrededor de 7000 circuitos de voz pueden ser manejados.

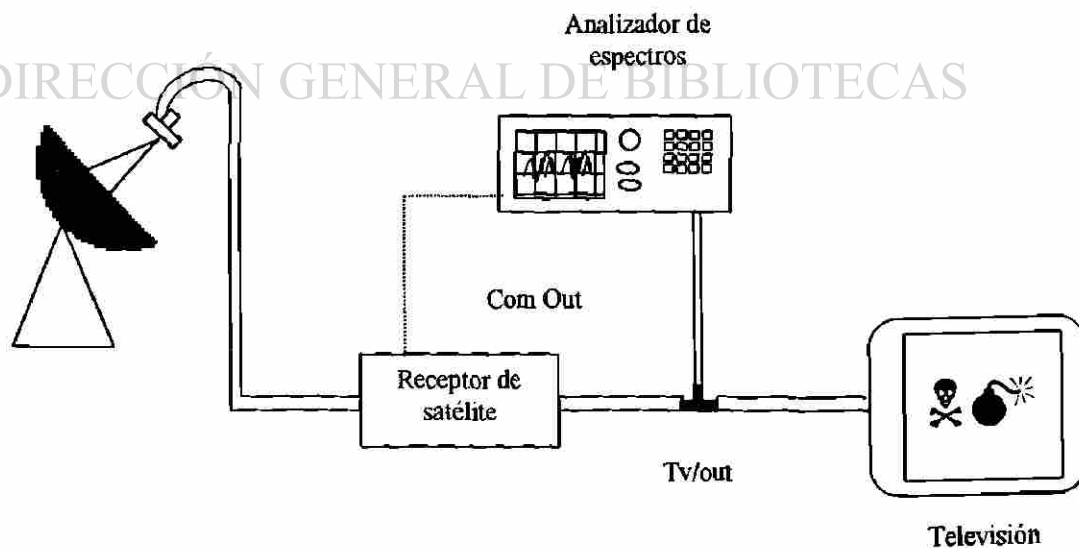
5.4.2 OBJETIVO

Identificar portadores de canales de televisión que se transmiten en las comunicaciones satelitales.

Material Utilizado

- Analizador de espectros Tektronix 2711
- Receptor de satélite Unidad videocipher II
- Televisión Samsung
- Conectores BNC, RCA, N.

Esquema de medición o de conexión



5.4.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Tal y como lo muestra el diagrama de conexión se realizaron dos conexiones, una para medir señales en banda base (1) y otra para medir ya la señal de salida directa a la TV.

En lo que se refiere a la conexión 1 se conecto al analizador de espectros la salida com out del receptor de satélite; una vez desplegada la señal en el analizador se identificaron las portadoras de los canales de TV que se analizaron, en el caso de nuestra práctica fueron dos canales, el canal 14 y el canal 8 de satélite Morelos 2 (M2), una vez identificadas las portadoras medimos la relación señal a ruido (S/N) y el ancho de banda de cada portadora por canal. En este proceso se recorrió todos los canales del satélite para ver si se encontraba alguna medición interesante para realizar.

Por último, en la conexión 2, se conecto al analizador de espectros la salida TV/OUT del receptor de satélite (aquí se alterno tanto el canal 3 como el canal 4), en esto debíamos identificar las portadoras en AM - BLV, medir la relación señal a ruido de cada canal y ancho de banda de cada portadora.

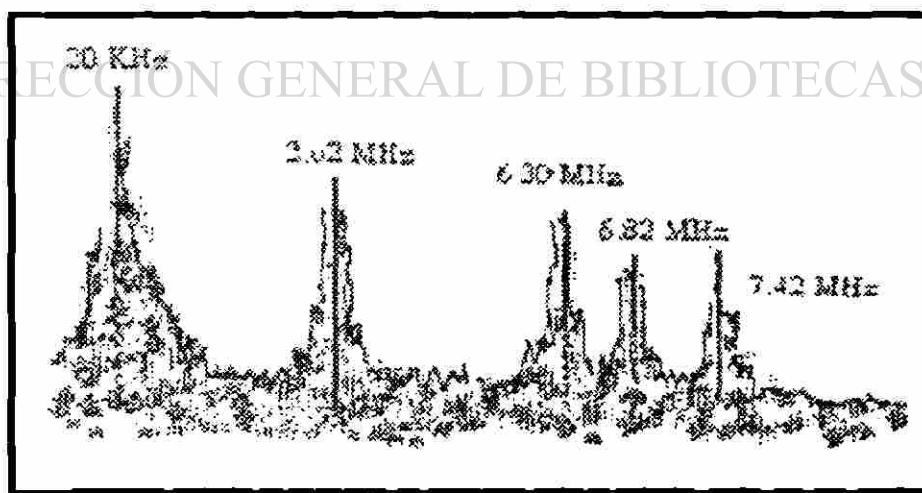
5.4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El resultado de cada una de las mediciones, tanto en la conexión 1 como en la conexión 2 se muestran en las tablas que se anexan a continuación.

| Portadora | Frecuencia Central (MHz) | Ancho de banda (KHz) | S/N |
|----------------|--------------------------|----------------------|------|
| - | 1.16 | 80 | 0.53 |
| Color | 3.56 | - | 0.36 |
| Audio | 6.20 | 160 | 0.60 |
| Tx de Datos | 6.80 | 120 | 0.57 |
| Audio de radio | 7.36 | 120 | 0.56 |

Tabla 2

La tabla 2 muestra el resultado de las mediciones efectuadas a la señal banda base del canal 8 del satélite M2, se observa que algunas mediciones no se pudieron realizar, e incluso algunas portadoras no se pudieron identificar a qué correspondía. Para este canal el nivel de ruido que se midió fue de -47 dBm. En estas mediciones se observa que el ancho de banda de la portadora de video fue de 6 Mhz.



Gráfica 1

La tabla 3 muestra el resultado de las mediciones realizadas en el canal 14 de satélite ya antes mencionado. Para este canal el nivel de ruido que se midió fue de -54.6 dBm. La gráfica 1 muestra la señal resultante en el analizador de espectros.

En las mediciones de este canal también se pudieron distinguir señales que eran componentes de video de alta potencia, que de repente ocasionaban confusión, ya que se presentaban también junto con las portadoras enlistadas en las tablas.

| Portadora | Frecuencia Central (MHz) | Ancho de banda (KHz) | S/N |
|----------------|--------------------------|----------------------|------|
| Color | 3.62 | 520 | 0.52 |
| Audio | 6.30 | 240 | 0.47 |
| Tx de daatos | 6.82 | 160 | 0.51 |
| Audio de radio | 7.42 | 280 | 0.49 |

Tabla 3

Como se observa en los datos enlistados, no solo se identificaron las portadoras de la señal de televisión, sino que se detectaron dos portadoras más, una de ellas no se pudo identificar plenamente pero se pensó que podría ser una portadora de transmisión de datos, la otra portadora era una portadora también de audio pero no de televisión, si no de una estación de radio.

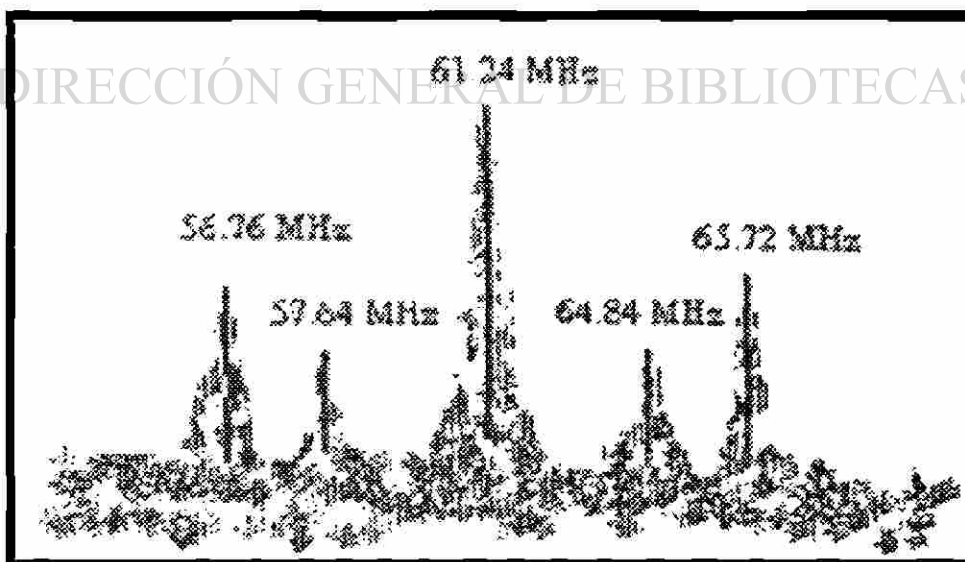
Al estar recorriendo cada uno de los canales del satélite, se observó que en el canal 22 se tiene una señal codificada en video view guard de la compañía Letch, el audio en este caso no estaba codificado.

A continuación se presenta una tabla de las mediciones que se realizaron para la conexión 2, donde la señal que se analizó fue la señal proveniente de la salida TV/OUT del receptor de satélite.

| Frecuencia (MHz) | Ancho de banda (Khz) | S/N |
|------------------|----------------------|------|
| 56.76 | 160 | 0.64 |
| 57.64 | 160 | 0.81 |
| 61.24 | 5440 | 0.49 |
| 64.84 | 480 | 0.87 |
| 65.72 | 320 | 0.63 |

Tabla 4

En esta señal al medir el nivel del ruido el resultado fue de -99 dBm. A continuación se presenta en la gráfica 2 la señal resultante en el analizador de espectros.



Gráfica 2

5.4.5 CONCLUSIONES

El hecho de que se monten subportadoras de audio ó de transmisión de datos, esta relacionado con lo que se comentaba en la introducción, de que en ocasiones un usuario no ocupaba toda la capacidad de canal, por lo que en casos como estos se transmite distinta información de manera simultánea e independiente, en este caso la señal de televisión no se ve afectada por la presencia de una portadora de audio o de datos.

En la gráfica 2 se observa que el espectro resultante corresponde a una señal modulada en AM - BLD (banda lateral doble) y no banda lateral vestigial como se supone se modula la señal de video, lo que pasa es que en el receptor no se colocan los filtros adecuados por cuestiones de reducir costos, pero en realidad este factor no afecta a la TV. ya que la circuitería de la TV sí limita la señal a que sea banda lateral vestigial, en donde sí afecta este factor es en la TV por cable.

Se debe tener mucho cuidado en no confundir las señales de video con alto contenido de potencia, con la subportadoras de TV.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



BIBLIOGRAFÍA

Texto : PRINCIPLES OF COMMUNICATION SATELITES

Autor : Gary D. Gordon

Editorial : John Wiley & Sons. Inc

Año : 1993

Texto : SATELITE COMMUNICATIONS.

Autor : Timothy Pratts

Editorial : John Wiley & Sons. Inc.

Año : 1986

Texto : TELECOMMUNICATION TRANSMISSION HANDBOOK

Autor : Roger L. Freeman

Editorial : John Wiley & Sons. Inc.

Año : 1998

Texto : MANUAL TECNICO DEL SISTEMA SOLIDARIDAD, II
TELECOMM

Año : 1994

Texto : SISTEMAS DE MICROONDAS

Autor : M.C. Fernando Estrada salazar.

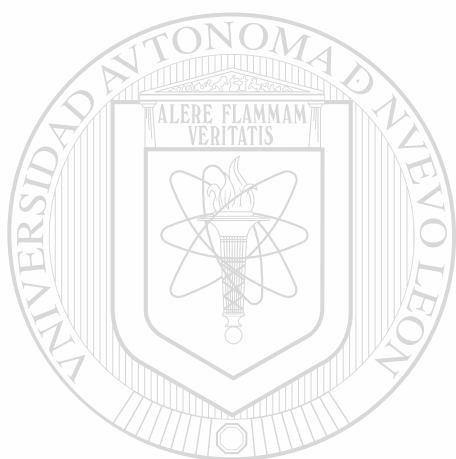
Editorial : FIME (U.A.N.L.)

Año : 1998

LISTADO DE TABLAS

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabla 2.1 | Ejemplo de la suma de masas. | 34 |
| Tabla 2.2 | Seguridad de un satélite de comunicaciones | 39 |
| Tabla 3.1 | Parámetros usualmente en unidades de decibeles. | 46 |
| Tabla 3.2 | Relación numérica entre razón y decibeles. | 47 |
| Tabla 3.3 | Ejemplo del uso de decibeles. | 48 |
| Tabla 3.4 | Pérdidas de trayectoria en el espacio libre | 63 |
| Tabla 3.5 | Forma corta de un cálculo ascendente. | 70 |
| Tabla 3.6 | Forma corta de un cálculo descendente | 74 |
| Tabla 3.7 | Forma corta para un enlace de satélite móvil, cálculo ascendente | 76 |
| Tabla 3.8 | Forma corta para un enlace de satélite móvil, cálculo descendente. | 76 |
| Tabla 3.9 | Forma corta para un servicio de satélite de radiodifusión, cálculo ascendente. | 77 |
| Tabla 3.10 | Forma corta para un servicio de satélite de radiodifusión, cálculo descendente. | 77 |
| Tabla 3.11 | Forma corta para T.V. internacional, cálculo ascendente. | 78 |
| Tabla 3.12 | Forma corta para T.V. internacional, cálculo descendente. | 78 |
| Tabla 4.1 | Ventanas para servicio punto a punto (ventanas de operación) | 85 |
| Tabla 4.2 | Valores de R_p de acuerdo al porcentaje del año | 91 |
| Tabla 4.3 | Atenuación específica en función de la frecuencia de operación (valores de a y b en función de la frecuencia) | 98 |
| Tabla 4.4 | Intensidad de lluvia excedida para diferentes porcentajes del año. | 110 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tabla 4.5 | Atenuación específica usando los coeficientes que dependen de la frecuencia (polarización horizontal y vertical) | 111 |
| Tabla 4.6 | Resultados de la aplicación de los modelos NASA, ITU-R para diferentes ciudades de la República Mexicana. | 155 |



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTADO DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 2.1 | Un satélite geostacionario tiene un período orbital igual al periodo de rotación de la Tierra y una inclinación orbital a el plano ecuatorial de la tierra. | 8 |
| Figura 2.2 | Esquema del enlace de un satélite de comunicaciones. | 12 |
| Figura 2.3 | Niveles de potencia en el satélite INTELSAT. | 14 |
| Figura 2.4 | Potencia recibida de un transmisor isotrópico. | 16 |
| Figura 2.5 | Ejemplo de un satélite de “cuerpo estabilizado” | 24 |
| Figura 2.6 | Ejemplo de un satélite giratorio | 25 |
| Figura 2.7 | Diagrama a bloques de un subsistema de comunicaciones y soporte de la nave espacial. | 27 |
| Figura 2.8 | Componentes principales de un subsistema de comunicación del INTELSAT VI | 28 |
| <hr/> | | |
| Figura 2.9 | Telemetría, mando | 30 |
| Figura 2.10 | Subsistema de potencia eléctrica de 1KW. Muchos componentes son duplicados para redundancia. | 31 |
| Figura 2.11 | Sistema de control de posición. | 32 |
| Figura 2.12 | Estructura de un satélite de comunicaicones. | 36 |
| Figura 2.13 | Temperatura promedio de un satélite dependiendo de la razón de absorción de la superficie α a emisitividad. ϵ , razón del área proyectada a al área de la superficie total A y disipación interna. | 37 |
| Figura 4.1 | Atenuación especifica debido a los gases atmosféricos. | 83 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 4.2 | Exceso de atenuación debido a la lluvia en longitudes de onda de 6.2 y 4.2 mm (48 y 70 GHz) | 88 |
| Figura 4.3 | Regiones climáticas continentales para el método global. | 90 |
| Figura 4.4 | Regiones climáticas oceanicas para el método global. | 92 |
| Figura 4.5 | Regiones de lluvia para la República Mexicana | 93 |
| Figura 4.6 | Curvas para las ocho regiones designadas de la A a la H para un promedio de intensidad de lluvia. | 93 |
| Figura 4.7a | Gráficas de altura isotérmica Variable | 95 |
| Figura 4.7b | Gráficas de altura de los cero grados isotérmicos. | 96 |
| Figura 4.8 | Regiones de lluvia para América método ITU-R. | 105 |
| Figura 4.9 | Regiones de lluvia para Europa y Africa método ITU-R. | 106 |
| Figura 4.10 | Regiones de lluvia para Asís y Oceanía método ITU-R. | 107 |
| Figura 4.11 | Regiones de lluvia para la República Mexicana. | 108 |

GLOSARIO

| | |
|-----|--|
| Km | - Kilómetros |
| ITU | - Unión Internacional de Telecomunicaciones. |
| FCC | - Comisión Federal de Comunicaciones. |
| N | - Norte |
| W | - Watts |
| Pt | - Potencia de transmisión |
| S | - Distancia entre el transmisor y receptor |
| Ae | - Area efectiva de la antena |
| C | - Potencia de la portadora |
| RF | - Radio – frecuencia |
| G | - Ganancia de la antena |
| K | - Grados Kelvin |

GHz - Giga Hertz

TWTA - Amplificadores de tubo de ondas viajeras

SSPA - Amplificadores de potencia en estado sólido

Kg Kilogramos

λ Longitud de onda

DC Corriente directa

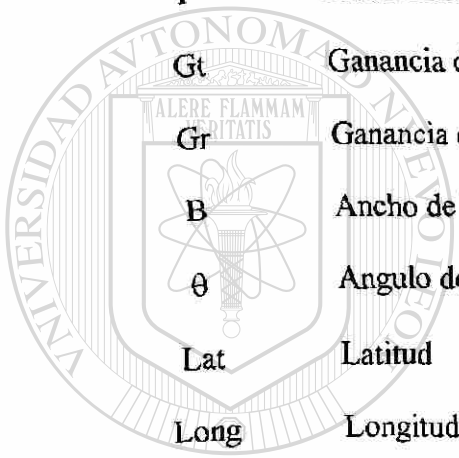
DB Decibel

EIRP Potencia radiada equivalente isotropicamente

L Perdidas en la trayectoria de espacio libre

Ts Sistema de temperatura de ruido

| | |
|----------|---|
| G/T_s | Figura de mérito para los sistemas de recepción |
| C/T | Razón de la portadora a ruido térmico |
| C/No | Razón de la portadora a densidad de ruido |
| C/N | Razón de la portadora a ruido |
| η | Eficiencia de la antena |
| A | Area física de la antena |
| D | Diámetro de la antena |
| F | Frecuencia en hertz |
| G_t | Ganancia de la antena transmisora |
| G_r | Ganancia de la antena receptora |
| B | Ancho de banda |
| θ | Angulo de elevación |
| Lat | Latitud |
| Long | Longitud. |



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Jorge Franco Quintanilla, nació el 31 de Mayo de 1959 en Tuxpan, Veracruz, México. Sus padres son Antonio Franco Moreno y Lucinda Quintanilla de Franco. Estudió la carrera de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones, en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, titulándose en Agosto de 1982. Trabajó en HYLSA, CYDSA, JAR Electrónica Aplicada y en el Conalep Guadalupe. Actualmente labora como catedrático de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Su tesis "Análisis del comportamiento de señales en bandas arriba de 10 GHz en las comunicaciones satelitales" es el proyecto de investigación para obtener el grado de: Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Electrónica.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

