

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.

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.

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.

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.

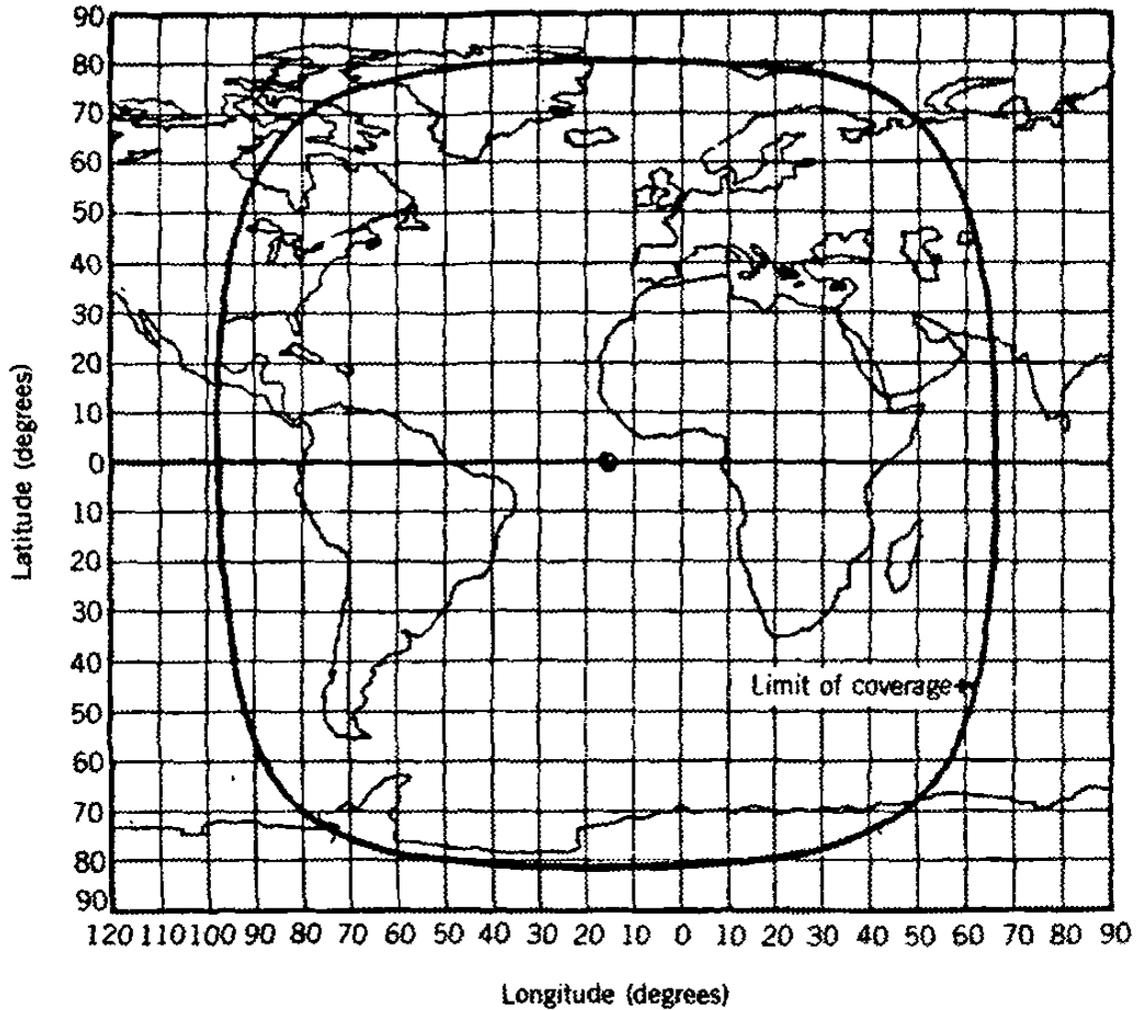


Figura 2.1

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 geosincronas, 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.

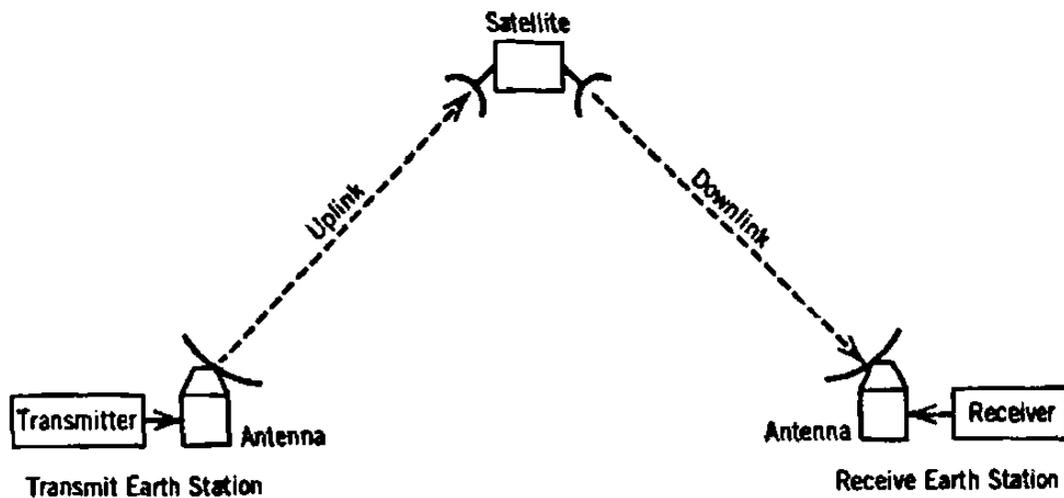
En una órbita geosíncrona, el movimiento del satélite está sincronizado con la tierra, y tiene el mismo periodo de 24 horas como la rotación de la tierra. Muchos satélites de comunicación usan impulsores para mantener la inclinación orbital dentro de unos cuantas décimas de un grado del ecuador. Estos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

2.2.3 ¿QUÉ HACE EL SATÉLITE?

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.



Satellite communications links schematic.

Figura 2.2.

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.

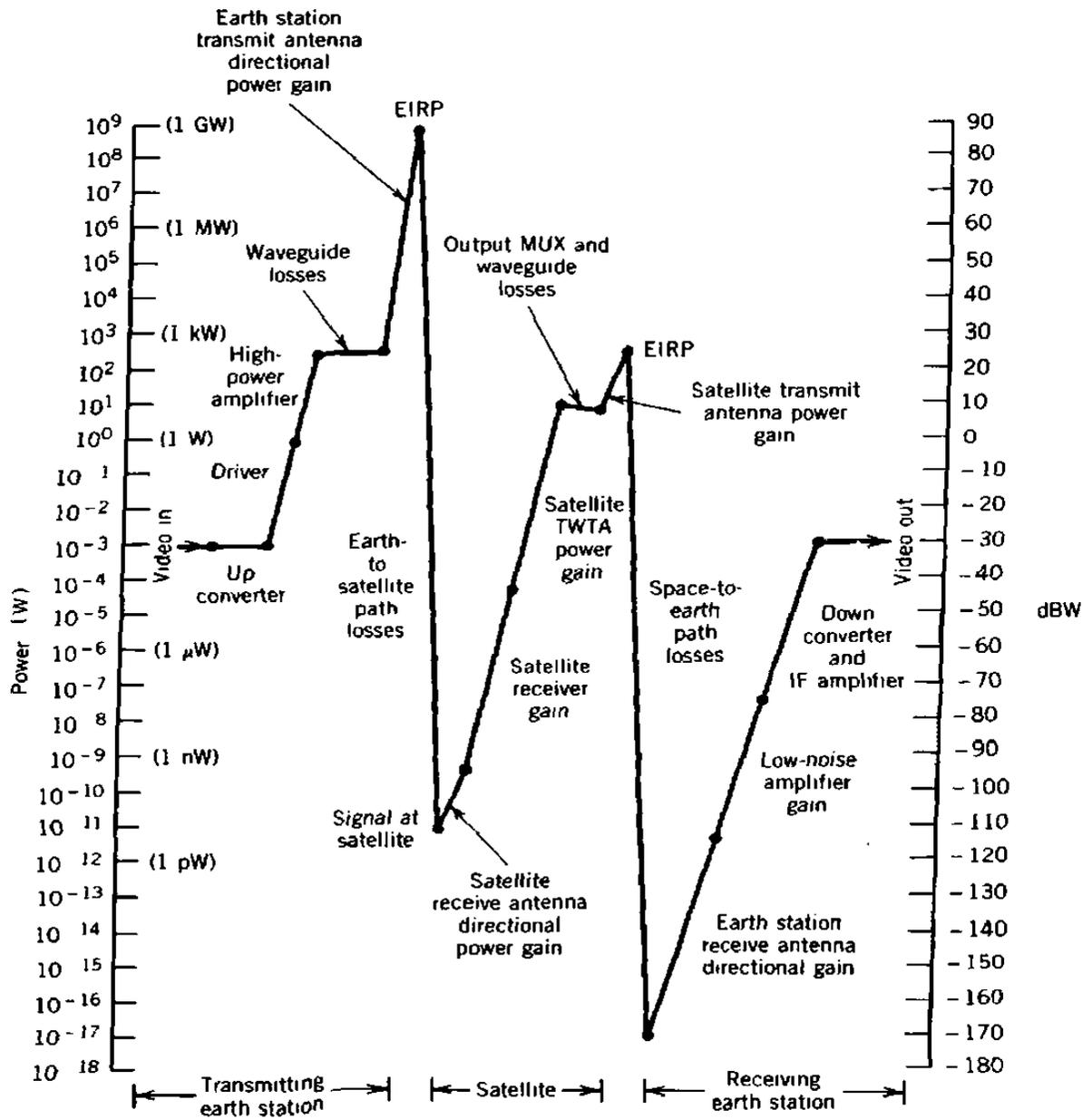
La mayoría de los satélites de comunicación contienen repetidoras que amplifican las señales recibidas. Los satélites pueden también demodular la señal recibida a banda base y después remodularla de varias maneras para la retransmisión hacia las estaciones de

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.

Figure 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 lleando (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:

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

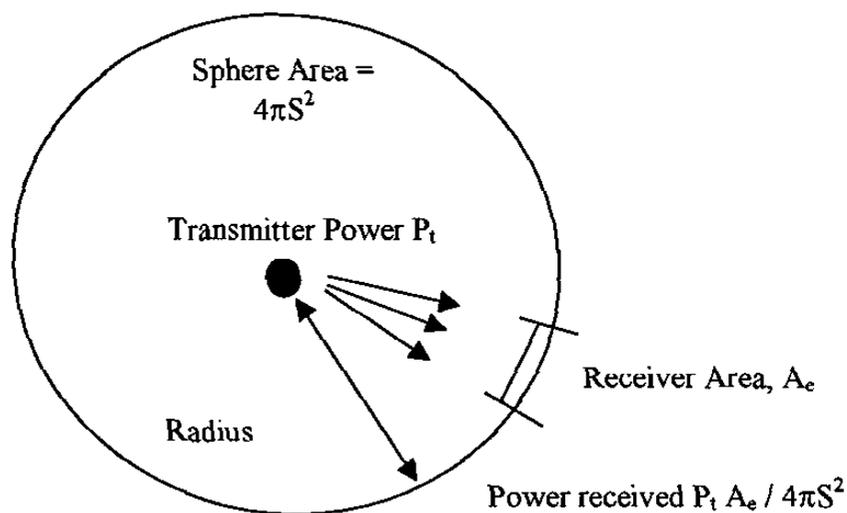


Figura 2.4

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.

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 compresión 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 mas 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.

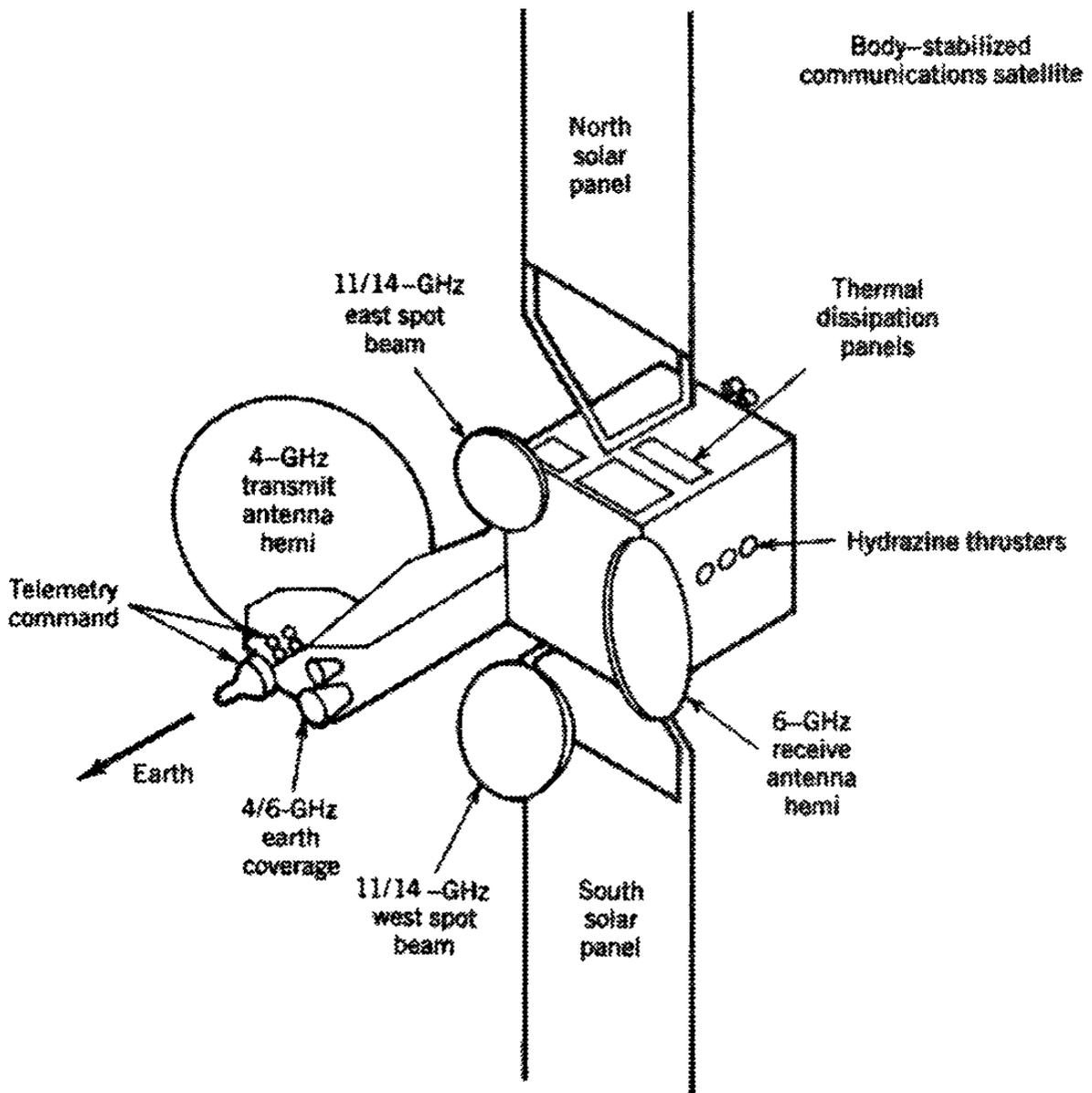
Muchos factores, no todos técnicos, son incluidos en la elección de la configuración del satélite, la configuración seleccionada afecta a muchos subsistemas de nave espacial. Las varias configuraciones de los satélites han sido construcción, lanzamiento y operación.

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.

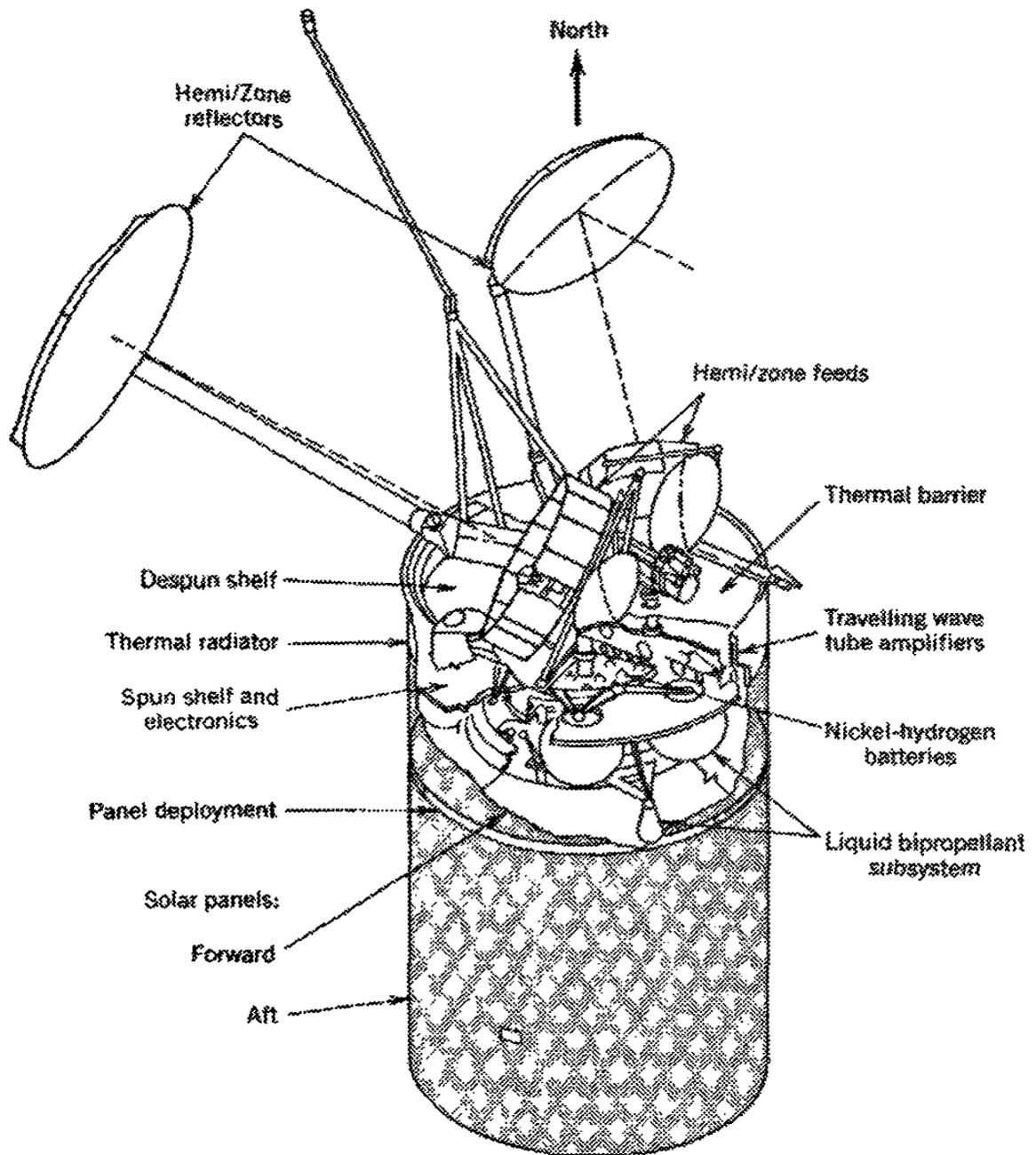
Un ejemplo de un satélite de comunicación de cuerpo estabilizado es mostrado en la figura 2.5. Las formaciones solares son usualmente paneles desplegados y giran alrededor de un eje norte-sur. Algunas antenas dan la cara a la tierra, con los platos grandes para los haz mas estrechos. Las amplificaciones 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).

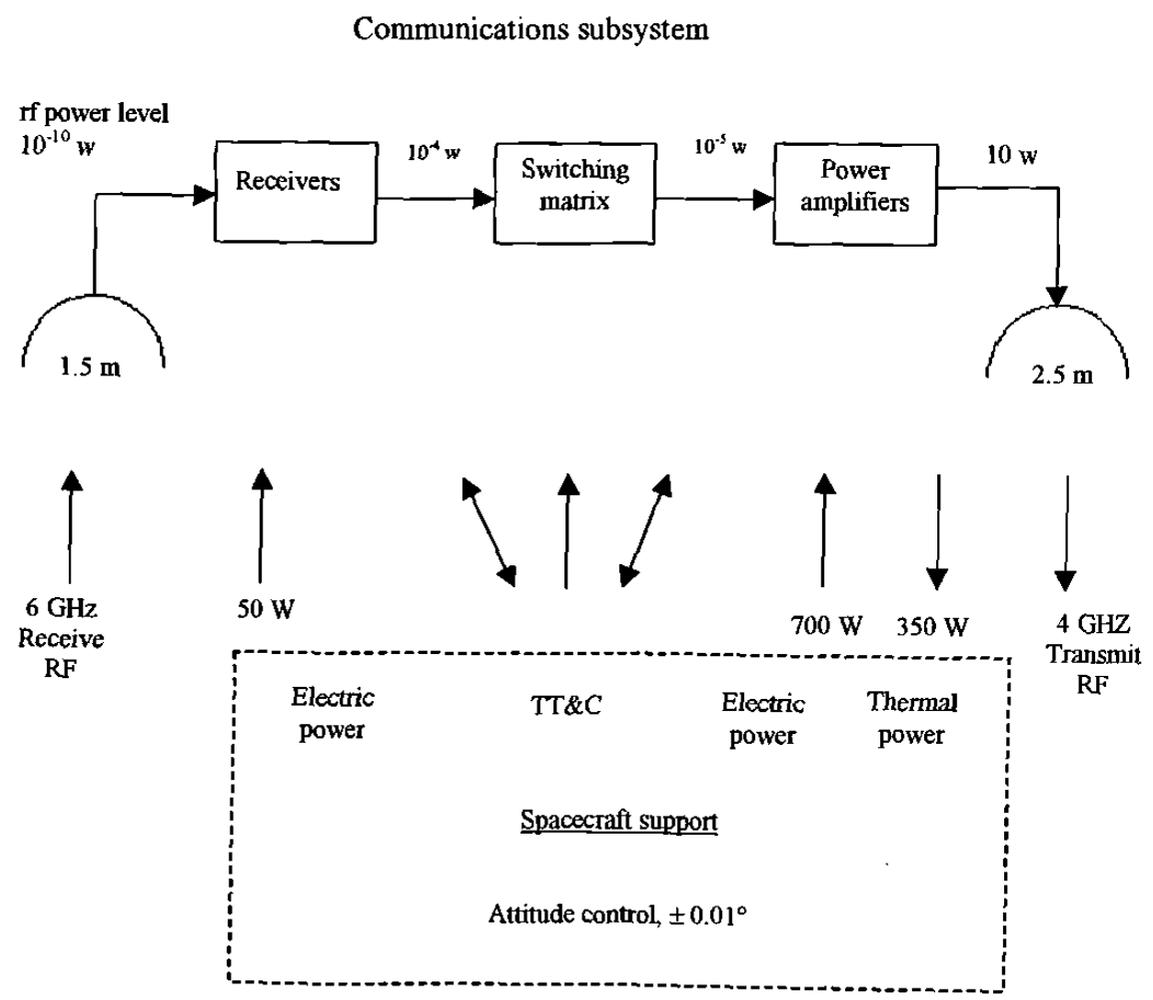
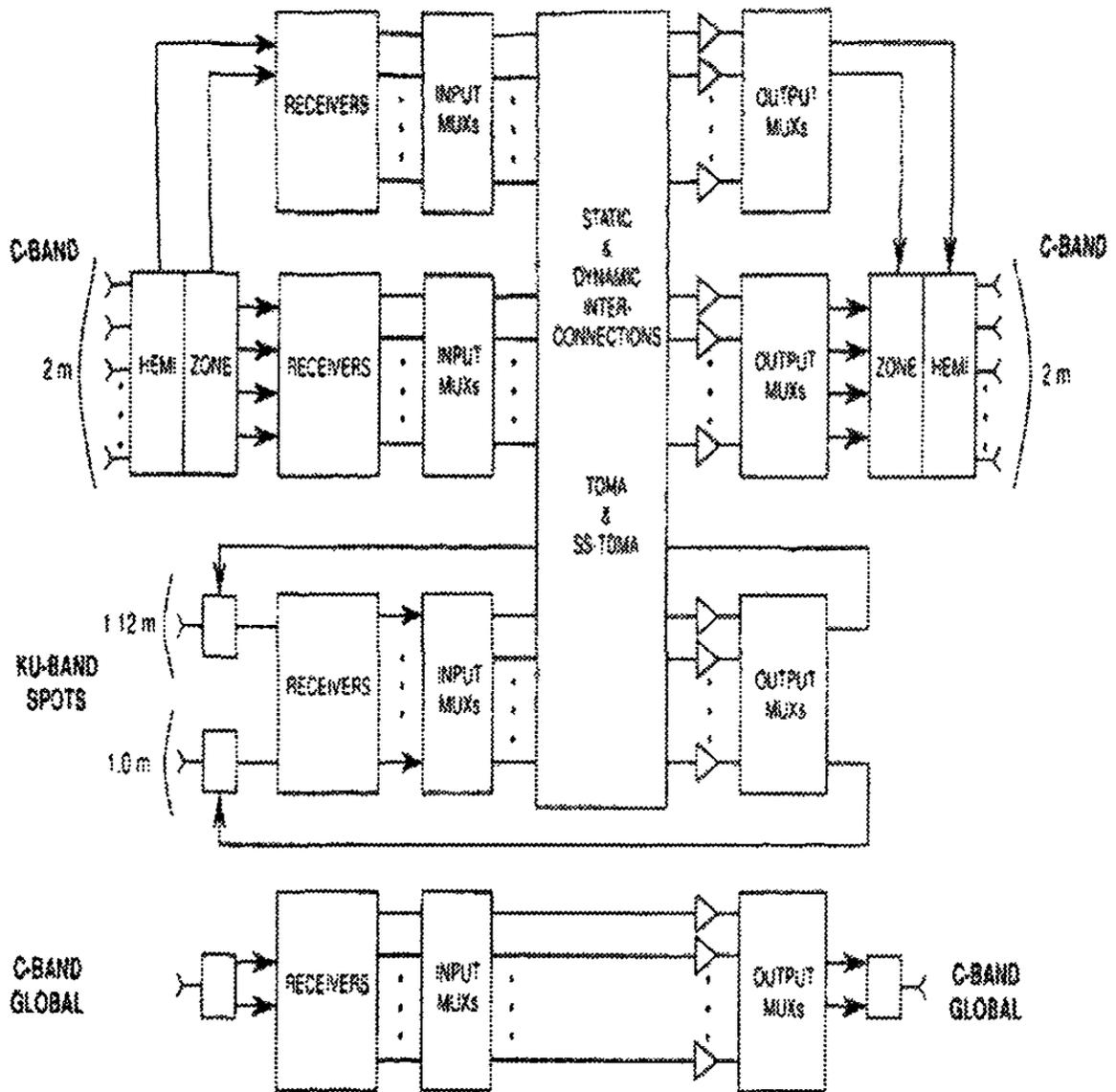


Figura 2.7



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.

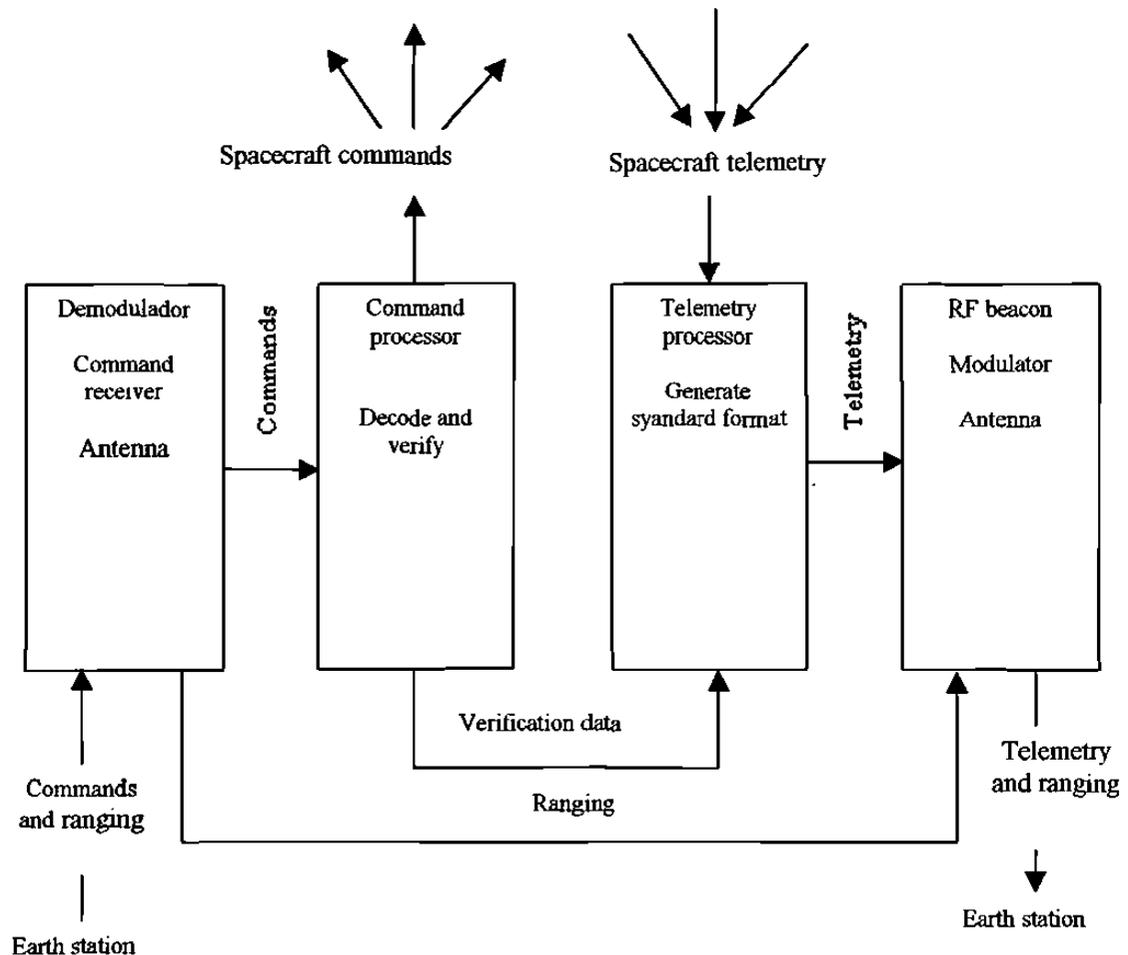


Figura 2.9.

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

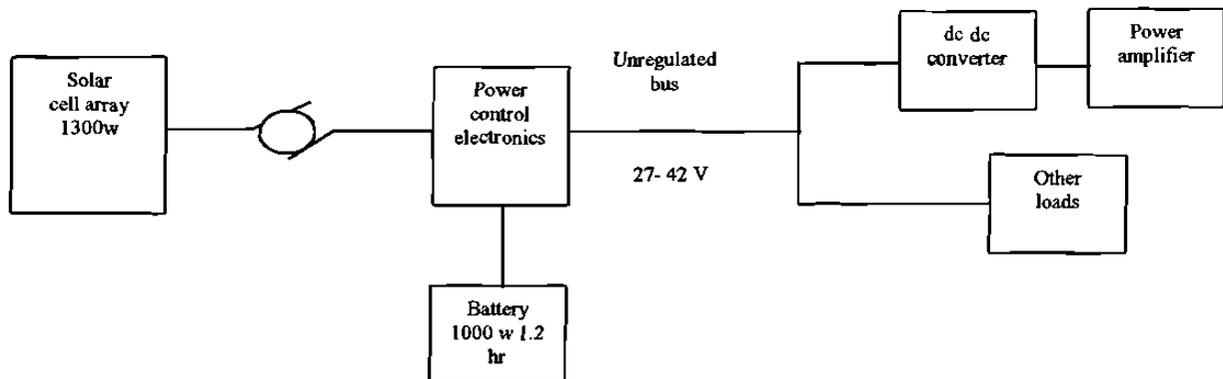


Figura 2.10

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.

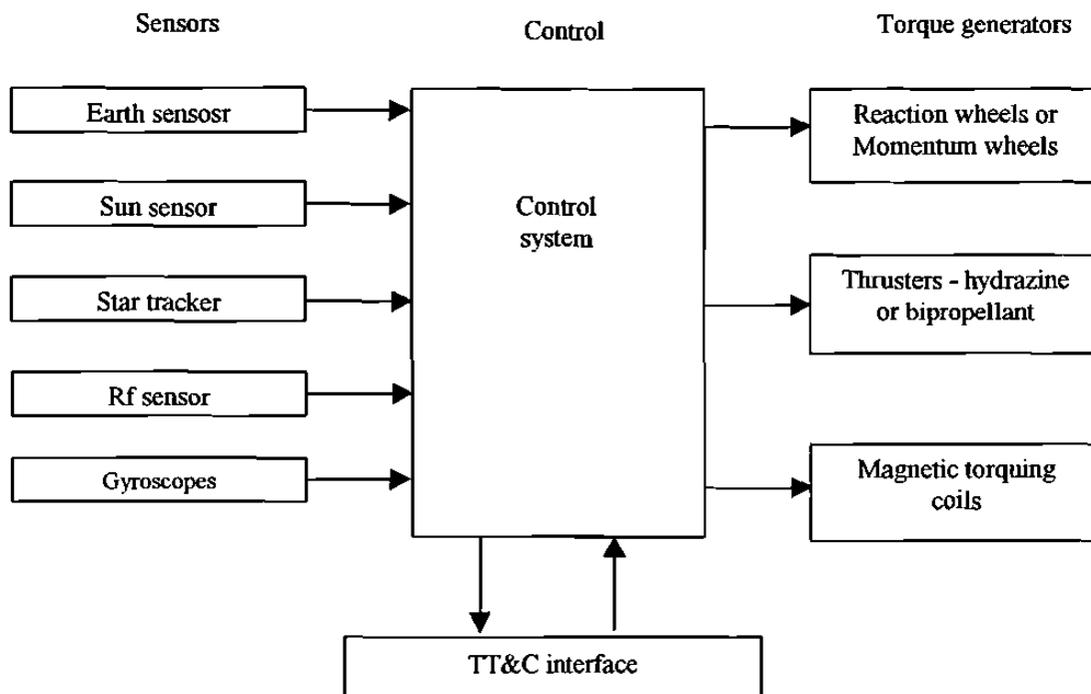


Figura 2.11.

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

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

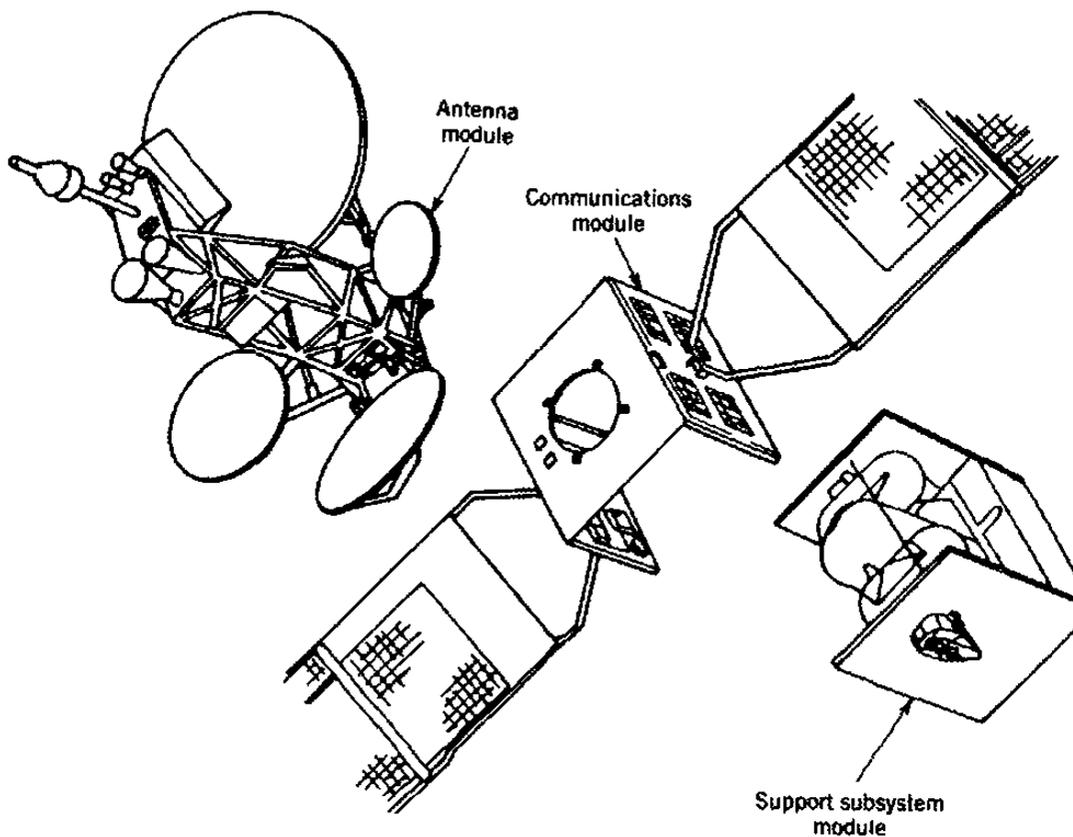
vehículo al despegue, la aceleración aumenta a varias veces la gravedad. Un satélite de 1000 Kg entonces pesa muchos miles de Kilogramos. La vibración de muchas frecuencias es transmitida directa al soporte de la nave espacial, a los motores del cohete. Aparatos pirotécnicos, usados para separar varias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



Structure of communications satellite.

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:

$$\sigma T^4 = \frac{\alpha a}{\varepsilon A} S_c + \frac{Q}{\varepsilon A} \quad (W / m^2) \quad (2.5)$$

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.

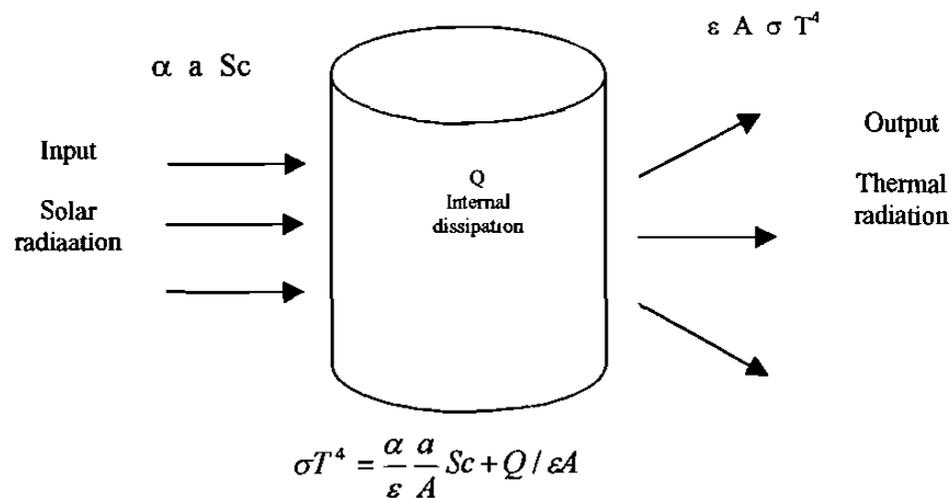


Figura 2.13.

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 :

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

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 “

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 deslizador 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 deslizador 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 decibels 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 decibels.

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 decibelees 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 decibelees 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 decibelees R.

Algunas veces las cantidades absolutas son necesarias, y la cantidad en decibelees 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
PF _D	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)

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 chequea 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.

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 perdidas 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 ($^{\text{dBi}}/\text{K}$).

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 perdida 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 ($A=1\text{m}^2$).

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:

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

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:

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

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 log₁₀ [4π (1000m/km)²]. La combinación de (-20 log₁₀S-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 x 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

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.

$$\text{Log}_{10} A/B = \text{log}_{10} A - \text{log}_{10} B \quad (3.31)$$

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/NO

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:

$$N = KTB \quad (W) \quad (3.36)$$

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_0 es la potencia de ruido en un ancho de banda de 1 Hz y es uniforme a frecuencias de microondas.

Esto es:

$$N_0 = N/B = KT \quad (\text{dBW/Hz}) \quad (3.38)$$

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 $N_0 = KT$. Entonces esta razón de la portadora a la densidad de ruido es:

$$C/N_0 = C/KT = C/T + 228.6 \quad (\text{dBHz}) \quad (3.39)$$

Esta razón es escrita como C/N_0 , 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 contante 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	+	_____	dB
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 dBi/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:

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

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

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

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
<u>Satellite</u>			
Satellite EIRP/carrier		_____	dBW
<u>Satellite to Earth</u>			
Free space path loss L for $S_d =$ _____ km	-	_____	dB
<u>Earth Station</u>			
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.

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: <u>Washington, DC, Beltway</u>			
Uplink frequency f_u : <u>1.6</u> GHz		Automobile	
Transmit earth station antenna diameter: <u>0.12</u> m			
Satellite: <u>Mobile</u>		Uplink beam: <u>Eastern USA</u>	
Parameter	Sign	Value	Units
<u>Earth Station</u>			
Power at the antenna for $P^* = \underline{0.5}$ W/carrier		<u>-3.0</u>	dBW
Transmit antenna gain G	+	<u>3.5</u>	dBi
Earth station EIRP		<u>0.5</u>	dBW
<u>Earth to Satellite</u>			
Free space path loss L for $S_u = \underline{37,700}$ km	-	<u>188.1</u>	dB
<u>Satellite</u>			
Satellite $G/T_{s,u}$	+	<u>9.0</u>	dBi/K
Carrier/thermal noise C_u/T_u		<u>-178.6</u>	dBW/K
$1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant)	+	<u>228.6</u>	dB(W/Hz K) ⁻¹
C_u/kT_u		<u>50.0</u>	dBHz

Tabla 3.8

Downlink Budget, Short Form for a Mobile Satellite Link			
Receiving earth station location: <u>New York, NY</u>			
Downlink frequency f_d : <u>1.5</u> GHz			
Receiving earth station antenna diameter: <u>5</u> m			
Satellite: <u>Mobile</u>		Downlink beam: <u>Eastern USA</u>	
Parameter	Sign	Value	Units
<u>Satellite</u>			
Satellite EIRP/carrier		<u>-4.6</u>	dBW
<u>Satellite to Earth</u>			
Free space path loss L for $S_d = \underline{37,700}$ km	-	<u>187.5</u>	dB
<u>Earth Station</u>			
Earth station $G/T_{s,d}$	+	<u>15.0</u>	dBi/K
Carrier/thermal noise C_d/T_d		<u>-177.1</u>	dBW/K
$1/k$ ($k =$ Boltzmann's constant)	+	<u>228.6</u>	dB(W/Hz K) ⁻¹
C_d/kT_d		<u>51.5</u>	dBHz
Bandwidth ($B^* = \underline{5000}$ Hz)	-	<u>37.0</u>	dBHz
Carrier-to-noise ratio C_d/N_d		<u>14.5</u>	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 $P^* \approx 150$ 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 $S_u = 39,000$ 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 $S_d = 40,000$ km	-	<u>206.4</u>	dB
Earth Station			
Earth station $G/T_{s,d}$	+	<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 ($B^* = 25 \times 10^6$ 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.

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.

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.

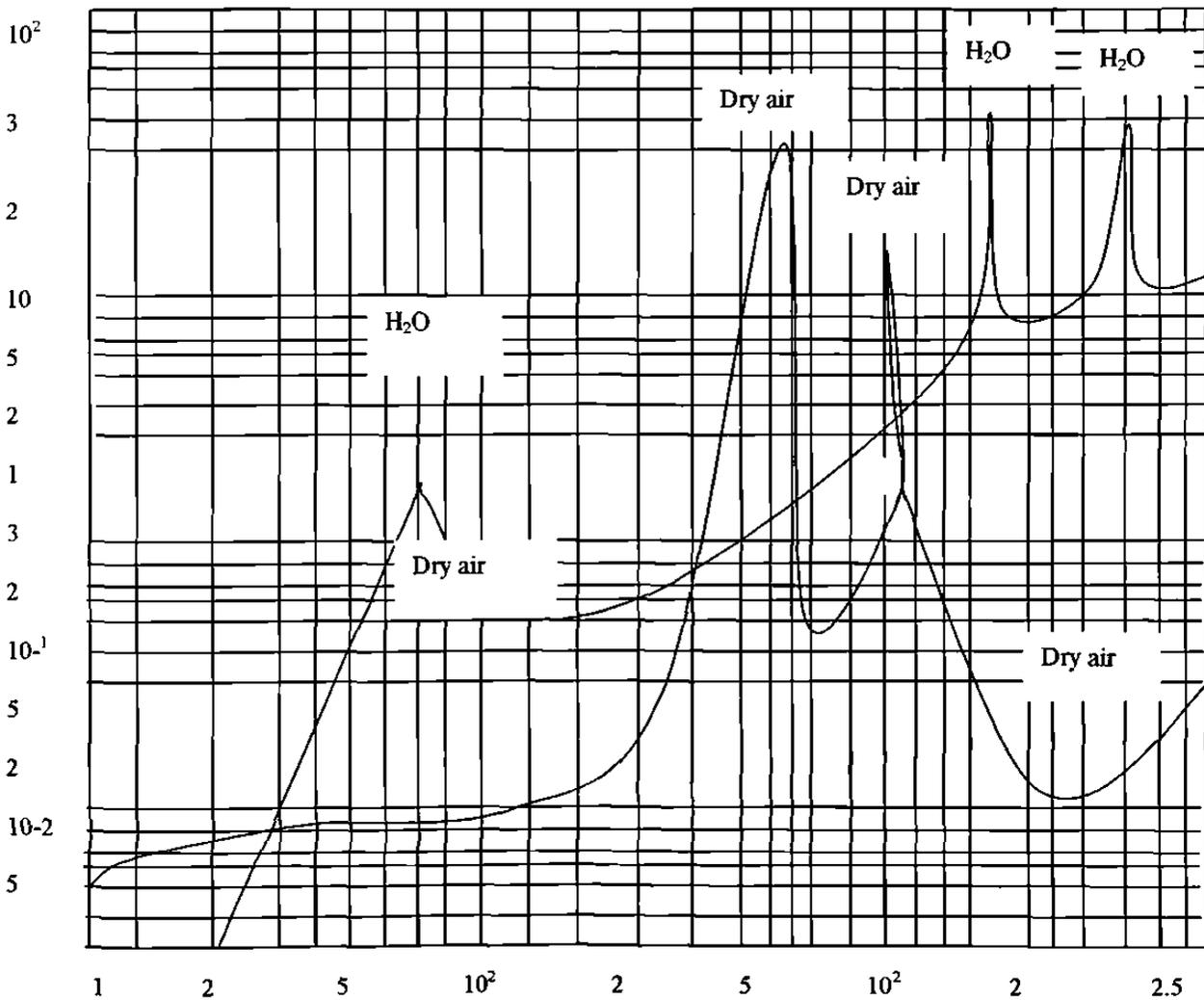


Figura 4.1

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 O₂, 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 limites de la atmósfera de la tierra, donde los términos a y e pueden ser despreciados. Es particularmente atractivo los enlaces - cruzados en aplicaciones militares, teniendo una protección inherente de interferencias enemigas en bases terrestres por el significante 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 interceptor. 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, seria 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.

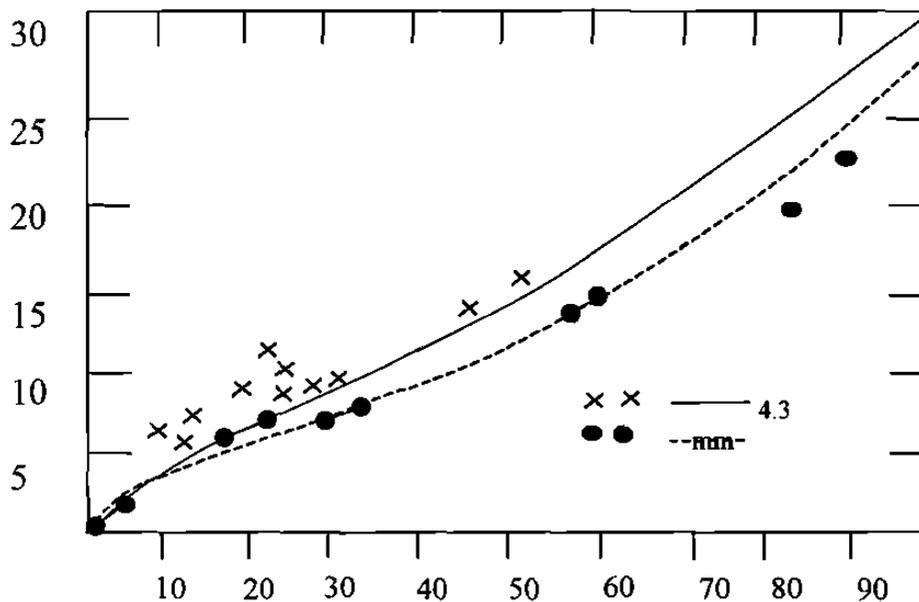


Figura 4.2

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.

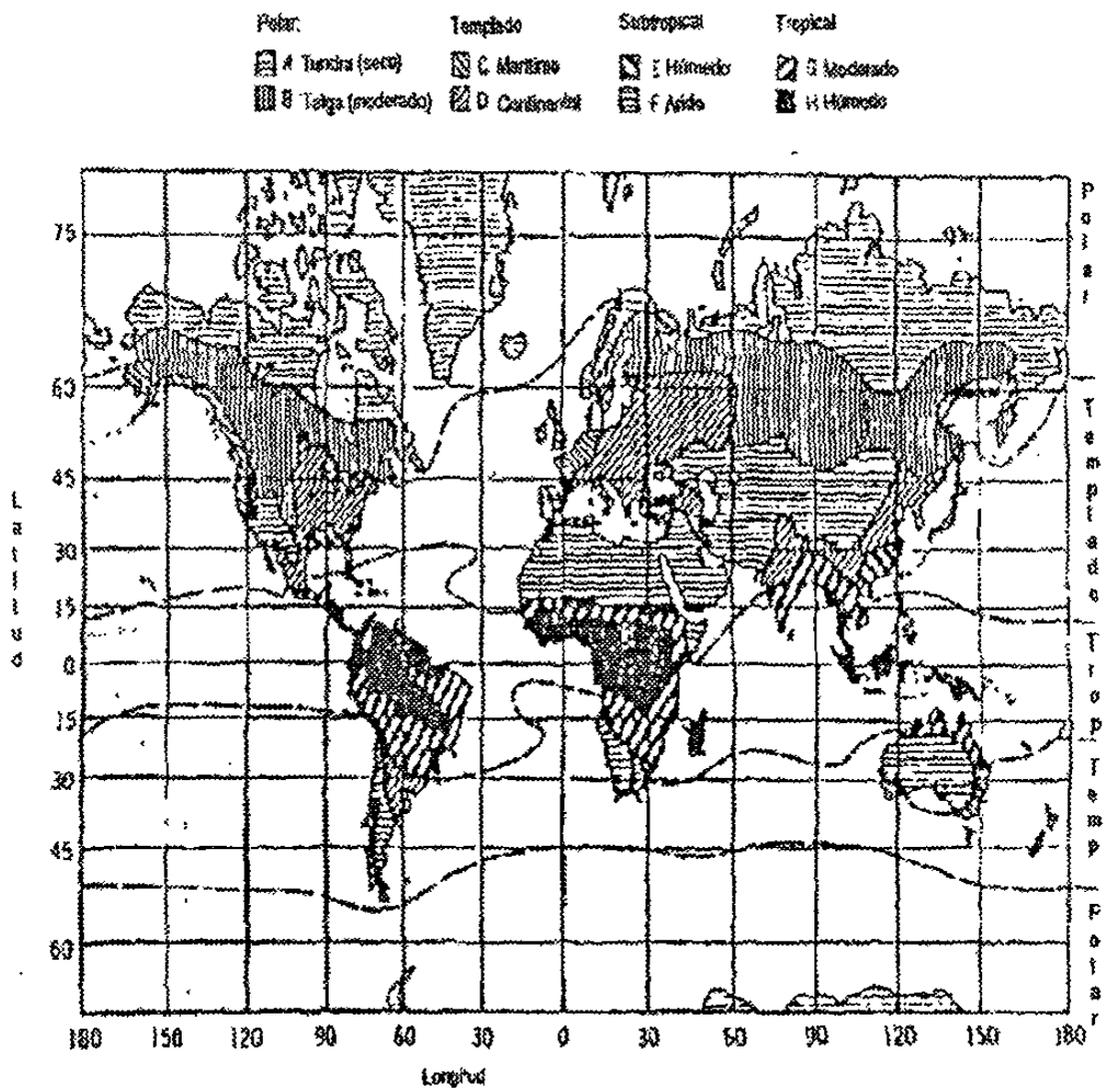
4.5. MODELO PROPUESTO POR LA NASA (MODELO GLOBAL)

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

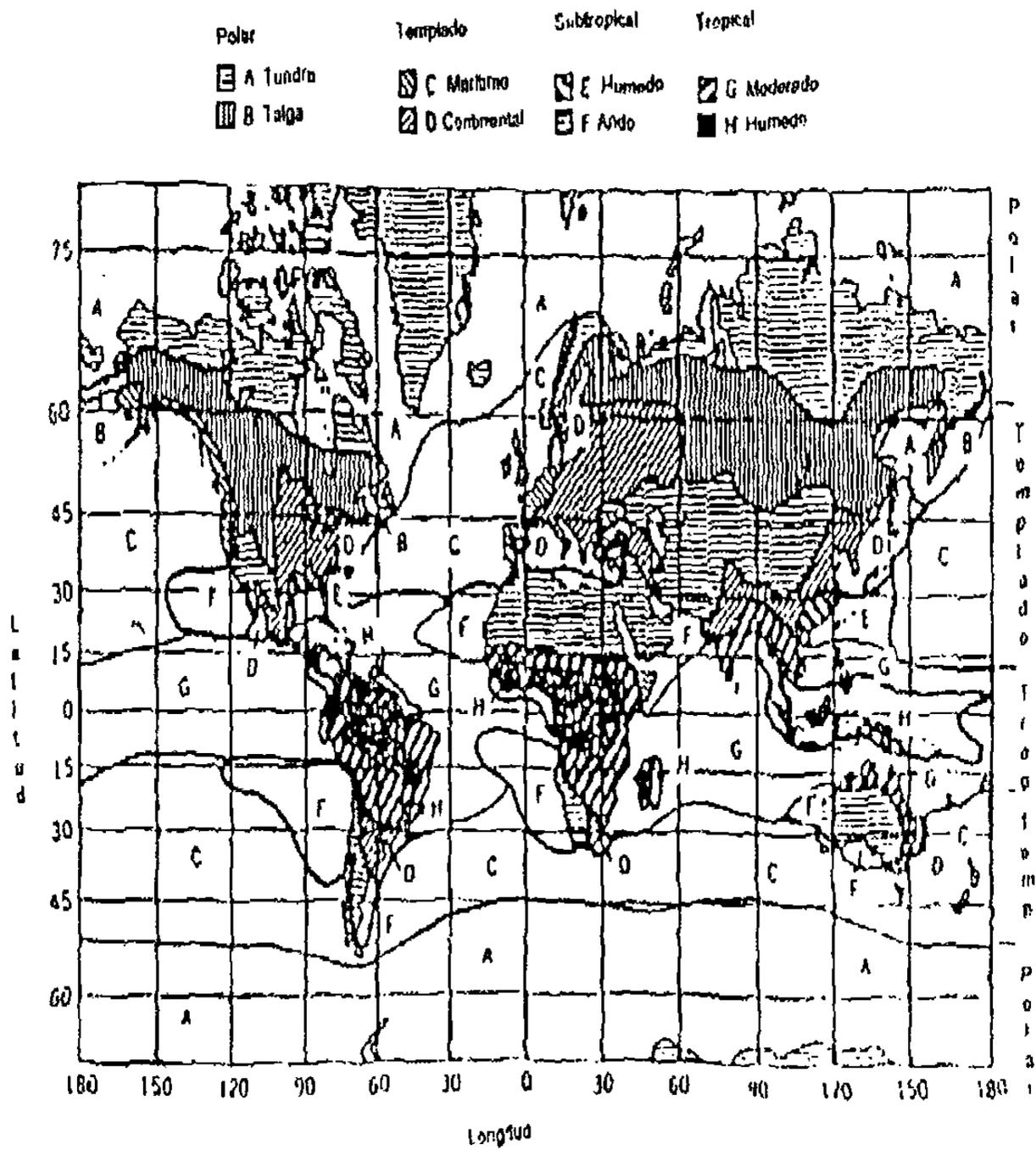


Figura 4.4



Figura 4.5

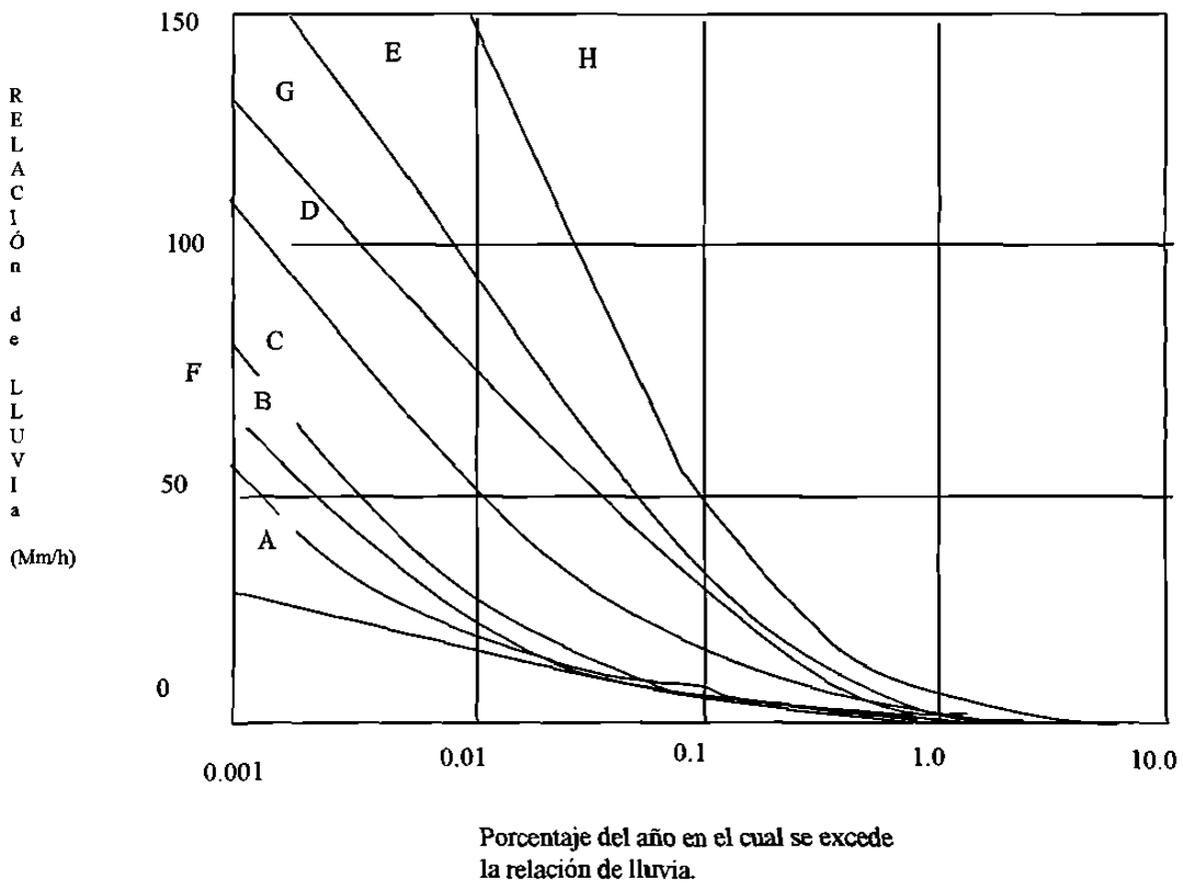


Figura 4.6

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.

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.

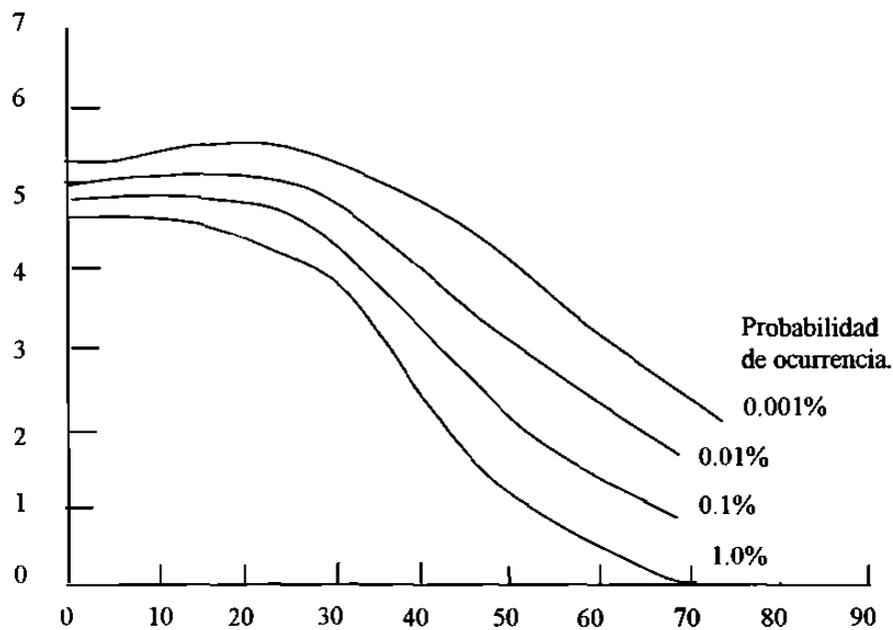
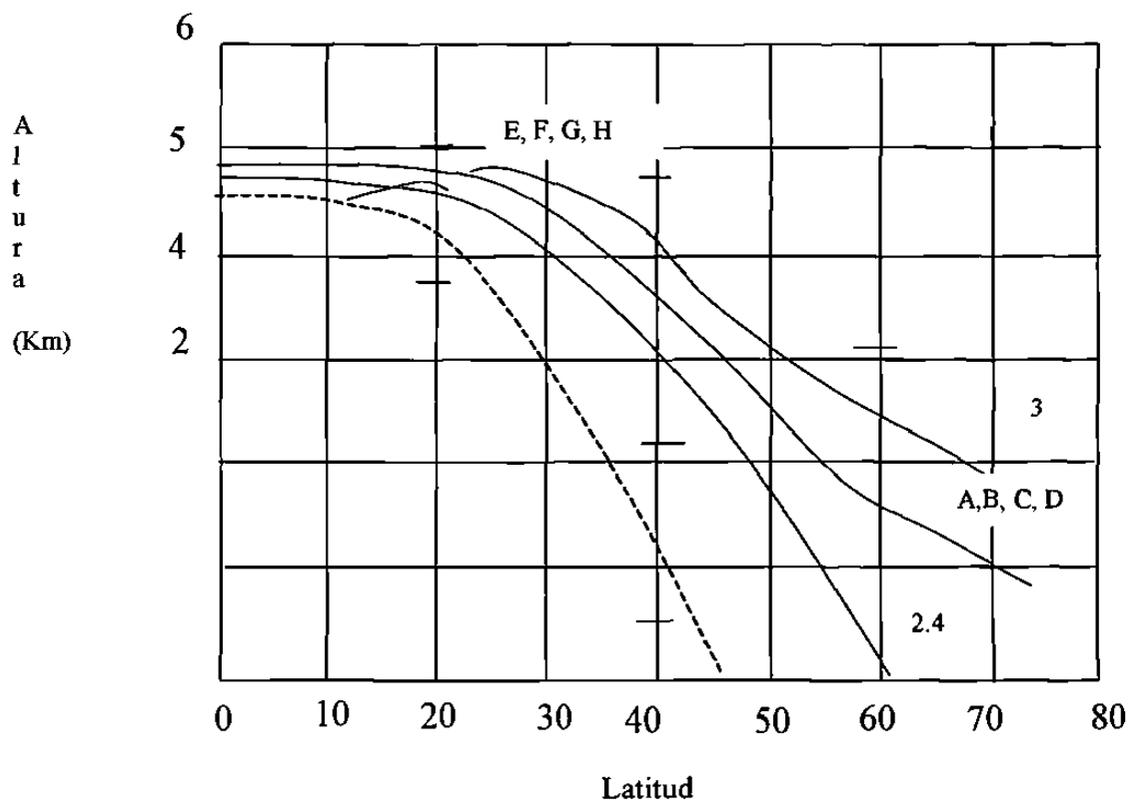


Figura 4.7a



———— 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 R_p :

$$A = a R_p^b$$

Donde a y b están en función de la frecuencia y la temperatura de la lluvia. A es la atenuación específica (dB/km) y R_p 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:

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

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

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

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 :

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

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

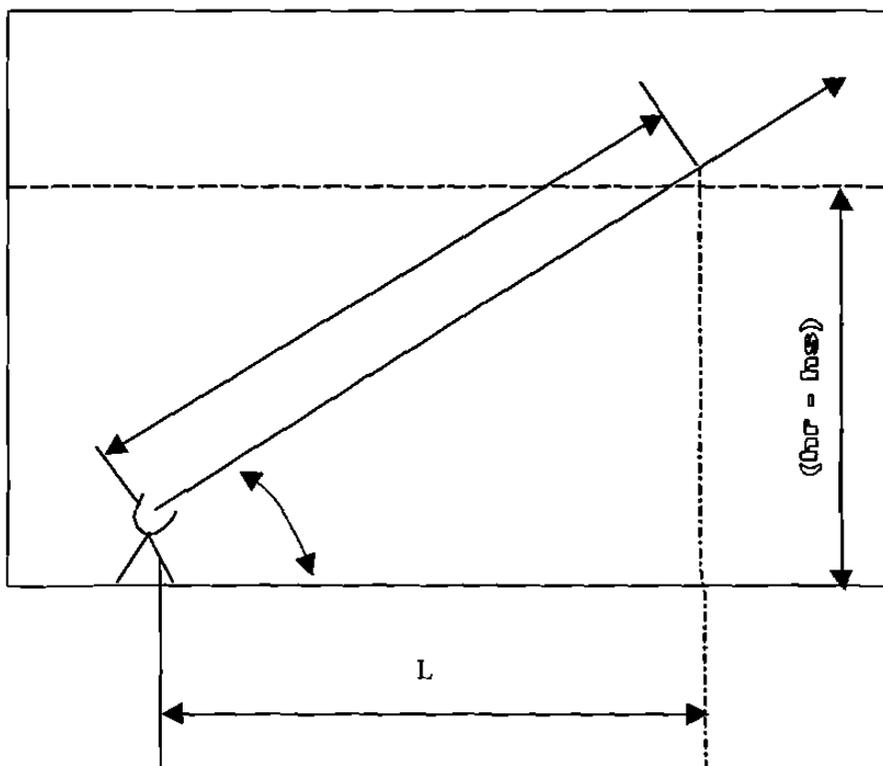
Representación esquemática de la trayectoria - espacio para el modelo de atenuación.

A: Precipitación congelada

B: Altura de la lluvia

C: Precipitación líquida

D: Trayectoria tierra - espacio.



Las regiones de lluvia por el método de la ITU- R_1 se muestran a continuación, las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 para los continentes y la figura 4.11 para la república Mexicana.

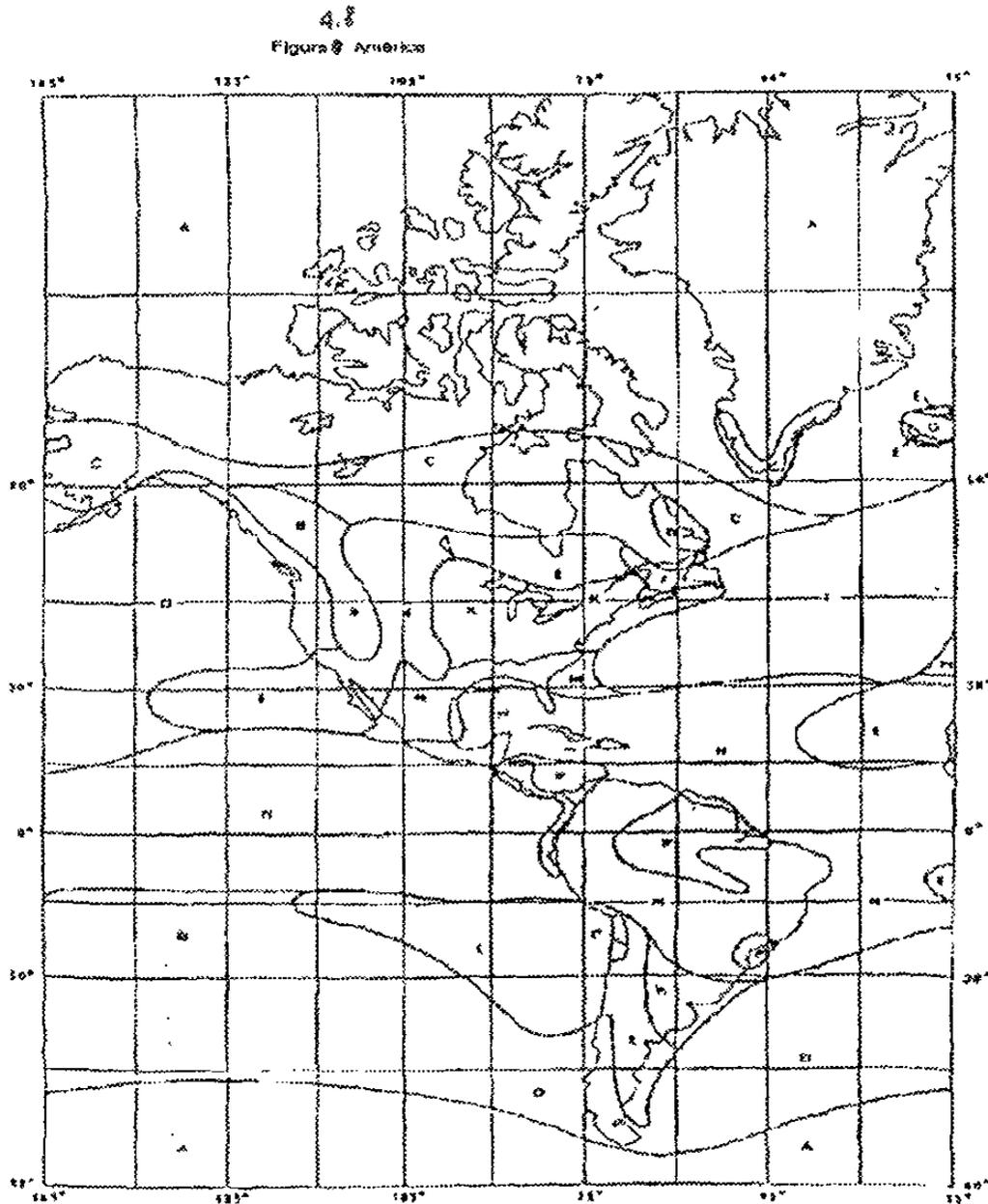


Figura 4.8

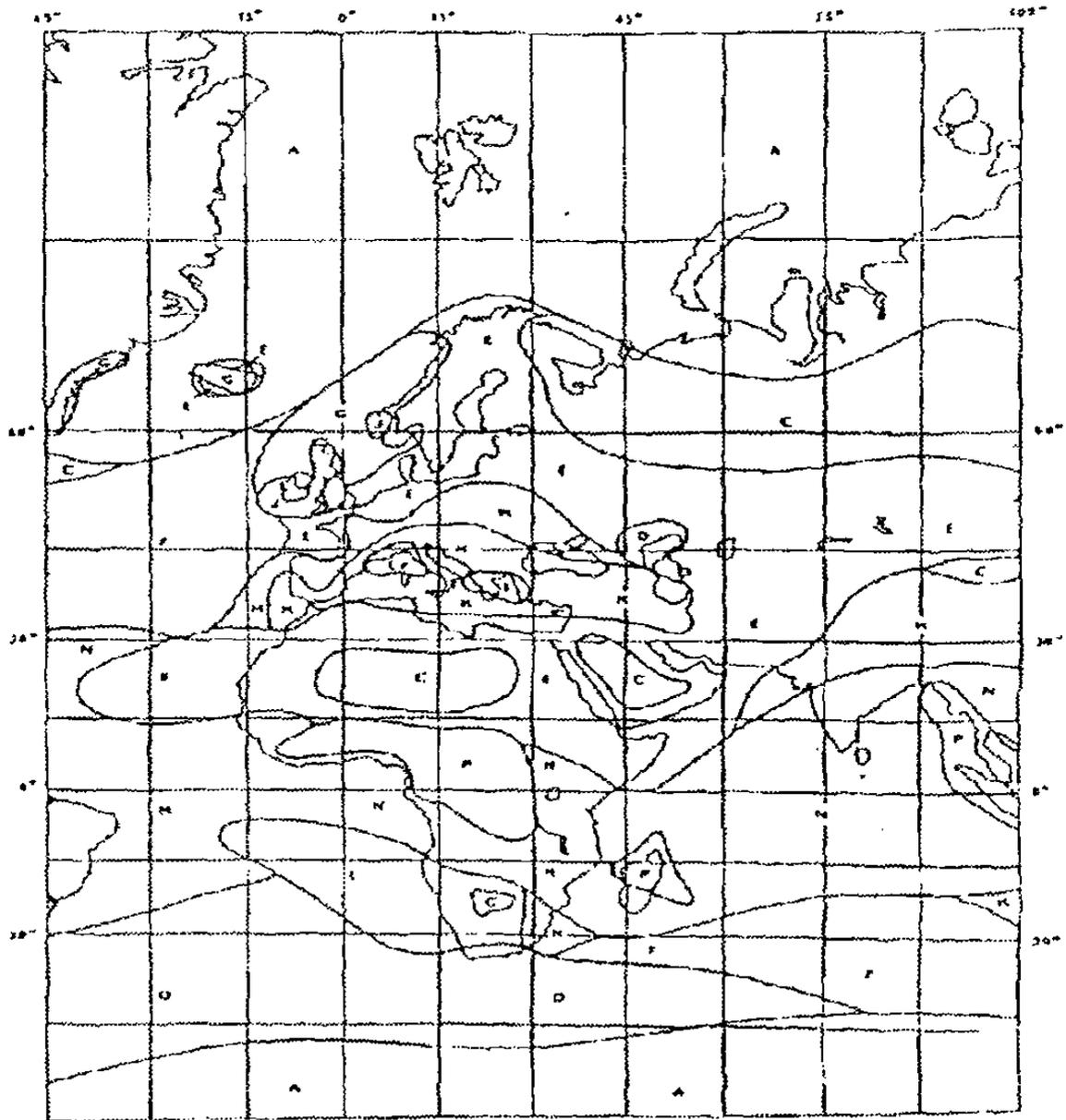


Figura 4.9.

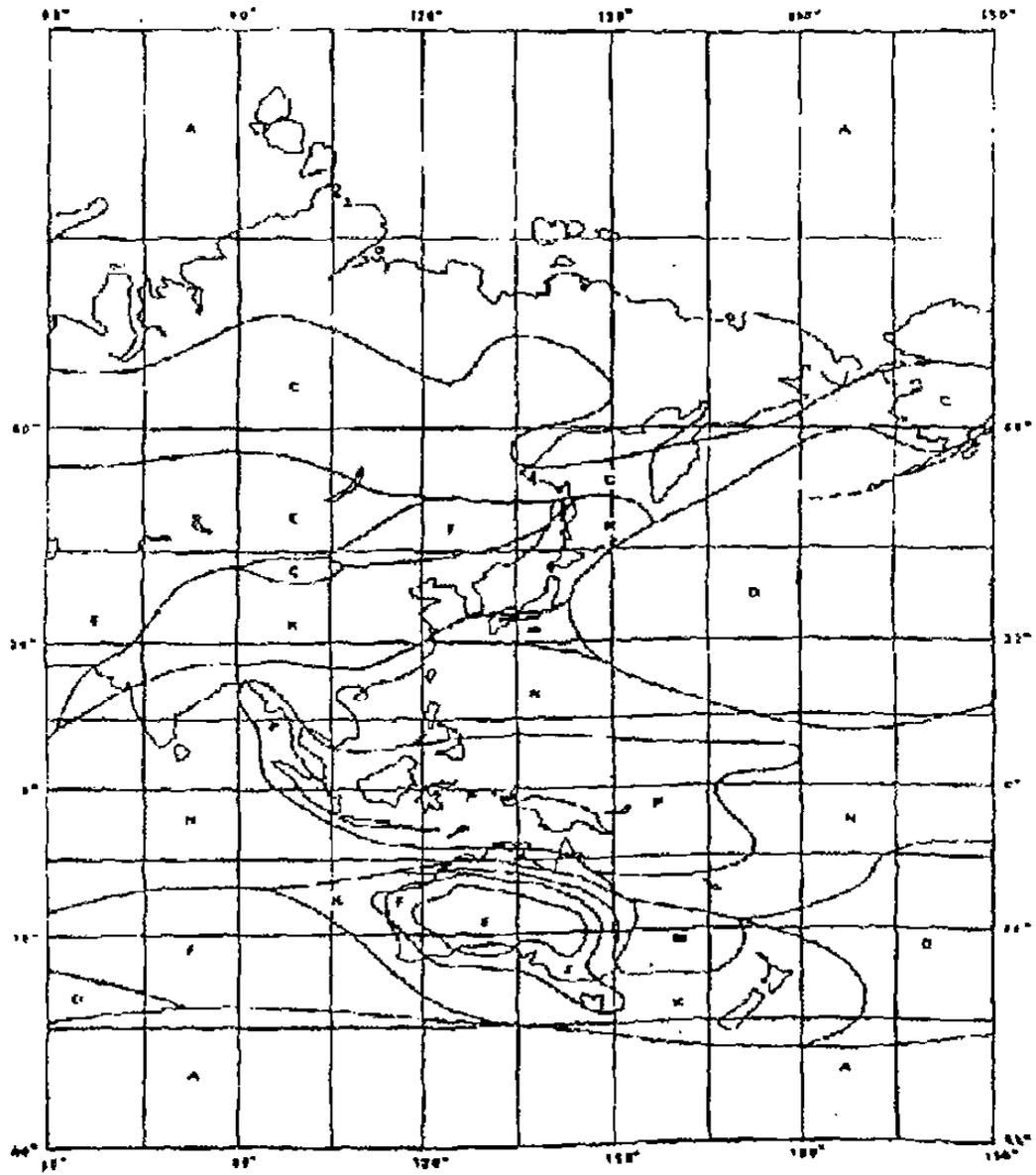


Figura 4.10

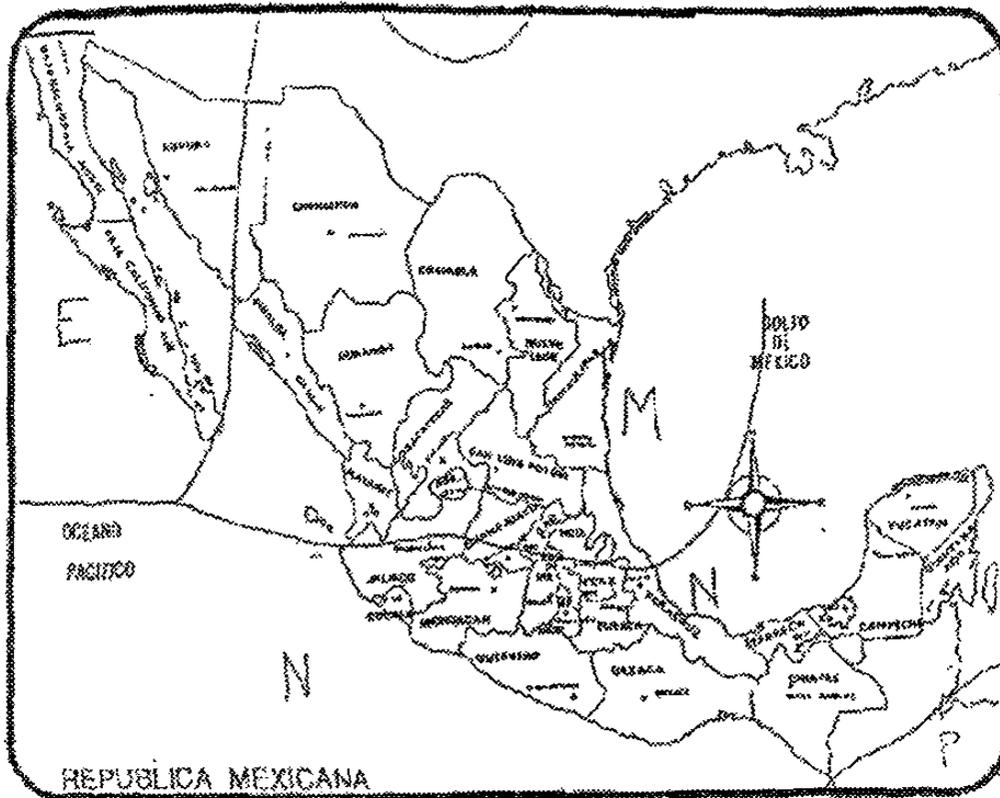


Figura 4.11

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.

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

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

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:

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

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:

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

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:

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

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

$\Delta L =$ 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 geoestacionarios).

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

Nótese que:

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

4.7.2 CÁLCULO PARA ENSENADA, BAJA CALIFORNIA NORTE

Datos Generales:

Ubicación Geográfica de Ensenada:

Latitud Norte $\approx 31.52^\circ$

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 $de = 139^\circ$.

Cálculo del ángulo de elevación:

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

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

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

4.7.2a MODELO GLOBAL

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

4.7.2 a2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ

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

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

$$p = 0.01 \%$$

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

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.3497$$

$$Y = -0.06806$$

$$Z = 1.9187$$

$$U = 0.088234$$

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

4.7.2 a3 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 15 GHZ

$$p = 0.1\%$$

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

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

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

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

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

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

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

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

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

4.7.2a4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

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

$$D = 3.964 \text{ Km}$$

$$p = 0.1\%$$

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

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.7213$$

$$Y = -0.025142$$

$$Z = 2.777$$

$$U = 0.17042$$

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

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.

$$a_v = 0.0335$$

$$b_v = 1.128$$

Cálculo de la atenuación específica.

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

Cálculo de la atenuación total:

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

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

4.7.2b2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ.

Suponer una polarización vertical.

$$a_v = 0.233$$

$$b_v = 0.963$$

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

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

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

4.7.2 b3 DISPONIBILIDAD 99.9 %, F = 15 GHZ

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

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

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:

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

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

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

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 $H_o = 4.4 \text{ Km}$

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

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

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:

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

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

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

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

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

$$p = 0.1\%$$

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

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.7213$$

$$Y = -0.025142$$

$$Z = 2.777$$

$$U = 0.17042$$

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

4.7.3 b MODELO ITU-R

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: $R_{0.01} = 22$ 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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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 $H_o = 5 \text{ Km}$

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

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:

$$A = \frac{aRp^b}{\cos \theta} \left\{ \frac{e^{UZh} - 1}{Uh} - \frac{X^b e^{YZh}}{Yh} + \frac{X^b e^{YDb}}{Yb} \right\}$$

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

4.7.4 a2 DISPONIBILIDAD 99.99%, F = 35 GHZ

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

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

$$p = 0.01\%$$

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

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.1842$$

$$Y = -0.09116$$

$$Z = 1.4568$$

$$U = 0.024847$$

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

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: $R_{0.01} = 63 \text{ mm/h}$

4.7.4 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:

$$a_v = 0.0335$$

$$b_v = 1.128$$

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:

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

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

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

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 $H_o = 5.1 \text{ Km}$.

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

4.7.5 a2 DISPONIBILIDAD 99.99 %, F = 35 GHZ.

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

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

$$p = 0.01 \%$$

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

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.12537$$

$$Y = -0.1.$$

$$Z = 1.2772$$

$$U = -0.007523$$

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

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

$$p = 0.1\%$$

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

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

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

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

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

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

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

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

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

4.7.5 a4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

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

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

$$p = 0.1\%$$

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

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.35993$$

$$Y = -0.06673$$

$$Z = 1.9454$$

$$U = 0.0913$$

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

4.7.5 b MODELO ITU-R

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:

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

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

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:

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

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

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

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.

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

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

$$p = 0.01\%$$

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

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.0549$$

$$Y = -0.11155$$

$$Z = 1.049$$

$$U = -0.0606$$

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

4.7.6 a3 DISPONIBILIDAD 99.9% , F = 15 GHZ.

$$p = 0.1\%$$

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

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

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

$$a(f) = 0.0357$$

$$b(f) = 1.12$$

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

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

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

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

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

4.7.6 a4 DISPONIBILIDAD 99.9%, F = 35 GHZ.

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

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

$$p = 0.1 \%$$

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

$$a(f) = 0.242$$

$$b(f) = 1.04$$

$$X = 1.2567$$

$$Y = -0.08066$$

$$Z = 1.6668$$

$$U = 0.0564225$$

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

4.7.6 b MODELO ITU - R

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

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

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

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

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.

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

$$a_v = 0.233$$

$$b_v = 0.963$$

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

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

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

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 $\lambda_e = 139^\circ$

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 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 $H_o = 5.1 \text{ Km}$

$$D = \frac{5.1\text{Km} - 0.006\text{Km}}{\tan(29.3154^\circ)} = 9.07169\text{Km}$$

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

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:

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

$$Y = 0.026 - 0.3 \ln(67) = -0.1$$

$$Z = 3.8 - 0.6 \ln(67) = 1.27772$$

$$U = \frac{1}{1.27772} \left[\ln(1.12537 e^{((-0.1)(1.27772)})} \right] = 0.00756$$

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

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

$$A = 29.1406 \text{ dB}$$

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

Como $\varphi = 18.3^\circ$, $h_R = 4 \text{ Km}$

$$L_s = \frac{(4 - 0.006)}{\text{sen}(29.3154^\circ)} = 8.1574 \text{ km}$$

$$L_G = (8.1574) \cos(29.3154^\circ) = 7.1127 \text{ Km}$$

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.045(7.1127)} = 0.75753$$

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.

$$A_{0.1} = (0.38) (140.311)$$

$$A = 53.3182 \text{ bdB}$$

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.