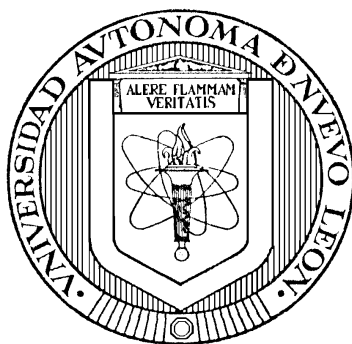


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



“EVALUACION DE LOS ENLACES ACTUALES DE MICROONDAS EN LA  
UANL PARA SU OPTIMIZACIÓN”

POR

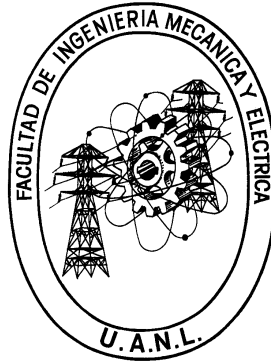
ING. RAFAELA DEL PILAR CABRERA ALVAREZ  
TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ESPECIALIDAD EN TELECOMUNICACIONES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.  
ABRIL, 2006

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



“EVALUACION DE LOS ENLACES ACTUALES DE MICROONDAS EN LA  
UANL PARA SU OPTIMIZACIÓN”

POR  
ING. RAFAELA DEL PILAR CABRERA ALVAREZ

TESIS  
EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ESPECIALIDAD EN TELECOMUNICACIONES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.  
ABRIL, 2006

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la tesis  
**“EVALUACION DE LOS ENLACES ACTUALES DE MICROONDAS EN LA UANL  
PARA SU OPTIMIZACIÓN”** realizada por la Ing. Rafaela del Pilar Cabrera Alvarez  
con número de Matrícula 1224472, sea aceptada para su defensa como opción al  
grado de Maestro en ciencias de la Ingeniería con Especialidad en  
Telecomunicaciones.

El comité de Tesis

\_\_\_\_\_  
Asesor  
M.C. Fernando Estrada Salazar.

\_\_\_\_\_  
Revisor  
M.C. Jorge Alberto Becerra Turrubiates  
Macari

\_\_\_\_\_  
Revisor  
M.C. Manuel Munguia

Vo. Bo.

\_\_\_\_\_  
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodriguez  
División de Estudios de Posgrado

Cd. Universitaria, Marzo del 2006

## **Agradecimientos:**

A Dios, por permitirme cumplir hasta hoy todas mis metas profesionales y por darme la familia que tengo.

A mi familia, por apoyarme siempre en todos mis proyectos.

# PROLOGO

El avance y la evolución en los sistemas de telecomunicaciones, ha hecho que un sin número de organizaciones publicas y privadas traten de estar a la vanguardia en este punto. Aunque existen otros medios de comunicación tales como la fibra óptica, los enlaces de microondas constituyen una aplicación práctica de dichos sistemas.

Las condiciones climáticas, perfil del terreno y sobre todo el crecimiento urbano que a futuro tendrá la zona donde se instala el equipo de microondas, son factores que deben considerarse en el diseño de este tipo de enlaces.

La Universidad Autónoma de Nuevo León, no es la excepción en cuanto a actualización de sistemas de telecomunicación se refiere, y cuenta dentro de sus sistemas con una red de Microondas que mantiene comunicados a los campus de Cd. Universitaria, Unidad Mederos, y Facultad de medicina.

Con el paso del tiempo, es recomendable que se hagan estudios sobre el estado actual de las redes para determinar si requieren de actualizaciones o mejoras. La finalidad de este trabajo es realizar un análisis a dicha red para hacer propuestas de mejora dependiendo del resultado de este estudio. Los resultados obtenidos, se dejan a consideración de la Dirección General de Telecomunicaciones de esta Institución para referencia, o uso posterior.

# SINTESIS

El presente trabajo muestra el análisis realizado a la red de microondas de la Universidad Autónoma de Nuevo León en sus condiciones actuales a fin de determinar la eficiencia real de los enlaces para tratar de mejorar la transmisión y recepción de señal mediante el cambio o adecuación de otro tipo de enlaces o equipos que, sin deteriorar la calidad del enlace, permita enfocarse también a la reducción de costos.

CAPITULO 1: En este capítulo se incluye la definición del problema a investigar, los objetivos y la justificación del mismo.

CAPITULO 2: Se presentan las bases teóricas sobre las señales de microondas, empezando con un repaso sobre los fenómenos ópticos que afectan la propagación de las señales, así como las condiciones atmosféricas y su efecto sobre la propagación de las ondas electromagnéticas, continuando con algunas consideraciones técnicas importantes en el desarrollo de un enlace, una breve descripción de la evaluación de los generadores de microondas, pasando después por la descripción de los componentes y tipos de enlaces de microondas para terminar con la explicación sobre alternativas de protección y mejora de una red, así como los cálculos necesarios en el desarrollo de un enlace. Las fórmulas usadas para los cálculos desarrollados en la evaluación de la red están basadas en métodos empíricos, aceptados también por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (Siglas en inglés ITU).

CAPITULO 3: Se incluye la hipótesis de este proyecto de grado, información general sobre la red de microondas como coordenadas y estructura de cada uno de los sitios de enlace, así como el desarrollo de la evaluación de la red.

CAPITULO 4: Muestra la evaluación de los resultados obtenidos en la evaluación de la red, las conclusiones obtenidas en la realización de este proyecto y las opciones de mejora propuestas para la red actual.

# INDICE GENERAL

	Pag.
Prólogo	I
Síntesis del trabajo	II
1. Introducción	9
1.1 Descripción del problema	9
1.2 Objetivos	10
1.3 Justificación	10
1.4 Límites de estudio	11
1.5 Metodología	11
2. Fundamentos teóricos	12
2.1.-¿Que es una señal de microondas?	12
2.2.- Fenómenos ópticos que afectan la propagación de las señales de microondas	13
2.3.-Efecto de la absorción atmosférica y lluvia en la propagación de microondas	21
2.4.-Pérdidas por propagación en el espacio libre	28
2.5-Radio Equivalente de la tierra	29
2.6.-Evolución de los Generadores de Microondas	31
2.7.-Componentes de un enlace de Microondas	33
2.8-Tipos de enlace.	41
2.8.1.-Análogo	41
2.8.2.-Digital	41
2.8.2.1.-Ventajas y desventajas en comparación con otros medios de comunicación	42
2.8.2.2.-Disponibilidad y calidad de un enlace digital	42
2.9.- Diversidad.	45

# INDICE GENERAL

	Pag.
2.10.- Técnicas de Protección	46
2.11.- Cálculos y Consideraciones para el desarrollo de un enlace	47
3: Desarrollo de la evaluación de la red	58
3.1.-Hipótesis	58
3.2.- Datos, Coordenadas y estructura de cada uno de los sitios:	58
3.3.- Análisis de cada enlace de la red	59
4.-Conclusiones y recomendaciones:	63
4.1.-Opciones de Mejora	63
4.1.1. Ejemplo de análisis de pérdidas por lluvias	64
4.1.2. Factores de mejora usando técnicas de diversidad	69
Bibliografía	73
Índice de figuras	74
Índice de tablas	74
Apéndice A: “ Mapas de zonas de lluvia ITU”	76
Apéndice B: “Coeficientes de regresión para el cálculo de pérdidas por lluvia”	77
Apéndice C: “Tasa de lluvia por zonas geográficas”	78
Apéndice D: “Mapa de zonas de temperatura”	78
Autobiografía	79



# 1. Introducción

Hoy en día, el rápido avance tecnológico obliga a empresas e instituciones el tener medios de comunicación rápidos, eficaces y confiables, que permitan la transferencia de información de forma eficiente, tratando de reducir al máximo los tiempos fuera de servicio que los equipos de estas redes de telecomunicaciones pudiera presentar.

La Universidad Autónoma de Nuevo León cuenta dentro de su sistema de telecomunicaciones con una red de microondas que comunica a 4 de sus principales campus. En este Proyecto de Grado se presenta el análisis realizado a dicha red, iniciando por una revisión bibliográfica de conceptos básicos sobre teoría de propagación de señales, y formulas para el cálculo de pérdidas durante la propagación de la señal, para después usar esta misma información para el análisis de la red de microondas de la UANL.

## 1.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

Actualmente, la Dirección General de Informática de la UANL cuenta dentro de su red de Telecomunicaciones con 4 enlaces de Microondas los cuales son: Campus Mederos, Campus Salud (Fac. Medicina), Facultad de Economía y la Biblioteca Magna. Dos de estos son 4 x E1's, y el resto son de 34 Mbps.

## **1.2 OBJETIVOS.**

1.2.1. Objetivo general: Realizar un análisis a las condiciones actuales de la red de microondas de la Universidad Autónoma de Nuevo León para determinar la eficiencia real de cada uno de sus enlaces, para que, en base a los resultados obtenidos de esta evaluación, puedan hacerse propuestas de mejora en la calidad de señal de dichos enlaces.

1.2.2 Objetivo específico: Evaluar el desempeño actual de cada uno de los sitios de la red de microondas de la U. A. N. L. para determinar su disponibilidad y calidad de señal desarrollando en un plano teórico el cálculo de enlaces de microondas que pueda en un momento dado servir como propuesta de mejora y a su vez, ser considerado como opciones de implementación para dicha red.

## **1.3 JUSTIFICACION.**

Las normas de seguridad de funcionamiento de los sistemas de microondas han alcanzado gran rigidez. Por ejemplo, se utiliza un 99.98% de confiabilidad general en un sistema patrón de 6000 Km de longitud, lo que equivale a permitir solo un máximo de 25 segundos de interrupción del año por cada enlace. Algunas ventajas de un sistema de microondas son:

- Antenas relativamente pequeñas son efectivas.
- A estas frecuencias las ondas de radio se comportan como ondas de luz, por ello la señal puede ser enfocada utilizando antenas parabólicas y antenas de embudo, además pueden ser reflejadas con reflectores pasivos.

- Ancho de banda, que va de 2 a 24 GHz
- Los canales inalámbricos son utilizados para la comunicación digital cuando no es económicamente conveniente la conexión de dos puntos vía cable.

Aunque, dentro de sus desventajas están las condiciones climáticas y la velocidad de transmisión comparada con la fibra óptica, la red actual de microondas puede seguir siendo rentable, e inclusive, ampliar su cobertura si es necesario de acuerdo al crecimiento y necesidades de nuestra institución. Por ello la idea de este estudio es analizar el estado actual de estos enlaces y, de ser necesario hacer la propuesta de los cambios que puedan ayudar a mejorar dichos enlaces.

#### **1.4 LIMITES DE ESTUDIO:**

El alcance del presente trabajo será realizar el análisis y propuesta de mejora, dependiendo del resultado de l análisis a la red actual para ponerla a consideración del personal correspondiente con posibilidades que, de ser aceptada pueda implementarse en los sitios antes mencionados o tratar de ampliar la red con sitios demasiado alejados que aun no se tengan contemplados dentro de la red de microondas de la UANL.

#### **1.5 METODOLOGÍA:**

En este caso la metodología a seguir será el cálculo de un enlace de microondas escogiendo dos puntos de la red con enlace ya existente para hacer una comparación y determinar así, si son requeridos cambios en cuanto a situación geográfica de antenas y equipos transmisores / receptores o tipo de enlaces o equipos

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1.- ¿Que es una señal de microondas?

Se denomina así la porción del espectro electromagnético que cubre las frecuencias entre aproximadamente 3 GHz y 300 GHz, que corresponde a la longitud de onda en vacío entre 10 cm. y 1mm.

La propiedad fundamental que caracteriza a este rango de frecuencia es que el rango de longitud de onda correspondiente es comparable con las dimensiones físicas de los sistemas de laboratorio

La mayor parte de los sistemas de radio por microondas están comprendido dentro de 3 categorías principales: Sistemas de Línea de vista (LDV), Sistemas sobre el Horizonte y Sistemas Satelitales.

#### 2.1.1.-Sistemas de línea de vista:

Teóricamente, un sistema de línea de vista (LDV), puede extenderse sobre terrenos favorables sin grandes barreras naturales hasta los 7000Km (4000 millas), usando varios enlaces. La distancia cubierta por cada enlace, sin embargo está limitada a distancias cortas que oscilan entre los 50 Km. y los 80 Km. Para distancias mayores, se usan modos de propagación sobre el horizonte, por difracción o por dispersión troposférica.

La mayor ventaja de los sistemas de dispersión troposférica respecto a los LDV, es que éstos permiten comunicaciones a distancias de varios miles de kilómetros sin repetidores, lo que es de gran valor cuando la señal se propaga sobre un terreno de difícil acceso.

Los sistemas LDV proveen un amplio rango de aplicaciones, por ejemplo, desde sistemas con un pequeño número de canales telefónicos de corto alcance hasta sistemas con varios cientos de canales telefónicos o varios canales de TV con los altos estándares de calidad y confiabilidad exigidos para formar los circuitos troncales nacionales e internacionales, y alcance de varios kilómetros.

La mayor parte del desarrollo de sistemas de propagación de comunicaciones de radio multicanal tuvo lugar durante la 2ª. Guerra Mundial en la banda de VHF (“Very High Frequency”). La popularidad en el uso de los sistemas LDV puede atribuirse a las siguientes ventajas:

- Alta y flexible capacidad de canales.
- Capacidad de expansión.
- Corto tiempo de instalación.
- Excelente adaptación a dificultades de terreno y barreras naturales.

## **2.2.- Fenómenos ópticos que afectan la propagación de las señales de microondas.**

El diseño de un enlace consiste principalmente acerca de predecir con precisión el periodo de “corte” que un enlace sufrirá, y de asegurar que no afectará de forma crítica la calidad del enlace. Muchos cortes ocurren como resultado de fenómenos atmosféricos, por lo cual es necesario entender la forma en la que la señal de microondas se propaga.

En la atmósfera de la tierra, la propagación del frente de onda puede alterarse por efectos ópticos tales como la refracción, la reflexión y la interferencia.

### **2.2.1.- Refracción:**

En algunos artículos sobre radio, se menciona que la onda es un rayo muy delgado que viaja entre dos antenas. En realidad, se trata de un frente de ondas electromagnéticas que es infinitamente amplio. El trayecto por el que el frente de ondas viaja depende de la densidad de la tropósfera (la porción inferior de la atmósfera) en la que se encuentre. La porción superior del frente de ondas por lo tanto, viaja más rápido que la porción que esta atravesando el medio más denso. Ya que la dirección de propagación del frente de ondas es siempre perpendicular al plano de fase constante, el rayo sufre una desviación o se “dobla”; esto es el fenómeno de refracción.

En otras palabras: la refracción es el cambio de la dirección de un rayo conforme pasa oblicuamente de un medio a otro, con diferentes velocidades de propagación. La velocidad a la cual una onda electromagnética se propaga es inversamente proporcional a la densidad en el medio en el cual se esta propagando, por lo tanto, la refracción ocurre cuando la onda electromagnética pasa de un medio a otro con diferente densidad.

Cuando una onda pasa de un medio menos denso a otro más denso, la velocidad de propagación disminuye y se inclina hacia abajo (se dobla hacia la normal). El ángulo de incidencia es el ángulo formado entre la onda incidente y la normal; y el ángulo de refracción es el formado entre la onda refractada y la normal. Cuando se trata de un frente de ondas compuesto por múltiples haces, es el frente de ondas el que cambia de dirección como se muestra en la figura 1:

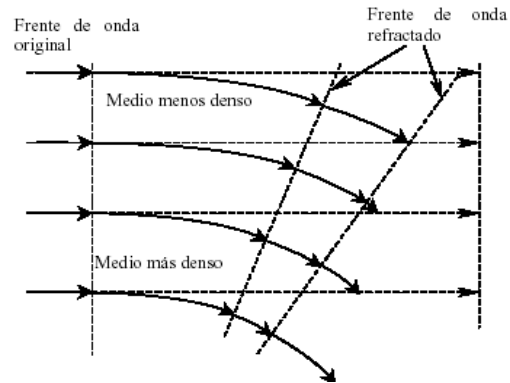


Fig. 1. Fenómeno de refracción

El ángulo de refracción (inclinación), depende del índice de refracción de los dos materiales, definido como la relación de las velocidades de propagación de un rayo de luz en el espacio libre a la velocidad de propagación en un material dado:

$$n=c/v$$

Donde:

- $n$  = índice de refracción (adimensional)
- $c$  = velocidad de la luz en el espacio libre ( $3 \times 10^8$  m/)
- $v$  = velocidad de la luz en un material dado

La ley de Snell para refracción establece que:

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$$

Donde:

$n_1$ : índice de refracción del material 1

$n_2$ : índice de refracción del material 2

$\theta_1$ : ángulo de incidencia 1

$\theta_2$ : ángulo de incidencia 2

**APLICACIÓN:** El fenómeno de refracción permite que se envíen ondas hacia el espacio y regresen a la tierra sin sobrepasar la atmósfera terrestre. Cuando las ondas electromagnéticas atraviesan la ionósfera, que es la capa más externa de la atmósfera terrestre y que está estratificada con distintas densidades, parecen reflejarse sobre ella, pero lo que ocurre realmente no es reflexión sino refracción a través de los distintos estratos de la ionósfera. Este tipo de propagación, llamada onda de cielo, permite alcanzar distancias de miles de kilómetros.

El fenómeno de refracción ocasiona que las ondas se curven cuando viajan por la tropósfera, por lo que su trayectoria no es rectilínea, factor que se debe considerar al diseñar un radio enlace. Este fenómeno se toma en consideración mediante un parámetro llamado: factor de corrección de radio equivalente de la tierra, el cual será discutido mas adelante.

### **2.2.2.- Reflexión:**

La reflexión electromagnética ocurre cuando una onda incidente choca con una barrera existente entre dos medios y parte de la potencia incidente no penetra el segundo material. Las ondas que no penetran al segundo medio se reflejan. Debido a que las ondas reflejadas permanecen en el mismo medio que las ondas incidentes, sus velocidades son iguales y por tanto el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Sin embargo la intensidad del campo reflejado es menor que la del campo incidente. La relación de las intensidades de voltaje reflejado a voltaje incidente se llama coeficiente de reflexión  $\Gamma$ .

$$\Gamma = \mathbf{E}_r e^{j\theta_r} / \mathbf{E}_i e^{j\theta_i} = (\mathbf{E}_r / \mathbf{E}_i) e^{j(\theta_r - \theta_i)}$$



Para los conductores imperfectos,  $\Gamma$  es función del ángulo de incidencia, de la polarización del campo eléctrico y de las constantes dieléctricas de los dos materiales. Si el segundo medio no es un conductor perfecto, algunas de las ondas incidentes lo penetran y son absorbidas produciendo corrientes en la superficie del material y convirtiendo la energía en calor. La fracción de potencia que penetra al segundo medio determina el coeficiente de absorción.

La reflexión también ocurre cuando la superficie reflejante es irregular o áspera, y dependiendo del tipo de superficie, el frente de onda se dispersa en muchas direcciones aleatoriamente (reflexión difusa). La reflexión sobre una superficie perfectamente lisa se llama reflexión especular.

APLICACIÓN: En un enlace de microondas existirá en general un rayo directo y al menos un rayo reflejado. Al diseñar el enlace, se seleccionan inicialmente las alturas de las antenas, y a partir de ellas se determina, entre otras cosas el punto de reflexión, de tal manera que podamos seleccionar un punto de reflexión adecuado a nuestras necesidades. Generalmente la onda reflejada degrada el rendimiento del sistema, por lo que lo que interesa es bloquear la onda reflejada o escoger un punto que produzca reflexión difusa.

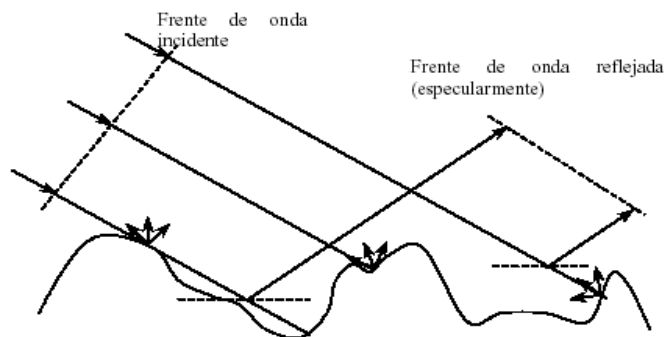


Fig. 2.-Fenómeno de reflexión

### 2.2.3.-Difracción:

Se define como la modulación o redistribución de energía de un frente de onda cuando éste pasa cerca de un objeto opaco.

El fenómeno de difracción es un modo de propagación importante en enlaces de microondas, fijos o móviles. En ciertos casos en los enlaces no es necesario que exista línea de vista, en cambio para enlaces móviles este fenómeno permite la comunicación en ciudades rodeadas de edificios o localidades obstruidas por cuerpos naturales o artificiales, fijos o en movimiento.

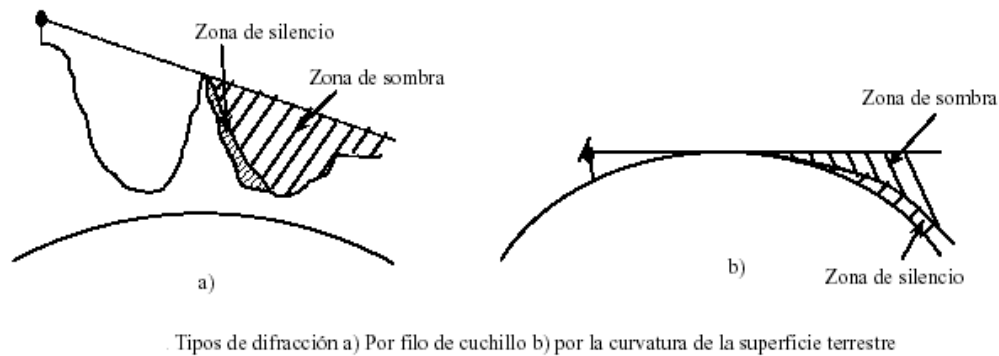


Fig. 3. Fenómeno de difracción

### 2.2.4.-Interferencia:

La interferencia de ondas de radio ocurre cuando dos o más ondas electromagnéticas se combinan de tal forma que el funcionamiento del sistema se degrada. La interferencia se apoya en el principio de superposición lineal de ondas electromagnéticas y ocurre cada vez que dos o más ondas ocupan simultáneamente el mismo punto en el espacio.

El fenómeno de interferencia establece una limitación en el uso de las comunicaciones inalámbricas, al tener que compartir los usuarios un espectro radioeléctrico limitado. Al diseñar un enlace cualquiera que sea su naturaleza, debe tenerse en cuenta inicialmente la interferencia que podrían producir enlaces cercanos, así como la interferencia del propio sistema, llamada sobre enlace.

### **2.2.5.-Zonas de Fresnel:**

A fin de asegurar que la pérdida por difracción debido a la pérdida de visibilidad es aceptablemente pequeña bajo todas las posibles variaciones, es necesario que se dibuje un perfil que muestre la altura de las antenas y del terreno a fin de considerar los posibles obstáculos en el trayecto del enlace. Sin embargo, aun y cuando se tenga línea de vista entre antenas libre de obstáculos, esto no es suficiente para asegurar que no ocurra ninguna obstrucción.

Agustín-Jean Fresnel demostró que las ondas luminosas no viajan en línea recta, sino mediante vibraciones transversales y que, partiendo de un punto emisor, se expanden como las ondas en el agua, formando esferas concéntricas. Sus experimentos tienen una gran importancia para los estudiosos de la propagación, dada la similitud física de las ondas luminosas y las radioeléctricas.

El famoso experimento de los espejos de Fresnel, por su similitud con lo que ocurre en los rebotes ionosféricos, ha hecho que sus fórmulas recobren actualidad. En tal experimento, provocando el rebote de la luz en dos espejos casi paralelos, se generan unas franjas de interferencia (reforzamientos y anulaciones de las ondas) cuya amplitud está en función de las distancias a las seudofuentes (espejos), y la longitud de onda utilizada. Con este procedimiento logró Fresnel, por vez primera, medir la longitud de onda de la luz, ya que las franjas de interferencias se producen cada número impar de medias ondas:  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$  ondas, etc.

Si la ionósfera se comportase exactamente como un espejo normal, solamente un ángulo de radiación determinado permitiría el contacto entre dos estaciones concretas, si embargo, no es así. Precisamente debido a los experimentos de

interferencias de fases realizados por Fresnel; con unos espejos negros, sabemos que la zona donde se realiza la reflexión de las señales de radio y que admitimos está a medio camino entre dos estaciones (para un solo salto), sabemos que se comporta como una zona en forma como de anillos concéntricos, que de dentro hacia afuera tienen menor grado de reflectividad, y están separados por otros con anulación total de señal.

El más interesante es el interno, que se denomina Zona 1 de Fresnel y que es posible determinar perfectamente a efectos de aprovechar al máximo las posibilidades de nuestros equipos y antenas.

La zona de Fresnel es calculada a lo largo del trayecto, usualmente por la distancia de cada punto del terreno, así, la resolución de la zona de Fresnel calculada y graficada es comparable a los datos del terreno. La fórmula de la n-ésima zona de Fresnel es una función de la longitud de onda ( $\lambda$ ), y la distancia a lo largo del trayecto desde cada extremo ( $D_1$  y  $D_2$ )

$$F_N = \sqrt{\frac{N \times \lambda \times D_1 \times D_2}{D_1 + D_2}}$$

Este valor representa una distancia perpendicular de la línea directa de línea de vista. La combinación de estos puntos a lo largo del trayecto puede verse como la gráfica de la zona de Fresnel. Típicamente la 1er. Zona de fresnel ( $N=1$ ) es usada para determinar pérdidas por obstrucción. Siempre que el espacio entre el terreno y la línea de vista es menor a la mitad de la distancia de la 1er. Zona de Fresnel pueden ocurrir pérdidas, la cantidad de pérdidas depende de la cantidad de penetración. A menudo los perfiles del terreno son dibujados con la primera zona de Fresnel y un radio de 0.5 para proporcionar una rápida inspección visual de posibles problemas causados por obstrucción al penetrar esta zona. Algunos ingenieros usan un radio de 0.6 de la 1er. Zona de Fresnel solo por seguridad.

Otro uso importante de la zona de Fresnel es revisar trayectorias para posibles puntos de reflexión. La fórmula para el cálculo de las zonas de Fresnel mencionada anteriormente es el conjunto de puntos donde la distancia del transmisor a la zona de Fresnel y de ésta al receptor es mayor que la trayectoria directa de transmisor a receptor. Para cualquiera de las zonas de Fresnel ( $N = 2, 4, \text{etc.}$ ), la diferencia entre la trayectoria directa e indirecta definida por la distancia de la zona de Fresnel es un múltiplo de media longitud de onda.

## **2.3.-Efecto de la absorción atmosférica y lluvia en la propagación de microondas.**

### **2.3.1.-Composición de la atmósfera y efectos sobre la propagación:**

A).-IONÓSFERA: Es la región superior de la atmósfera; sus características varían con la hora, día, estación y año, su altura oscila entre los 90 y los 500Km, y es permeable para frecuencias mayores a 30MHz.

La ionósfera absorbe grandes cantidades de energía solar, lo que ioniza las moléculas de aire, creando electrones libres que forman estratos de índice de refracción variable. Cuando una onda de radio pasa por la ionósfera, el campo eléctrico produce una fuerza sobre los electrones libres, que los hace vibrar, variando así, el índice de refracción.

La densidad de iones varía también en función de la altura, distinguiéndose a su vez en varias capas que forman la ionósfera. Estas capas, con distinta concentración iónica, y por tanto, con distintas propiedades, se dividen en tres clases, se habla de capas D, E y F donde la capa D es la de menor altura y F la de mayor. A su vez, la capa F esta subdivida en dos subcapas ;  $F_1$  y  $F_2$ .

- Capa D: Situada entre los 60 Km y 90 Km de altura, existe solo durante el día. Refleja las frecuencias bajas y atenúa las altas. Debido a su naturaleza diurna, la densidad iónica depende de la posición del sol.
- Capa E: Está situada Entre los 90 Km y los 130 Km. La concentración de iones depende también de la posición del sol . Es una capa más estable que la anterior. En determinados momentos puede aparecer dentro de esta capa, a una altura de 100 Km. una capa fuertemente ionizada denominada capa EE esporádica , que produce degradaciones en las transmisiones.
- Capa F<sub>1</sub>: Se encuentra entre los 150 Km y los 200 Km. de altura, también es una capa que aparece principalmente durante el día. Esta capa puede producir atenuación por absorción e influir en el alcance de la comunicación.
- Capa F<sub>2</sub>: Situada entre los 300 Km y 450 Km. de altura, su densidad de ionización varía según el día, la estación y el ciclo solar. De noche la capa F<sub>1</sub> se une con la capa F<sub>2</sub> a una altura de unos 300 Km.

#### B).-ESTRATÓSFERA:

En el límite superior de la tropósfera existe una zona de transición llamada tropopausa sobre la cual esta situada la región llamada estratosfera, donde la temperatura no varía con la altura. La altura de la tropopausa varía respecto al tiempo y la latitud y va desde unos pocos kilómetros hasta 20,000 Km. en el ecuador.

C).-TROPOSFERA: La tropósfera abarca las capas mas bajas de la atmósfera, en la que se forman nubes, existe una convección activa y prácticamente no existe ionización de las moléculas de aire. Prácticamente todos los fenómenos

meteorológicos ocurren en esta región de la atmósfera, que se extiende desde tierra hasta una altura que varía entre los 10 Km y 16 Km.

La tropósfera se caracteriza por un decrecimiento constante de la temperatura y la presión con la altura .

El índice de refracción en la tropósfera depende de variables meteorológicas tales como la cantidad de vapor de agua, la temperatura y la presión. Su índice de refracción decrece gradualmente con la altura, a medida que la densidad del aire decrece; sin embargo este decrecimiento no es uniforme. Debido al calentamiento de la superficie de la tierra, el aire está en continuo movimiento y produce pequeñas turbulencias, similares a remolinos, que actúan como discontinuidades en el gradiente del índice de refracción. Las turbulencias son más intensas cerca de la superficie de la tierra, y disminuyen gradualmente con la altura.

Para frecuencias bajo los 30 MHz, la longitud de onda es grande, comparada con el tamaño de las turbulencias, y por tanto, éstas tienen poco efecto en la propagación de las señales, sin embargo, a medida que se incrementa la frecuencia, las variaciones locales toman importancia.

La estratificación de la tropósfera y las turbulencias hacen posible la propagación de ondas muy cortas a largas distancias con mucha menos atenuación que en propagación de ondas por tierra. Las longitudes de onda capaces de viajar grandes distancias por medio de la propagación troposférica van desde los pocos metros (alrededor de 50 MHz) hasta los pocos centímetros (Decenas de GHz).

En el diseño de enlaces con frecuencias superiores a los 10 GHz, es esencial considerar los efectos de la atenuación excesiva causada por lluvias y por absorción atmosférica. Estas incluyen las pérdidas por mecanismos de polarización resonantes en las moléculas de los gases que conforman la atmósfera así como partículas suspendidas por el aire tales como lluvia, niebla, polvo, humo, etc.

### **2.3.2.-El problema general de la propagación arriba de 10GHz:**

La propagación de las ondas de radio a través de la atmósfera por encima de los 10 GHz involucra no solamente pérdidas de propagación en el espacio libre, sino también otros factores importantes:

1. La contribución gaseosa de la atmósfera homogénea debido a los mecanismos de polarización, resonantes y no resonantes.
2. La contribución de las no homogeneidades en la atmósfera
3. La contribución particular de la lluvia, niebla, polvo, smog, etc.

El principal factor que afecta la propagación de las señales de radio, es la atenuación por precipitación, con la cual están relacionados los puntos 2 y 3 de la lista anterior.

Se ha hecho común la práctica de expresar las pérdidas por lluvia en función de la tasa de precipitación. Dicha tasa depende del contenido líquido de agua y de la velocidad de caída de las gotas. La velocidad en cambio, depende del tamaño de la gota de lluvia.

Los cortes en la propagación de la señal, debido a la lluvia, son proporcionales a la tasa de lluvia de la región. Las moléculas de agua absorben la energía de microondas por medio del calentamiento. Entre más grandes son las gotas de lluvia, es mayor la cantidad de absorción de la señal de microondas.

La atenuación por lluvia causa desvanecimiento plano atenuando la señal recibida. La única manera de mejorar la disponibilidad es incrementando la ganancia del sistema, usando por ejemplo, antenas más grandes. En estos casos las técnicas de diversidad (espacio o frecuencia) no proporcionan mejoras, pues ambos canales podrían ser atenuados igualmente.



### 2.3.3.-Pérdidas por lluvia:

Existen varios modelos empíricos cuyos resultados se acercan bastante a las observaciones experimentales. El Modelo Global de Crane es uno de los más ampliamente utilizados por su exactitud y su sencillez. Este modelo da un “tiempo total” de caída del sistema por exceso de atenuación por lluvia en un enlace determinado. En este trabajo, se utilizará la modificación del Modelo de Crane que la ITU presenta como ITU Recomendación 530

Se puede aproximar el valor de esta atenuación:

$$\gamma = \alpha X R^\beta$$

Donde

$\gamma$  = Atenuación específica en dB/Km

$\alpha$  y  $\beta$  = Coeficientes de regresión para una frecuencia, polaridad y temperatura de lluvia dada

R = Tasa de lluvia en mm/h

Los coeficientes de regresión pueden observarse en la tabla mostrada en el apéndice B.

En dicha tabla se puede ver que estos coeficientes están dados en función de valores de frecuencias, cuando la frecuencia deseada no se encuentra en la tabla, los valores de  $a$  y  $b$  se pueden interpolar usando valores de frecuencias cercanos a la frecuencia buscada y mediante las fórmulas siguientes:

$$\alpha_x = \text{Antilog} [ \log \alpha_1 - M^*(\log a_1 - \log \alpha_2) ]$$

$$\beta_x = \beta_1 - M^*(\beta_1 - \beta_2)$$

Donde

$$M = (\log f_1 - \log f_x) / (\log f_1 - \log f_2)$$

$f_1$ : Frecuencia 1

$f_2$ : Frecuencia 2

$f_x$ : Frecuencia dada para la cual se desea hacer el cálculo

$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ : valores de coeficientes a y b para frecuencias 1 y 2

$\alpha_x$ : Valor buscado de  $\alpha$

$\beta_x$ : Valor buscado de  $\beta$

NOTA: Debe tenerse en cuenta el tipo de polarización de las antenas, ya que existen valores diferentes para estos coeficientes para polarización vertical y horizontal

La manera de interpolar es buscar un rango de frecuencias de la tabla en donde se encuentre la frecuencia dada, de tal manera que:

$$f_1 < f_x < f_2$$

$$\alpha_1 < \alpha_x < \alpha_2$$

$$\beta_1 < \beta_x < \beta_2$$

El valor de R se obtiene de la tabla en el apéndice C, teniendo como referencia un cierto porcentaje de indisponibilidad por lluvia. Una vez definido este porcentaje, del mapa mostrado en el apéndice A se puede ver la zona geográfica en donde el enlace estará localizado. Las zonas están identificadas con letras mayúsculas. Buscando en la tabla la letra de la zona geográfica en cuestión y el porcentaje de indisponibilidad se obtiene el valor de R para el porcentaje dado.

La atenuación efectiva se calcula mediante la fórmula:

$$A_{0.01} = \gamma \times L \times r$$

Donde:

$\gamma$  = Es el valor resultante del cálculo de la atenuación específica, para un cierto porcentaje de indisponibilidad por lluvia

L = Longitud del trayecto

r = factor de corrección dado por la siguiente fórmula:

$$r = 1 / [1 + (L/L_0)]$$

Donde  $L_0$  está dada por:

$$L_0 = 35 * e^{(-0.015 R\%)}$$

La atenuación para otros porcentajes de tiempo (P) es obtenida con:

$$A = \frac{0.012 [P^{-(0.546 + 0.043 \log_{10} P)}]}{A_{0.01}}$$

Para latitudes iguales o mayores que 30° Norte o Sur

y

$$A = \frac{0.07 P^{-(0.855 + 0.139 \log_{10} P)}}{A_{0.01}}$$

Para latitudes menores que 30° Norte o Sur

## 2.4.-Pérdidas por Propagación en el espacio libre:

El campo electromagnético generado en la antena de transmisión se propaga en forma perpendicular a la dirección del trayecto. La propagación en el vacío y los efectos que produce la atmósfera sobre la señal influyen notablemente la potencia recibida

Para propósitos de planeación es útil definir una posición de referencia donde la propagación puede ser considerada como no afectada por la tierra. La pérdida entre dos antenas no afectadas por la tierra, es llamada la pérdida por propagación en el espacio libre y puede derivarse de la siguiente manera:

Considerando un punto fuente con potencia  $P_t$ . Si se imagina que esta delimitado por una esfera, con radio  $d$ , la potencia entre el punto transmisor y la antena receptora en el punto  $d$ , puede ser expresada como:

$$P_t/P_r=(4\pi d/\lambda)^2$$

### 2.4.1.-Margen de desvanecimiento:

Un enlace de microondas sufre varias fluctuaciones en el tiempo por numerosas razones. Estas variaciones de señal en el nivel nominal de recepción son comúnmente llamadas desvanecimientos. Si se graficara el nivel de ganancia recibida en el tiempo, se encontraría que hay una constante variación en el nivel recibido. Esto es debido a las pequeñas variaciones en los gradientes de refractividad a través la señal pasa sobre el trayecto.

Hay diferentes tipos de desvanecimiento, y aquí resulta útil definir un término a menudo equívocamente usado en la industria: Desvanecimiento plano.

El desvanecimiento por lluvia y por difracción son ejemplos de desvanecimiento plano. Este término es también usado sin embargo, para describir la atenuación por desvanecimiento de multitrayectoria en una banda angosta, el cual exhibe una curva de distribución de probabilidad tipo Raleigh.

El desvanecimiento por multitrayectoria es causado por dos o más señales que han viajado en dos trayectorias casi similares y por lo tanto, se suman o cancelan en una frecuencia en particular, dependiendo de su relación de fase.

En sistemas de banda ancha, este mismo efecto multitrayectoria causa no solo reducciones en la amplitud, sino también distorsiones en banda, cuyos resultados son errores no dependientes de la amplitud, a esto se le conoce como desvanecimiento selectivo o dispersivo.

## **2.5.-Radio Equivalente de la tierra:**

A pesar que la energía de las ondas electromagnéticas tiende a viajar en línea recta, normalmente se curva hacia abajo debido a la refracción atmosférica. La magnitud del radio de esta curvatura varía con las condiciones atmosféricas. El grado y la dirección de la curvatura se pueden definir convenientemente por un factor de radio equivalente de la tierra.

La curva resultante es igual a la curvatura relativa del haz de microondas con respecto a la curvatura de la tierra, o sea, equivalente a la curvatura real de la tierra menos la curvatura del haz. Con fines ilustrativos se podría pensar, que es el radio que tendría la tierra si la trayectoria fuera recta, siendo  $K$ , el factor por el que se debe modificar el radio de la tierra para “enderezar” la curvatura de la onda electromagnética. En la siguiente figura se muestran diferentes trayectorias correspondientes a distintos valores de  $K$ :

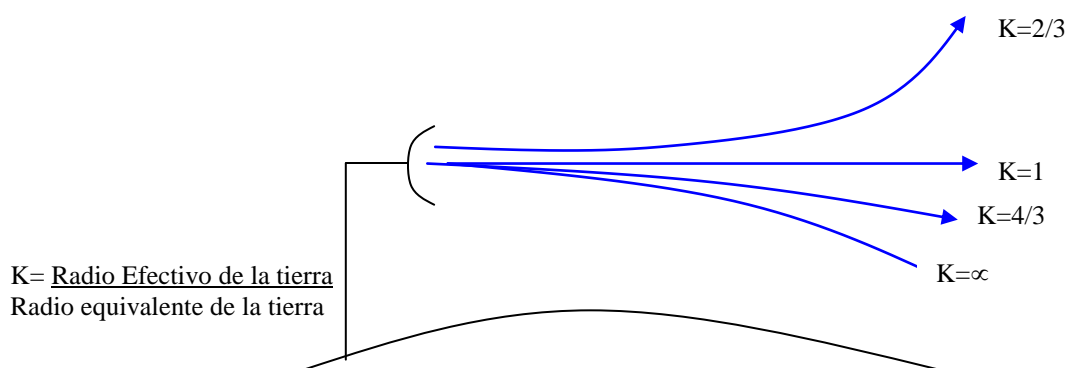


Fig. 4. Relación Entre la trayectoria de los rayos sobre la tierra y el factor de corrección de radio de la tierra

## **2.6.-Evolución de los Generadores de Microondas:**

Se puede considerar que la idea de generar una onda electromagnética como señal para comunicaciones proviene de las primeras emisiones de radio realizadas por Hertz y Marconi en 1887 y 1890, para las que utilizaban generadores de centelleo. Ya en esta época, el espectro de emisión llegaba hasta las microondas. En 1894, Sir Oliver Lodge, acopló un tubo metálico a un generador de centelleo y comprobó que la radiación emitida poseía unas propiedades directivas muy particulares. Sin embargo, hay que esperar hasta los años 20's para encontrar las primeras experiencias de aplicación de las microondas en las telecomunicaciones, llevadas a cabo fundamentalmente por George Southworth en Bell Telephone Laboratories en Estados Unidos, estando sus trabajos orientados al estudio de la propagación guiada.

Pero el verdadero desarrollo de las microondas está íntimamente ligado a la evolución del radar durante la 2ª Guerra Mundial, principalmente en Inglaterra y Estados Unidos. Inicialmente se utilizaron tubos de vacío y posteriormente, con el fin de obtener una detección más precisa se emplearon bandas de frecuencia cada vez más elevadas, lo que condujo al desarrollo del magnetrón.

Sin embargo, fueron los klistrones, los que dieron una mayor versatilidad de utilización de las microondas, sobre todo en el campo de las comunicaciones, permitiendo además una mayor comprensión de los fenómenos que tiene en lugar los tubos de microondas. El principio básico de funcionamiento de estos generadores es la modulación de velocidad de un haz electrónico que al atravesar una cavidad resonante, excita en ella oscilaciones electromagnéticas de la frecuencia de microondas deseada.

Hacia los años 60, tiene lugar otra gran evolución de la tecnología de los generadores de señales: empiezan a aparecer elementos activos basados en semiconductores que van reemplazando poco a poco a los tubos de vacío como fuentes de señal a baja y media potencia. El primero de estos dispositivos fue el diodo Gun y posteriormente se introdujeron otros tipos de diodos que hacen uso de fenómenos de avalancha, de la reducción de los tiempos de tránsito o del efecto túnel. Durante los años 70, los diodos empiezan a ser reemplazados por transistores bipolares o FETs .

El desarrollo de componentes de microondas estimulado por los avances en la tecnología de radar, fue rápido y diverso. Las aplicaciones militares se vieron acompañadas de una explosión en aplicaciones comerciales, que incluyen radares para el control de tráfico aéreo, radares para predicción meteorológica, detector de intrusos, control de tráfico rodado, etc. Pero el mayor impulso ha llegado procedente de la demanda de la industria de telecomunicaciones. La transmisión económica de información a través de un país, continente o entre continentes, ya sea voz, video o datos requiere la posibilidad de modular un enorme número de canales sobre una portadora y enviarlas sobre un canal de comunicaciones.

Hoy, la mayoría de los sistemas de comunicaciones operan en la banda de microondas: GPS, GSM, DBS (Direct Broadcast Satellite), PCS (Personal Communication Service), WLAN (Wireless Local Area Networks), LMDS (Local Multipoint Distribution System). Se dispone de un ancho de banda mayor cuando la frecuencia es más alta. Para un ancho de banda relativa de 1% a 600MHz representa 6MHz (un canal de TV). La misma anchura 60GHz ocupa 600MHz (100 canales de TV). La banda de microondas proporciona casi 1000 veces los canales de voz y radio que se pueden alojar en la banda de 0-300MHz



## 2.7.-Componentes de un enlace de Microondas.

Básicamente un enlace vía microondas consiste en tres componentes fundamentales: El Transmisor, el receptor y el canal aéreo. El transmisor es el responsable de modular una señal digital a la frecuencia utilizada para transmitir, el canal aéreo representa un camino abierto entre el transmisor y el receptor. El factor limitante de la propagación de la señal en enlaces microondas es la distancia que se debe cubrir entre el transmisor y el receptor, además esta distancia debe ser libre de obstáculos. Otro aspecto que se debe señalar es que en estos enlaces, el camino entre el receptor y el transmisor debe tener una altura mínima sobre los obstáculos en la vía, para compensar este efecto se utilizan torres para ajustar dichas alturas.

La distancia cubierta por enlaces microondas puede ser incrementada por el uso de repetidoras, las cuales amplifican y redireccionan la señal, es importante destacar que los obstáculos de la señal pueden ser salvados a través de reflectores pasivos. La siguiente figura (Fig. 5) muestran como trabaja un repetidor y como se ven los reflectores pasivos.

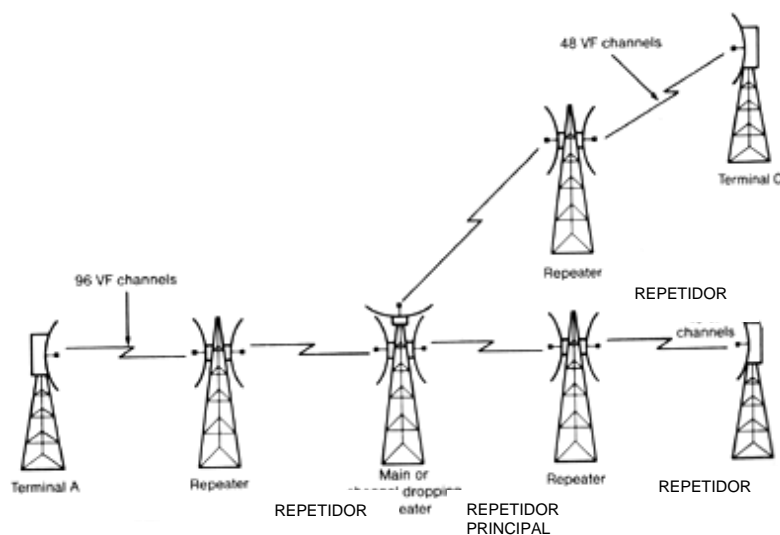


Fig.5. Antenas y repetidores.

Un radio enlace terrestre o microondas terrestre provee conectividad entre dos sitios (estaciones terrenas) en línea de vista (Line-of-Sight, LOS) usando equipo de radio con frecuencias de portadora por encima de 1 GHz. La forma de onda emitida puede ser analógica (convencionalmente en FM) o digital (Fig. 6).

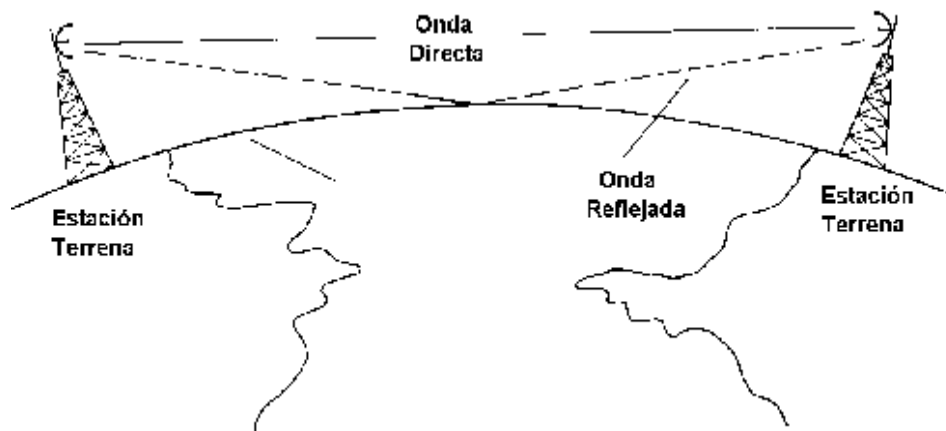


Fig. 6. Enlaces de Microondas de Línea de Vista.

### 2.7.1.-Estaciones de Microondas para enlaces de línea de vista.

A continuación se describen las estaciones terminales utilizadas en los sistemas de comunicaciones por microondas.

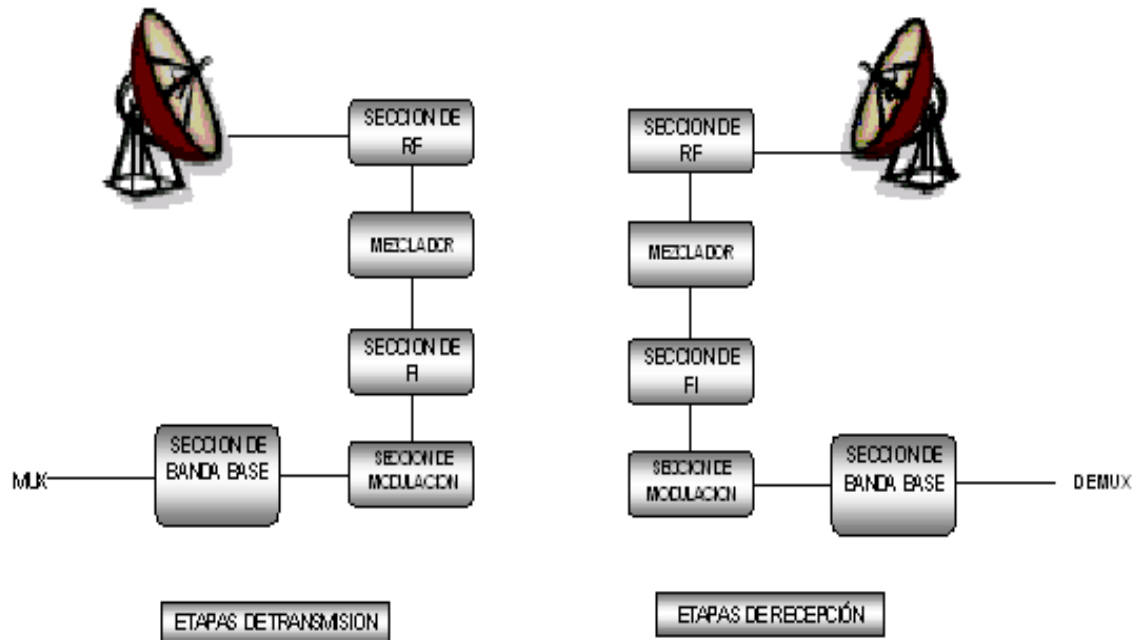


Fig. 7. Estaciones terminales

A).-MULTICANALIZADOR o MULTIPLEXOR (MUX)-DEMULTICANALIZADOR o DEMULTIPLEXOR (DEMUX): Aunque estos bloques en general pueden corresponder a cualquier sistema de multicanalización conocido para enlaces analógicos tipo FDM – FM corresponde a Multicanalización por división de Frecuencia (FDM). Para enlaces digitales corresponde a TDM (Multiplexión por división de tiempo)

B).-SECCIÓN DE BANDA BASE: En el transmisor, está compuesta por un preamplificador de banda base, una red de preénfasis; y en el receptor, por un

amplificador de banda base, un amplificador controlado por ganancia y una red de desénfasis que restaura la señal de banda base a sus características originales, esto es en el caso de una señal analógica. En el caso de una señal digital, en esta etapa se puede agregar un código de línea, o algún esquema de detección y corrección de error, si el sistema así lo requiere para un mejor rendimiento.

C).-SECCIÓN DE MODULACIÓN (Tx): Esta sección se compone de un preamplificador de banda base; un modulador FM, en el caso de una señal analógica, y algún esquema de modulación digital (BPSK, QPSK, etc.) en el caso de la información digital, el cual provee la modulación sobre una portadora de FI (típicamente entre 60 y 80 MHz, siendo la más común de 70MHz); y un circuito de Control Automático de Frecuencia.

D).-SECCIÓN DE DEMODULACIÓN (Rx): Está compuesta por un limitador discriminador, un preamplificador de banda base y un amplificador de canal de servicio.

E).-SECCIÓN DE FRECUENCIA INTERMEDIA: En el transmisor, está compuesta por:

- Filtro pasabanda de frecuencia intermedia: Se usa para proporcionar un ancho de banda limitado. Este filtro cambia dependiendo del ancho de banda utilizado, de tal forma que se limite el ruido introducido al sistema.
- Amplificador de FI.

En el receptor:

- Filtro Pasa Banda de FI.
- Ecuador de retardo (o fase).
- Amplificador de Frecuencia Intermedia con control automático de ganancia.

F).-SECCIÓN DE RF: En la figura 8 se muestra un diagrama a bloques de la sección de RF y sus componentes:

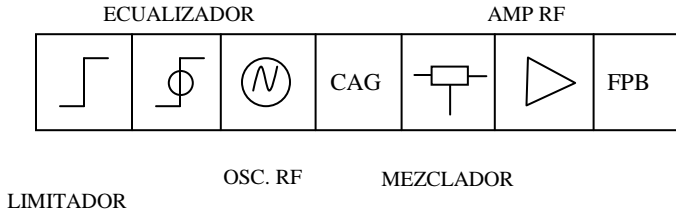


Fig. 8. Etapas de la sección de Radio frecuencia

- **LIMITADORES**: Se usan para evitar que el nivel de señal esté fuera del rango de operación lineal de los equipos.
- **FILTROS ECUALIZADORES**: Compensan las no linealidades de la sección de RF.
- **OSCILADOR DE RF**: Es necesario para obtener estabilidad en alta frecuencia. Son osciladores de cristal en VHF con multiplicadores de frecuencia en serie.
- **Control Automático de Ganancia (CAG) y Control Automático de Fase**.
- **MEZCLADOR**: La señal de FI se traslada a la región de microondas por medio de un mezclador de AM y un oscilador de microondas. Se mezcla para trasladar la señal de FI a RF, manteniendo invariable el índice de modulación.
- **AMPLIFICADOR DE RF**: Provee alta potencia de salida y aísla al oscilador de reflexiones.
- **FILTRO PASABANDA (FPB)**: Su Selectividad debe ser tal, que cualquier frecuencia fuera de la banda de paso esté al menos 20 dB por debajo del nivel del oscilador en el mezclador.

### **2.7.2.-Estaciones Repetidoras de Microondas:**

Usualmente las localidades que se desean comunicar mediante enlaces de microondas están ubicadas a distancias considerablemente mayores, lo que implica que un sistema de microondas de un solo salto no es adecuado para la mayoría de las aplicaciones prácticas. Por tanto, es necesario colocar repetidores para sistemas de largo alcance, evitando así obstrucciones que interfieran en la línea directa.

Los repetidores de microondas se dividen en activos y pasivos, dependiendo si regeneran la señal o no.

Un repetidor activo consiste en un receptor y un transmisor colocados “espalda contra espalda”. La estación repetidora recibe la señal, la amplifica y la acondiciona, para luego retransmitir al próximo repetidor o la estación terminal. Algunos tipos de repetidores activos son: el superheterodino, y el directo.

\*Consideraciones importantes al ubicar y seleccionar equipos repetidores y terminales:

Generalmente es mejor llevar el tráfico mediante líneas desde varias centrales en lugar de bajar e insertar el punto de repetición (ahorro de equipo multiplexor).

La ubicación de los puntos debe seleccionarse de acuerdo a las restricciones de propagación.

La selección de los métodos de alimentación entre la central y las estaciones depende de los requerimientos de calidad, ancho de banda, la distancia a recorrer, la topografía y la accesibilidad al terreno.

### 2.7.3.-Consideraciones sobre antenas.

Una antena es básicamente un elemento radiante que convierte una corriente eléctrica en un frente de ondas electromagnético.

Una antena es un dispositivo pasivo, y, por definición, no puede amplificar la señal, sin embargo puede hacer que la señal sea más fuerte en una dirección que en otra. Esto es la base de lo que se considera ganancia de una antena. La referencia es un radiador isótropo que, por definición tiene cero ganancia: Los estudios de propagación de las ondas electromagnéticas se inician considerando un radiador ideal, físicamente irrealizable denominado antena isotrópica que emite energía por igual en todas direcciones.

La cantidad por la cual la antena hace que la señal vaya en una dirección en particular esta descrita en términos de su ganancia.

La ganancia de una antena directiva respecto a la isotrópica expresa la “concentración de energía radiada en una determinada región del espacio. La ganancia de la antena se toma en el punto de máxima radiación.

Para antenas de microondas, la ganancia depende del área de apertura de la antena. La ganancia de una antena parabólica puede ser expresada como:

$$G(\text{dBi}) = 10 \log \eta (4\pi A_a / \lambda^2)$$

Donde:

$\eta$  = eficiencia de la apertura de la antena

$A_a$  = Area de apertura de antena

$\lambda$  = longitud de onda de la señal.

### 2.7.3.1.-Dos Tipos de antenas de microondas:

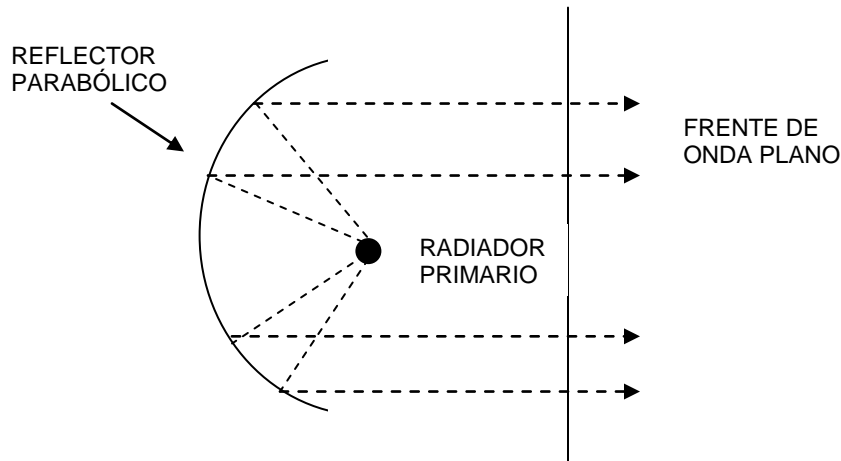


Fig. 9.-Antena Parabólica

Los diferentes tipos de antenas consideradas aquí están basadas en un reflector parabólico. El cuerno de alimentación es siempre colocado en el punto focal, así que la señal reflejada por el elemento reflector está en fase, como se muestra en la fig. 9:

- Antena Parabólica Estándar: son usualmente construidas de aluminio, el reflector en si no depende de la frecuencia, pero, a mayor frecuencia requerida, mejor debe ser el acabado de la superficie. En la práctica, los reflectores son por lo tanto especificados por la banda de frecuencia. Esta antena tiene parámetros estándar de ganancia, F/B (Front to Back Ratio), ancho del haz y RL (“Return Loss” o pérdida de retorno).
- Antena Focal plana: Para mejorar la relación F/B, adicionalmente esta antena tiene una geometría especial en el borde. El plato es construido con un borde aserrado. Esto rompe las corrientes de remolino, cancelados componentes de adición de fase y por lo tanto reduce la radiación detrás del plato.

NOTA: La relación F/B está definida como la relación de la ganancia en la dirección frontal deseada, a la ganancia en la dirección opuesta, y se expresa en dB.



## **2.8.-Tipos de radio enlaces: análogo vs. Digital.**

Los radio enlaces, al igual que el resto de los sistemas de telecomunicación, dependiendo de la naturaleza de la modulación se pueden dividir en analógicos y digitales.

### **2.8.1.-Radio enlace análogo.**

En este tipo de radio enlaces, la portadora esta modulada en frecuencia (FM). La información que transporta la portadora puede ser un multiplex MDF telefónico de capacidad entre 12 y 2700 canales, una señal de video de banda base, etc.

### **2.8.2.-Radio enlace digital.**

En los radio enlaces digitales, como su nombre lo indica, la modulación es digital, ya sea PSK, QAM, etc.

Una medida de capacidad para dimensionar los radio enlaces es la siguiente: se suele expresar en número de canales telefónicos (analógicos) que es capaz de transportar o la velocidad en bits por segundo (digitales).

El continuo avance de las telecomunicaciones provoca a migrar de lo análogo a lo digital y los sistemas de microondas no son la excepción.

La conversión de los radio enlaces de microondas analógicos a tecnología digital, es motivada por las siguientes causas:

- Obsolescencia
- Limitada capacidad de banda base
- Poca flexibilidad
- Ineficiencia para transportar datos
- La migración de la banda base de 2 GHz para acomodar los Sistemas de Comunicación Personal (PCS).

#### **2.8.2.1-Ventajas de los radio enlaces digitales.**

- Alta Calidad y eficiencia
- Resistente al desvanecimiento e interferencias
- Menor costo de multicanalización
- Mantenimientos simplificados en servicio
- Susceptible de expandirse a cualquier servicio digital

#### **2.8.2.2.-Disponibilidad y calidad de un enlace digital.**

La **confiabilidad** puede definirse como la capacidad de un componente, equipo o sistema de no fallar durante un determinado período de tiempo. Existe una relación matemática entre la confiabilidad de cada una de las partes y componentes y el sistema completo. Esta relación matemática es uno de los métodos conocidos para obtener en forma anticipada la confiabilidad de un equipo aún no instalado.

La confiabilidad distingue 3 tipos de períodos de fallas:

- Fallas que ocurren al iniciarse el período de vida operativo y que suceden por defectos de producción o de instalación;
- Fallas debidas al desgaste y que dependen del mantenimiento preventivo y
- Fallas aleatorias distribuidas al azar y que no dependen de pruebas o del mantenimiento.

Las **fallas aleatorias** tienen una distribución uniforme y por ello la confiabilidad responde a una ley exponencial.

La **disponibilidad** se define como la probabilidad que el sistema se encuentre trabajando en forma satisfactoria

Excepto para altas frecuencias (Mayores a 10 GHz) que son susceptibles de corte predecible por lluvia , los períodos de indisponibilidad son inaceptables para la mayoría de los usuarios.

El período de indisponibilidad empieza cuando, en al menos una dirección de la transmisión, una o ambas de las siguientes condiciones ocurre por 10 segundos consecutivos: o la señal digital es interrumpida, o la relación BER (*Bit-Error Ratio*) en cada segundo es peor que  $1 \times 10^{-3}$ . Estos 10 segundos son considerados parte del tiempo de indisponibilidad.

El período de indisponibilidad termina cuando para ambas direcciones de la transmisión ambas condiciones siguientes ocurren: la señal es restaurada y el BER en cada segundo es mejor que  $1 \times 10^{-3}$ . Estos 10 segundos son considerados dentro del tiempo de disponibilidad.

Causas de Indisponibilidad:

- Corte por lluvia (predecible y por tanto aceptable) en enlaces locales encima de los 10 GHz.
- Error de mantenimiento o intervención manual (apagar un módulo encendido).
- Falla de infraestructura (antenas, baterías)
- Bajo margen de desvanecimiento en enlaces sin diversidad.
- Disminución del nivel de recepción (pérdida del margen de desvanecimiento por períodos largos) en saltos alrededor de los 6 GHz.
- Falla de equipos.

Los largos cortes pueden ocurrir si el equipo de radio falla. El número de veces que el equipo de radio falla es inversamente proporcional al tiempo promedio antes de la falla (*MTBF: Mean Time Before Failure*) del equipo. La duración de este corte, es determinado por la magnitud del tiempo que le toma al equipo de mantenimiento restaurar el servicio, o el tiempo promedio de restauración (*MTTR: Mean Time To Restore*). Esta figura incluye el tiempo de enlace, el tiempo real para reparar la falla y la disponibilidad de las refacciones.

La disponibilidad de una terminal está dada por la fórmula:

$$A = (MTBF / (MTBF + MTTR)) * 100\%$$

Siendo la fórmula de la indisponibilidad la siguiente:

$$U = 100 - A\%$$

Aún para equipos con excelente MTBF y MTTR de unas cuantas horas la indisponibilidad no es aceptable para algunas redes críticas a menos que se empleen rutas de diversidad o equipo de protección.

## 2.9.-Diversidad.

Los sistemas de microondas utilizan la transmisión por línea de vista, es decir que debe existir una ruta de señal directa o línea de vista entre las antenas de transmisión y recepción. En consecuencia, si una ruta de señal experimenta una degradación severa, ocurrirá una interrupción del servicio. La diversidad sugiere que hay más de una ruta o método de transmisión disponible entre el transmisor y el receptor.

En un sistema de microondas, el propósito de utilizar la diversidad es incrementar la confiabilidad del sistema, incrementando su disponibilidad. Cuando hay disponible más de una ruta o método de transmisión, el sistema puede seleccionar la ruta o el método que produce la señal de más alta calidad recibida.

Por lo general, se determina la calidad más alta evaluando la relación de Portadora a Ruido (Carrier to Noise Ratio: C/N) en la entrada del receptor o simplemente midiendo la potencia de la señal recibida de la portadora.

Aunque existen muchas formas de lograr la diversidad, los métodos más comunes que se utilizan son la diversidad de frecuencia, diversidad de espacio y diversidad de polarización.:

1. Diversidad de frecuencias: La diversidad de frecuencias utiliza la transmisión en dos frecuencias distintas. Utiliza un par de frecuencias para la transmisión, de forma que si una de ellas se desvanece, la otra podrá ofrecer la señal útil. El desvanecimiento ocurre cuando el rayo reflejado llega en oposición de fase con el rayo principal, que al sumarse, las amplitudes se restan. El sistema se diseña para que cuando una de ellas se suma en contra fase, la otra dé como resultado una suma que permita recuperar la señal. Para conseguir esta propiedad, es necesario elegir la separación de las frecuencias de forma adecuada:  $\Delta f$  deberá ser de 3 a 5 %

2. Diversidad de Espacio: La diversidad de espacio utiliza dos trayectorias distintas con antenas separadas una distancia de varias longitudes de onda. De esta forma, la señal deseada se recibe por dos antenas distintas. La ventaja de esta técnica de diversidad es que se utiliza una sola frecuencia

3. Diversidad de Polarización: Con la diversidad de polarización una sola portadora de RF se propaga con dos diferentes polarizaciones electromagnéticas (vertical y horizontal). Las ondas electromagnéticas de diferentes polarizaciones no necesariamente experimentan el mismo deterioro en las transmisiones. La diversidad de polarización se utiliza conjuntamente con la diversidad de espacio.

## **2.10.- Técnicas de protección.**

Las técnicas de protección hacen posible que el enlace pueda estar en condiciones de funcionamiento el mayor tiempo posible . Se deben cumplir las expectativas de funcionamiento y evitar en lo posible que los fallos y averías afecten la calidad del enlace.

La protección de los equipo se hace mediante sistemas de redundancia que aseguren la continuidad en la recepción de la señal.

Los métodos de protección se pueden clasificar como conmutación de protección, que se aplica en el caso de fallos y averías de los equipos; y diversidad , que se emplea para amortiguar los efectos de los desvanecimientos.

Cuando se habla de equipos de reserva no nos referimos a equipos con diversidad, normalmente cuando se dispone de equipos de reserva, se trata de sistemas redundantes que entran en funcionamiento en caso de falla de del sistema principal.

Suelen emplearse equipos redundantes tanto en transmisión como en recepción, sin embargo en equipos con diversidad se refiere al empleo de la redundancia solo en recepción.

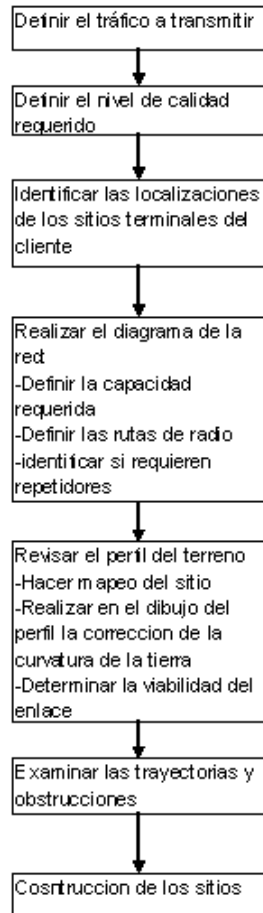
## **2.11.- Cálculos y Consideraciones para el desarrollo de un enlace.**

Una consideración básica es la localización física de los sitios en cada punto terminal del enlace, ya que en los enlaces de microondas, tener una línea de vista es la condición ideal. Cuando no se tiene línea de vista entre antenas, se debe planear de acuerdo a esta condición.

Otras consideraciones son:

- Disponibilidad para instalar una o más antenas, teniendo en cuenta si se requiere la construcción de torres.
- Posibles obstrucciones futuras (árboles, edificios, etc.)
- Disponibilidad para aterrizado de equipo

El siguiente diagrama proporciona una breve descripción del plan de trabajo en el diseño de un enlace de microondas:



Una vez seleccionados los sitios donde se instalarán los equipos de transmisión y recepción en cada punto de la red y habiendo considerado factores como obstrucciones y uso de repetidores, parte importante del diseño radica en la realización correcta del perfil del terreno, aunque en áreas urbanas podría ser debatible el uso del perfil del terreno, ya que ahí predominan las obstrucciones por edificios, en otro tipo de áreas el realizar un perfil no muy exacto repercutiría directamente en costos de equipo principalmente.

Cuando se realizan perfiles del terreno no debe olvidarse considerar la curvatura natural de la tierra, para lo cual hay que hacer una corrección del perfil una vez que se tiene dibujado, con ayuda en algunas ocasiones de mapas topográficos o sistemas computacionales cuyas bases de datos proporcionan la información topográfica requerida.



Dicha corrección puede hacerse usando la fórmula:

$$h = \frac{d_1 \cdot d_2}{12.75 k}$$

Donde

$h$  = Altura del terreno en metros.

$d_1, d_2$  = distancias de cada punto terminal en Km.

$k$  = Radio equivalente de la tierra

#### Cálculo de la potencia recibida:

Este cálculo se realiza para corroborar que la señal tendrá la fuerza apropiada cuando llegue al otro extremo del enlace.

Para este cálculo deben conocerse los siguientes datos:

- Frecuencia del enlace.
- Pérdidas (Por propagación en espacio libre, de conectores, etc.).
- Potencia de salida del transmisor.
- Ganancia de potencia de las antenas.
- Diámetro de las antenas.
- Longitud total de las líneas de transmisión y pérdidas por unidad a l frecuencia especificada de operación.
- Número de conectores usados.
- Sensibilidad del Receptor.
- Distancia total del trayecto.

El cálculo de la potencia a la entrada del Receptor está dado por la siguiente expresión:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + GP_{Tx} + GP_{Rx} - \text{Pérdidas totales}$$

Donde:

$P_{R_x}$  = Potencia a la entrada del receptor

$GP_{T_x}$  = Ganancia de Potencia de la antena transmisora

$GP_{R_x}$  = Ganancia de Potencia de la antena receptora

Otras Pérdidas pueden ser:

- Pérdidas por propagación en el espacio libre
- Pérdidas por conectores
- Pérdidas por líneas
- Pérdidas por absorción atmosférica

Las pérdidas por propagación en el espacio libre expresadas en dB, pueden obtenerse por medio de la fórmula:

$$P_p = 20 \log_{10} (4\pi d/\lambda) \text{ Db}$$

Las ganancias de las antenas están dadas por la expresión:

$$G = \text{Directividad de la antena} + \eta$$

Donde  $\eta$  es una relación de la potencia radiada sobre la potencia alimentada, típicamente con un valor de 55%.

La directividad de las antenas se obtiene por la fórmula:

$$\text{Directividad} = (\text{Diam. Antena} \cdot \pi) / \lambda$$

### 2.11.1.- EJEMPLO PRÁCTICO (Cálculo de la potencia recibida a la entrada del receptor).

Supóngase un enlace cuya potencia de transmisión es de 5W, con una distancia entre transmisiones de 19Km, además de los siguientes datos:

- Pérdidas por línea: 15dB / 100 m
- Longitud de línea de Transmisión: 10 m
- Longitud de línea de Recepción: 8m
- Pérdidas por conectores: 1 dB.
- Diámetro de la antena Transmisora: 80 cm.
- Sensibilidad del Receptor (Threshold): -72 dBm
- $\eta = 55\%$
- Frecuencia: 18GHz
- Pérdidas por Absorción atmosférica: 0.2 dB.

#### DESARROLLO:

Usando la fórmula

$$2.11.1.1. P_{Rx} = P_{Tx} + GP_{Tx} + GP_{Rx} - \text{Pérdidas Totales}$$

Como dato conocido tenemos la potencia del transmisor, pero en términos de cálculos, esta cantidad se convierte a dBm, o dBW, en este caso se trabajará en dBm, de manera que tenemos que:

$$P_{Tx} = 50 \text{ W}$$

$$P_{Tx} \text{ dBm} = 10 \log_{10}(50,000 \text{ mW})$$

$$P_{Tx} \text{ dBm} = 36.98 \text{ dBm}$$

Para el cálculo de la Ganancia de Potencia en la antena receptora usamos la expresión:

$$G = \text{Directividad de la antena} + \eta$$

Haciendo referencia al cálculo para el Transmisor,

$$2.11.1.2.A \text{ .- } GP_{Tx} = Dir_{Tx} + \eta_{Tx} \text{ en dB}$$

Y teniendo en cuenta que:

$$2.11.1.2 B.- Dir_{Tx} = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{Diámetro} \cdot \pi}{\lambda} \right) \text{ dB}$$

$\lambda$

$$Dir_{Tx} = 20 \log_{10} \left( \frac{0.8 \times \pi}{\lambda} \right) \text{ dB}; \text{ y } \lambda = c / f$$

$\lambda$

$$Dir_{Tx} = 43.56 \text{ dB}$$

Sustituyendo el resultado anterior en la fórmula para el cálculo de la ganancia de potencia en la antena transmisora, tenemos:

$$GP_{Tx} = 43.56 \text{ dB} + \eta_{Tx};$$

$$\text{pero : } \eta_{Tx} \text{ dB} = 10 \log_{10} (0.55) = -2.59 \text{ dB}$$

Entonces, sustituyendo el valor de  $\eta_{Tx}$ , en la fórmula para calcular  $GP_{Tx}$ :

$$GP_{Tx} = 43.56 \text{ dB} + (-2.59 \text{ dB})$$

$$GP_{Tx} = 40.97 \text{ dB}$$

Para este ejemplo suponemos antenas semejantes, por lo tanto:

$$GP_{Tx} = GP_{Rx}$$

Entre otras pérdidas debemos considerar las pérdidas por propagación:

$$2.11.1.3.-\text{Perd. por Prog. dB} = 20 \log_{10} [ (4\pi \text{ distancia}) / \lambda ] \text{ dB}$$

$$\text{Perd. Prog dB} = 20 \log_{10} [ (4\pi 19000) / \lambda ] \text{ dB}$$

$$\text{Perd. Prog dB} = 143.12 \text{ dB}$$

Habiendo Calculado los datos anteriores y usando el resto de la información proporcionada, y realizando el siguiente cálculo:

$$P_{Rx} = 36.98 \text{ dBm} + 40.97 \text{ dB} + 40.97 \text{ dB} - [143.124 \text{ dB} + 2 \text{ dB} + 10m(15\text{dB}/100) + 8m(15\text{dB}/100) + 0.2 \text{ dB} ]$$

Tx

Rx

Pérdidas por conectores

La potencia a la entrada del receptor es:

$$P_{Rx} = 29.1 \text{ dBm}$$

### 2.11.2.-Cálculos de margen de desvanecimiento compuesto.

Luego, para este mismo ejemplo procedemos a hacer el Cálculo del Margen de Desvanecimiento Plano para este caso:

El Margen de Desvanecimiento plano (FFM: Flat Fade Margin) esta dado por la siguiente expresión:

$$\text{FFM} = P_{\text{Rx}} - \text{Sensibilidad del Receptor}$$

La sensibilidad del receptor es la Potencia Mínima requerida que debe llegar al receptor para la obtener la calidad de señal requerida.

Para este enlace, de acuerdo a datos del fabricante del equipo, este receptor tiene una Sensibilidad (también conocida como “Threshold”) de -72 dBm.

Haciendo el cálculo tenemos:

$$\text{FFM} = -29.1 -72 \text{ dBm} - (-72 \text{ dBm})$$

$$\text{FFM} = 42.9 \text{ dBm}$$

Ahora, para calcular el **margen de desvanecimiento compuesto**, necesitamos el margen de desvanecimiento dispersivo, un dato normalmente proporcionado por el fabricante del equipo. Típicamente Este valor es de 50 dB.

El margen de desvanecimiento compuesto esta dado por la siguiente relación:

$$\text{CFM dB} = 10 \text{ Log}_{10} \left\{ \frac{1}{(1/\text{FFM}) + (1/\text{DFM})} \right\}$$

Donde FFM es el Margen de desvanecimiento plano y DFM es el margen de desvanecimiento dispersivo.

Estos datos son proporcionados en dB, sin embargo es necesario expresarlos como una relación numérica a fin de calcular el Margen de desvanecimiento compuesto:

$$\text{FFM dB} = 42.9 \text{ dB};$$

$$42.9 = 10 \text{ Log}_{10} X$$

$$(42.9/10) = \text{Log}_{10} X$$

$$4.29 = \text{Log}_{10} X$$

$$X = 10^{(4.29)}$$

$$\text{FFM (rel. numérica)} = 19.4984 \times 10^3$$

$$\text{DFM dB} = 50 \text{ dB};$$

$$50 = 10 \text{ Log}_{10} X$$

$$(50/10) = \text{Log}_{10} X$$

$$5 = \text{Log}_{10} X$$

$$X = 10^{(5)}$$

$$\text{DFM (rel. numérica)} = 100,000$$

$$\text{CFM dB} = 10 \text{ Log}_{10} \left\{ \frac{1}{[1/(19.4984 \times 10^3) + 1/(1 \times 10^5)]} \right\}$$

<b>CFM dB = 42.13 dB.</b>
---------------------------

Una vez obtenido el Margen de Desvanecimiento Compuesto, se calculan los porcentajes de disponibilidad e indisponibilidad al año del enlace analizado:

Para el cálculo del factor de indisponibilidad se cuentan con dos modelos:

Modelo Vigant (América):

$$UND = (2.5 \times 10^{-6}) < f * (D)^3 * 10^{(-CFM/10)}$$

Donde :

$U_{ND}$  : Factor de indisponibilidad

D= Distancia (millas)

$f$  = Frecuencia (GHz)

Modelo Vigant (ITU):

$$UND = KQf D^3 10^{(-CFM/10)}$$

Donde

D= Distancia (Km)

$f$  = Frecuencia (GHz)

\*\*ITU: internacional Telecommunications Union

De estas dos expresiones, se hace una adaptación (también aceptada por la ITU):

$$UND = C * (6 \times 10^{-7}) f D^3 10^{(-CFM/10)}$$

Donde

C = Factor Clima Terreno, típicamente con valor de 1

D= Distancia (Km)

$f$  = Frecuencia (GHz)

El tiempo de indisponibilidad ( $T_{ND}$ ) esta dado por la sig. Expresión:



$$T_{ND} = U_{ND} * (8 \times 10^6) * (t/50)$$

Donde t es la temperatura promedio de la zona donde se realiza el enlace (en °F).

Haciendo los cálculos:

$$f = 18 \text{ GHz}$$

$$U_{ND} = C * (6 \times 10^{-7}) * f * D^3 * 10^{-(CFM/10)}$$

$$U_{ND} = 1 * (6 \times 10^{-7}) * (18) * (19)^3 * 10^{\{-(42.13)/10\}}$$

$$U_{ND} = 4.54 \times 10^{-6}$$

Si consideramos una temperatura promedio anual de 68° F, La disponibilidad de este enlace es de:

$$T_{ND} = (4.54 \times 10^{-6}) * (8 \times 10^6) * (68/50).$$

$$T_{ND} = 49.3941721818551 \text{ Segundos al año}$$

$$T_{ND} = 49.3941721818551 / (365 * 24 * 60 * 60) = 1.56628 \times 10^{-6}$$

$$T_{ND} \% = 1.56628 \times 10^{-6} \%$$

$$\% \text{ Disponibilidad} = 99.99984\%$$

**Este resultado indica que el enlace es estable**

## 3. Desarrollo de la evaluación de la red

### 3.1.-Hipótesis:

Al momento de realizar este trabajo, la Dirección General de Informática de la UANL cuenta dentro de su red de Telecomunicaciones con 4 enlaces de Microondas los cuales son: Campus Mederos, Campus Salud (Fac. Medicina), Facultad de Economía y la Biblioteca Magna. Dos de estos son 4 x E1's, y el resto son de 34 Mbps. Si bien es cierto que esta es una muy buena velocidad de transmisión es necesario evaluar las condiciones actuales de los sitios así como el equipo con el que se efectúan dichos enlaces ya que puede obtenerse la misma calidad de transmisión con un diferente tipo de enlace / equipo.

### 3.2.-Datos, Coordenadas y estructura de cada uno de los sitios.

En las siguientes tablas se muestran datos de los enlaces actuales así como la información técnica referente a los equipos utilizados:

ENLACE	Enlace Club Informática a Economía	Enlace Club Informática a Mederos	Enlace Club Informática a Fac. de Medicina	Enlace Club Informática a Biblioteca Magna
FRECUENCIA DE TX	17.8925 GHz	18.590 GHz	21.3185 GHz	21.3185 GHz
FRECUENCIA DE RX	19.5075 GHz	18.930 GHz	22.5505 GHz	22.5505 GHz
VOLTAJE ACG MODEMS	ACG en Club Informática: 8.13 Volts ACG en Economía : 8.80 Volts	ACG en Club Informática: 8.65 Volts ACG en Mederos : 8.80 Volts	ACG en Club Informática: 8.42 Volts ACG en Fac. medicina : 8.61 Volts	ACG en Club Informática: 8.25 Volts ACG en Fac. medicina : 8.37 Volts
Polarización del enlace	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
Distancia	7.259 Km	13.285 Km	5.492 Km	1.14Km

Tabla 1.-Datos de los enlaces

SITIO	Unidad Mederos	Biblioteca Magna	Punto Central Club Informatica Enlace Unidad Mederos	Punto Central Club Informatica Enlace Biblioteca Magna	Punto Central Club Informatica Enlace Fac. Medicina	Punto Central Club Informatica Enlace Economía
DIRECCION	Ave. Las Torres, Unidad Mederos	Ciudad Universitaria	Ciudad Universitaria	Ciudad Universitaria	Fac. de Medicina	Fac. de Medicina
COORDENADAS GEODESICAS	Latitud: 25° 36' 23" N Longitud 100° 18' 55.5" W	Latitud: 25° 43' 27" N Longitud 100° 18' 38.5" W	Latitud: 25° 43' 25" N Longitud 100° 18' 36" W	Latitud: 25° 43' 25" N Longitud 100° 18' 36" W	Latitud: 25° 43' 25" N Longitud 100° 18' 36" W	Latitud: 25° 43' 25" N Longitud 100° 18' 36" W
ENLACE HACIA	Club Informática	Club Informática	Unidad Mederos	Biblioteca Magna	Fac. de Medicina	Economía
DISTANCIA AL PUNTO REMOTO	13.285 Km	1.14 Km	13.285 Km	1.14 Km	5.492 Km	7.259 Km
DIAMETRO DE ANTENA	1.2 m	0.5 m	1.2 m	5 m	0.8 m	0.8 m
ALTURA DE LA ANTENA	8m	1 m	15 m	9 m	17 m	4 m
ESTRUCTURA UTILIZADA	Torre TH-45 de 9 m reforzada	Mástil de 4"	Torre TH-45 de 18 m reforzada	Torre TH-45 de 18 m reforzada	Torre TH-45 de 18 m reforzada	Torre TH-30 de 6 m reforzada

Tabla 2.- Sitios de la red y coordenadas

### 3.3. Análisis de cada enlace de la red;

#### 3.3.1.-ENLACE CLUB INFORMATICA A FACULTAD DE MEDICINA: Cálculo de la potencia Recibida

- Frecuencia: 21.3185 GHz
- Potencia de Salida del Transmisor: 16 dBm
- Sensibilidad del receptor: -76 dB (Para BER  $10^{-6}$ )
- Distancia: 5.49 Km
- Pérdidas por absorción atmosférica: 0.8 dB.
- Pérdidas totales en líneas: 0.5 dB.

Usando las fórmulas del ejemplo 2.11.1 para calcular la potencia a la entrada del receptor, tenemos que:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + GP_{Tx} + GP_{Rx} - \text{Pérdidas}$$

A).-Ganancia de la Antena Transmisora:

Usando las fórmulas 2.11.1.2.A y 2.11.1.2 B

$$GP_{Tx} = 42.433 \text{ dB.}$$

B).-Pérdidas por propagación:

Usando la fórmula 2.11.1.3:

$$\text{Perd. Prog} = 133.808 \text{ dB.}$$

C.-Potencia a la entrada del receptor:

Considerando además de las pérdidas por propagación, las pérdidas de conectores, por absorción atmosférica, la Potencia a la entrada del receptor se resume a una fórmula de Ganancias menos Pérdidas, dando como resultado para este caso:

$$P_{Rx} = 34.948 \text{ dBm.}$$

De acuerdo a los datos del enlace, la Sensibilidad es de -76 dB.

Entonces:

$$FFM = -34.948 \text{ dB} - (-76 \text{ dB})$$

$$FFM = 41.052 \text{ dB.}$$

$$FFM \text{ dB} = 41.052 \text{ dB;}$$

$$41.052 = 10 \text{ Log}_{10} X$$

$$(41.052/10) = \text{Log}_{10} X$$

$$4.1052 = \text{Log}_{10} X$$

$$X = 10^{(4.1052)}$$

$$FFM \text{ (rel. numérica)} = 1.27 \times 10^4$$

$$DFM \text{ dB} = 50 \text{ dB;}$$

$$50 = 10 \text{ Log}_{10} X$$

$$(50/10) = \text{Log}_{10} X$$

$$5 = \text{Log}_{10} X$$

$$X = 10^{(5)}$$

DFM (rel. numérica)= 100,000

Calculando el margen de desvanecimiento compuesto tenemos:

$$\text{CFM dB} = 10 \text{ Log}_{10} \left\{ \frac{1}{(1/\text{FFM}) + (1/\text{DFM})} \right\}$$

$$\text{CFM dB} = 10 \text{ Log}_{10} \left\{ \frac{1}{[1/(1.27 \times 10^4) + 1/(1 \times 10^5)]} \right\}$$

$$\text{CFM dB} = 40.53 \text{ dB.}$$

Calculando los factores de indisponibilidad:

$$f = 21.3185 \text{ GHz}$$

$$U_{\text{ND}} = C * (6 \times 10^{-7}) f D^3 10^{(-\text{CFM}/10)}$$

$$U_{\text{ND}} = 1 * (6 \times 10^{-7}) * (21.3185) (5.49)^3 10^{\{-(40.53)/10\}}$$

$$U_{\text{ND}} = 1.87 \times 10^{-7}$$

Si consideramos una temperatura promedio anual de 68°F, La disponibilidad de este enlace es de:

$$T_{\text{ND}} = (1.87 \times 10^{-7}) * (8 \times 10^6) * (68/50).$$

$$T_{\text{ND}} = 2.03823297275501 \text{ Segundos al año}$$

$$T_{\text{ND}} = 2.03823297275501 / (365 * 24 * 60 * 60) = 6.4631 \times 10^{-8}$$

$$T_{\text{ND}} \% = 6.4631 \times 10^{-6} \%$$

$$\% \text{ Disponibilidad} = 99.99999 \%$$

El porcentaje de disponibilidad obtenido indica que el enlace es confiable.

### 3.3.2.-Resultados para el resto de los enlaces de la red UANL.

De la misma manera en la que se calcularon la potencia a la entrada del transmisor así como la disponibilidad del enlace del club informática a la Fac. de Medicina, así también se hicieron los cálculos para el resto de los enlaces, cuyos resultados se muestran en la tabla 3:

ENLACE	Club Informática a Fac. Economía	Club Informática a Unidad Mederos	Club Informática a Biblioteca Magna	Club Informática a Fac Medicina
<b>DATOS</b>				
FRECUENCIA (GHz)	17.8925	18.59	21.3185	21.3185
DISTANCIA DEL ENLACE(Km)	7.259	13.285	1.14	5.492
				5.492
POTENCIA DE SALIDA DEL TRANSMISOR (dBm)	20	20	16	16
PERDIDAS POR ABSORCION ATMOSFERICA	0.6	1.1	0.2	0.8
SENSIBILIDAD DEL RX (dBm)	-81	-81	-76	-76
DIAMETRO DE ANTENAS (antenas iguales)	0.8	1.2	0.5	0.8
PERDIDAS TOTALES DE LINEAS(dB)	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>DATOS</b>				
Dir. Antena Tx	43.51579262	47.36978508	40.95510532	45.03750498
GPTx	40.91941951	44.77341197	38.35873222	42.433
GPRx	40.91941951	44.77341197	38.35873222	42.433
Perdidas Por Propagación	134.7127286	140.2945912	120.1550021	133.808
TEMPERATURA AVG (° F)	68	68	68	68
Prx(dB)	-34.47388961	-32.84776721	-28.63753765	-34.948
FFM(dB)	46.52611039	48.15223279	47.36246235	41.052
DFM(dB)	50	50	50	50
CFM(dB)	44.91429612	45.96827898	45.47370752	40.53118515
UND	1.32423E-07	6.6174E-07	5.37343E-10	1.87286E-07
TND	1.440758741	7.199731721	0.005846293	2.037676835
INDISPONIBILIDAD	0.00001%	0.00001%	0.00001%	0.00001%
DISPONIBILIDAD	99.999991%	99.999991%	99.999991%	99.999991%

Tabla 3.- Resultados del análisis de cada enlace de la red UANL

## **4. Conclusiones y Recomendaciones**

Como se puede apreciar en la tabla 3.3.2.A, los resultados muestran una disponibilidad en tiempo muy cercana al 100%, lo cual indica un excelente nivel de recepción y transmisión de señal, y que la red en general es confiable, por lo cual en el presente trabajo no se hacen ninguna sugerencia en cuanto a reubicación geográfica de las antenas y equipos existentes.

### **4.1. Opciones de Mejora.**

Aún y cuando los niveles de disponibilidad del enlace aseguran un buen desempeño de la red la mayor parte del tiempo durante el año, es importante considerar factures adicionales que en determinados momentos pudieran afectar de manera negativa la calidad de señal en estos enlaces, tal como el exceso de lluvias.

El análisis de pérdidas por lluvia se contempla en la sección 2.3.4 del presente trabajo. Las fórmulas ahí descritas se usarán a continuación para ilustrar un ejemplo de cómo calcular las pérdidas por lluvia en un enlace para después aplicarlas a los resultados de cada uno de los enlaces estudiados anteriormente.

### 4.1.1. Ejemplo de análisis de pérdidas por lluvias.

Calcular las pérdidas por lluvias para un enlace en la Cd. de Monterrey NL, con una frecuencia de 18 GHz con un porcentaje de indisponibilidad de 0.01%, suponiendo polarización horizontal de las antenas, y con una longitud de trayecto para este enlace de 7 Km

#### SOLUCION:

En la tabla de frecuencias del apéndice B, puede observarse que no hay coeficientes de regresión para la frecuencia dada (18GHz), sin embargo se puede hacer una interpolación usando las fórmulas para el cálculo de los coeficientes de regresión:

$$\alpha_x = \text{Antilog} [ \log \alpha_1 - M * (\log a_1 - \log \alpha_2) ]$$

$$\beta_x = \beta_1 - M * (\beta_1 - \beta_2)$$

$$M = (\log f_1 - \log f_x) / (\log f_1 - \log f_2)$$

Puede escogerse un rango de frecuencias cercanas a la frecuencia dada ( $f_x$ ), tal que:

$$f_1 < f_x < f_2$$

$$\alpha_1 < \alpha_x < \alpha_2$$

$$\beta_1 < \beta_x < \beta_2$$

En este caso, de acuerdo a la tabla,  $f_1 = 15$  GHz y  $f_2 = 20$  GHz.

Empezamos por calcular el valor de M:



$$M = [\log(15) - \log(18)] / [\log(15) - \log(20)]$$

$$M = 0.6$$

Así como se eligió el rango de frecuencias cercanas a  $f_x$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  y  $b_2$  se eligen según los valores de la tabla que correspondan al rango de frecuencias elegidas (15 GHz y 20 GHz) considerando el tipo de polarización del ejemplo, de esta manera tenemos que:

$$\alpha_1: 0.0367$$

$$\alpha_2: 0.0751$$

$$\beta_1: 1.154$$

$$\beta_2: 1.099$$

Entonces, sustituyendo en las fórmulas para el cálculo de los coeficientes de regresión, tenemos que:

$$\alpha_x = \text{Antilog} \{ \log(0.0367) - (0.6) * [\log(0.0367) - \log(0.0751)] \}$$

$$\alpha_x = 0.0577$$

$$\beta_x = 1.154 - (0.6) * (1.154 - 1.099)$$

$$\beta_x = 1.119$$

Ahora, usamos la siguiente expresión para el cálculo de atenuación de señal en el trayecto por exceso de lluvia:

$$\gamma = \alpha X R^\beta$$

Sabemos que  $R$  es la tasa de lluvia en mm / h por zona geográfica, y para este caso los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  son los que se calcularon previamente como  $\alpha_x$  y  $\beta_x$ . El valor de  $R$  puede obtenerse de la tabla mostrada en el apéndice C (Ref. ITU-R Rec. PN837-1), considerando que, de acuerdo a los datos proporcionados existe un porcentaje de indisponibilidad de 0.01%, y que la zona geográfica según el mapa mostrado en el apéndice A, corresponde a la letra M (Nota: No debe confundirse con la constante M que aparece en la fórmula para el cálculo de los coeficientes de regresión).

Al buscar en la tabla del apéndice C, la intersección del porcentaje de indisponibilidad con la letra de la zona geográfica correspondiente, obtenemos el valor de  $R$ :

		Zonas Geográficas						
<u>% de</u> <u>indisponibilidad</u> Q		A	B	C.....	M	N	O	P
0.01					63			

De tal manera, calculamos para  $R_{0.01}$ :

$$\gamma = (0.0577) * (63)^{(1.119)}$$

$$\gamma_{0.01\%} = 5.9630 \text{ dB/Km}$$

Así mismo, podemos calcular  $\gamma$  efectiva, usando la siguiente expresión:

$$A_{0.01} = \gamma \times L \times r$$

Donde:

L : Longitud del trayecto (para este caso, de acuerdo a los datos proporcionados, L=7 Km)

r : Factor de corrección ( ya que se considera que no todo el trayecto esta lloviendo).

El factor de corrección “r” se calcula por:

$$r = 1 / (1 + L / L_0)$$

Donde

$$L_0 = 35 * e^{(-0.015 R_{0.01\%})}$$

Por lo tanto:

$$L_0 = 35 * e^{(-0.015 * 63)}$$

$$L_0 = 13.60;$$

$$r = 1 / (1 + 7 / 13.60)$$

$$r = 0.66;$$

$$A_{0.01} = (5.9630 \text{ dB/Km}) * (7 \text{ Km}) * (0.66)$$

$$A_{0.01} = 27.56 \text{ dB}$$

Ahora, el valor de  $\alpha$  para cualquier otro porcentaje de tiempo excedente es:

$$A \times 0.012 \left[ P^{-0.546+0.043 \log_{10} P} \right]$$

$$\frac{A_{0.01}}{A_{0.01}}$$

Para latitudes menores a 30° (Norte o Sur), en el caso del enlace, la localización es Monterrey, NL, cuya latitud es 26°.

Donde P es el porcentaje de tiempo excedente:

$$P = 100 - \% \text{Disponibilidad}$$

De esta misma forma se pueden calcular las pérdidas en el trayecto por lluvias para cada uno de los enlaces de la red UANL.

Retomando los datos de cada enlace de la tabla 3, tenemos que:

ENLACE	Club Informática a Fac. Economía	Club Informática a Unidad Mederos	Club Informática a Biblioteca Magna	Club Informática a Fac Medicina
FRECUENCIA (GHz)	17.8925	18.59	21.3185	21.3185
DISTANCIA (L) DEL ENLACE(Km)	7.259	13.285	1.14	5.49
Polarizacion de las antenas	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
A effec.(dB)	36.13397	44.84718	20.14604	74.91591

Tabla 4.-Perdidas en el trayecto por lluvia para el resto de los sitios de la red UANL

NOTA: En esta tabla solo se muestran los resultados finales, es decir, los resultados del cálculo a donde se pretendía llegar.

### 4.1.2. Factores de mejora usando técnicas de diversidad.

En el capítulo 2 se mencionó que pueden utilizarse técnicas de diversidad para aumentar la probabilidad de que el enlace no sufra un corte en la transmisión.

Como técnicas de diversidad pueden utilizarse aquellos modos que permitan la transmisión de la información de forma independiente, como distintas frecuencias, polarizaciones, etc.

A continuación se presentan dos opciones de cómo mejorar los enlaces existentes aplicando técnicas de diversidad de espacio y diversidad de frecuencia:

#### 4.1.2.1. Diversidad de espacio:

Fórmula:

$$I_{SD} = (1.2 \times 10^{-3} f s^2 10^{CFM/10}) / D$$

Donde:

$f$ : Frecuencia en GHz

$s$ : Separación entre antenas (metros)

$D$ : Distancia entre estaciones (Km)

\*\*Recomendación práctica:  $s$  debe estar entre  $100\lambda$  y  $200\lambda$

$T_{SD}$ : Tiempo fuera de servicio con diversidad de espacio.

$$T_{SD} = T_{ND} / I_{SD}$$

$T_{ND}$ : Tiempo de indisponibilidad (ver ejemplo 3.3.2) sin diversidad de espacio

#### 4.1.2.2. Diversidad de frecuencia.

Fórmula:

$$I_{FD} = (80 \Delta f \times 10^{CFM/10}) / f^2 \times D$$

Donde:

$f$ : Frecuencia en GHz

$D$ : Distancia entre estaciones (Km)

$\Delta f = | \text{Frecuencia Original} - \text{Frecuencia Propuesta} |$ ,  $\Delta f$ : de 2 a 3% de la FREC. Original.

$$T_{FD} = T_{ND} / I_{FD}$$

#### EJEMPLO PRÁCTICO:

Tomando como ejemplo los valores previamente calculados para el enlace del Club Informática a la Facultad de Medicina, para el cálculo de diversidad de espacio, siguiendo la fórmula:

$$I_{SD} = (1.2 \times 10^{-3} f^2 s^2 10^{CFM/10}) / D$$

Considerando la recomendación para el valor de “s”, se ha seleccionado

$$s = 150\lambda = 2.11$$

Distancia = 5.492 Km

Frecuencia = 21.3185 GHz

Tenemos:

$$I_{SD} = (1.2 \times 10^{-3})(21.3185)(2.11)^2(10^{(40.53/10)})/5.492$$

$$I_{SD}=234.55$$

Ahora, calculamos el tiempo fuera de servicio anual aplicando la diversidad de espacio:

$$T_{SD} = T_{ND}/I_{SD}$$

$$T_{SD} = 2.03823297275501/234.55$$

$$T_{SD}=0.00869$$

$$T_{SD} = 0.00869 / (365 * 24 * 60 * 60) = 2.7548 \times 10^{-10} \text{ segundos al año}$$

Puede verse cierta mejoría al usar esta técnica si comparamos el valor de tiempo fuera de servicio original, es decir sin aplicar la diversidad de espacio el cual es de  $6.46 \times 10^{-8}$  seg. al año.

Aplicando ahora la técnica de diversidad de frecuencia:

$$I_{FD} = (80 \Delta f \times 10^{CFM/10}) / f^2 \times D$$

Seleccionando para  $\Delta f$ , 3% de la frecuencia original

$$\Delta f = 6.40 \times 10^8$$

$$I_{FD} = (80)(6.40 \times 10^8)(10^{(40.53/10)})(21.3185)^2 (5.492)$$

$$I_{FD}= 2.31655 \times 10^{-7}$$

Calculando el tiempo fuera de servicio anual aplicando la diversidad de frecuencia:

$$T_{FD} = T_{ND}/I_{FD}$$

$$T_{FD} = 2.03823297275501/2.31655 \times 10^{-7}$$

$$T_{FD} = 8.79615 \times 10^{-12}$$

$$T_{FD} = .00869 / (365 \times 24 \times 60 \times 60) = 2.7892 \times 10^{-19} \text{ segundos al año}$$

En este resultado puede verse como se reduce un poco más el tiempo fuera de servicio si aplicamos la técnica de diversidad de Frecuencias.

Si aplicamos estas mismas técnicas con los datos del resto de los enlaces, tenemos los siguientes resultados:

ENLACE	Club Informática a Fac. Economía	Club Informatica a Unidad Mederos	Club Informática a Biblioteca Magna	Club Informatica a Fac Medicina
FRECUENCIA (GHz)	17.8925	18.59	21.3185	21.3185
DISTANCIA (L) DEL ENLACE(Km)	7.259	13.285	1.14	5.49
TND SEG/AÑO	$4.569 \times 10^{-8}$	$2.283 \times 10^{-7}$	$1.854 \times 10^{-10}$	$6.461 \times 10^{-8}$
TSD SEG/AÑO	$7.875 \times 10^{-11}$	$5.871 \times 10^{-10}$	$5.257 \times 10^{-14}$	$2.754 \times 10^{-10}$
TFD SEG/AÑO	$7.972 \times 10^{-20}$	$5.944 \times 10^{-19}$	$5.322 \times 10^{-23}$	$2.789 \times 10^{-19}$

Tabla 5.-Tiempos de indisponibilidad aplicando técnicas de diversidad a cada enlace de la red.

En todos los enlaces se observan reducciones en el tiempo fuera de servicio al aplicar las técnicas de diversidad antes mencionadas. Aunque como ya se mencionó, la disponibilidad de la red en las condiciones actuales es muy buena, los resultados obtenidos en el presente trabajo se dejan a consideración de la dirección de Telecomunicaciones como posible opción de mejora en estos enlaces.



# BIBLIOGRAFIA

“MICROWAVE RADIO DESIGN GUIDE”

Trevor Manning

Ed. Artech House, Boston-London (1999)

“TÉCNICO EN TELECOMUNICACIONES”, Tomo II

Julián Espinoza de los Monteros

Óscar López Gómez

Santiago García

Ed. Cultural , S.A.

“TELECOMMUNICATIONS TRANSMISSION HAND BOOK”

Cuarta Edición (1998) Reger L. Freeman

Ed. John Wiley & Sons

“Manual Pathloss 4.0”

2000

DIRECCIONES ELECTRONICAS:

[http://cetitdh.tripod.com/los\\_espejos\\_de\\_fresnel.htm](http://cetitdh.tripod.com/los_espejos_de_fresnel.htm)

<http://www.monografias.com/trabajos12/comsat/comsat.shtml#ES>

[TRUCT](#)

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
1. Fenómeno de refracción	1
	5
2. Fenómeno de reflexión	1
	7
3. Fenómeno de difracción	1
	8
4. Relación Entre la trayectoria de los rayos sobre la tierra y el factor de corrección de radio de la tierra	3
	0
5. Antenas y repetidores	3
	3
6. Enlaces de Microondas de Línea de Vista	3
	4
7. Estaciones terminales	3
	5
8. Etapas de la sección de Radio frecuencia	3
	7
9. Antena Parabólica	4
	0

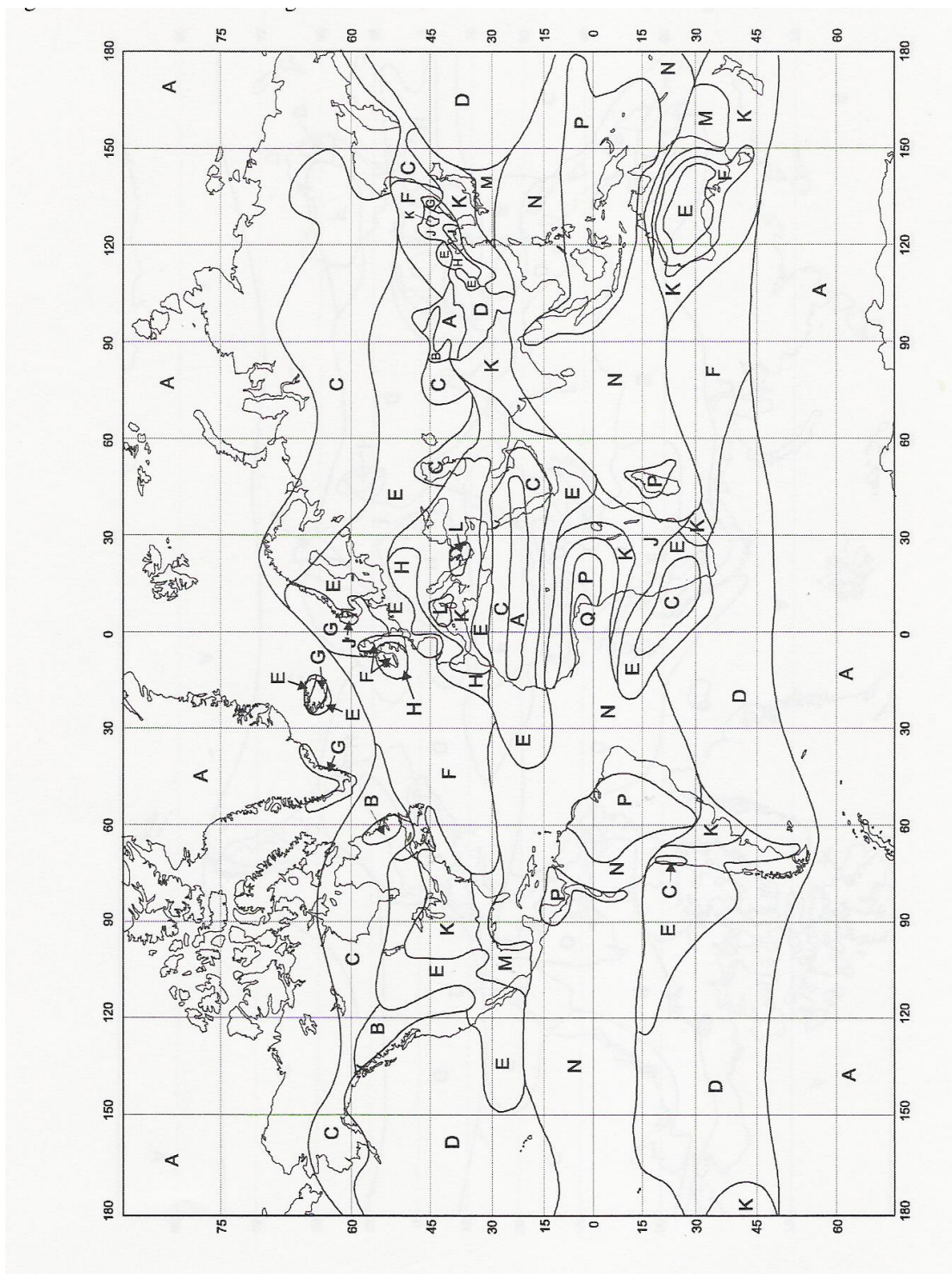
## INDICE DE TABLAS

	Pag.
1. Datos de los enlaces de la red de microondas de la U.A.N.L.	8

2. Sitios de la red y coordenadas	9
3. Resultados del análisis de cada enlace de la red UANL	2
4. Perdidas en el trayecto por lluvia para el resto de los sitios de la red UANL.	8
5. Tiempos de indisponibilidad aplicando técnicas de diversidad a cada enlace de la red.	2

# **APENDICES**

### APENDICE A : Mapas de Zonas de lluvia, ITU



**APENDICE B: Coeficientes de regresión para el cálculo de pérdidas por lluvia**

Frequency (GHz)	$\alpha_h$	$\alpha_v$	$\beta_h$	$\beta_v$
1.0	3.870e-05	3.520e-05	0.912	0.880
2.0	1.540e-04	1.380e-04	0.963	0.923
4.0	6.500e-04	5.910e-04	1.121	1.075
6.0	1.750e-03	1.550e-03	1.308	1.265
7.0	3.010e-03	2.650e-03	1.332	1.312
8.0	4.540e-03	3.950e-03	1.327	1.310
10.0	1.010e-02	8.870e-03	1.276	1.264
12.0	1.880e-02	1.680e-02	1.217	1.200
15.0	3.670e-02	3.350e-02	1.154	1.128
20.0	7.510e-02	6.910e-02	1.099	1.065
25.0	0.124	0.113	1.061	1.030
30.0	0.187	0.167	1.021	1.000
35.0	0.263	0.233	0.979	0.963
40.0	0.350	0.310	0.939	0.929
45.0	0.442	0.393	0.903	0.897
50.0	0.536	0.479	0.873	0.868
60.0	0.707	0.642	0.826	0.824
70.0	0.851	0.784	0.793	0.793
80.0	0.975	0.906	0.769	0.769
90.0	1.060	0.999	0.753	0.754
100.0	1.120	1.060	0.743	0.744

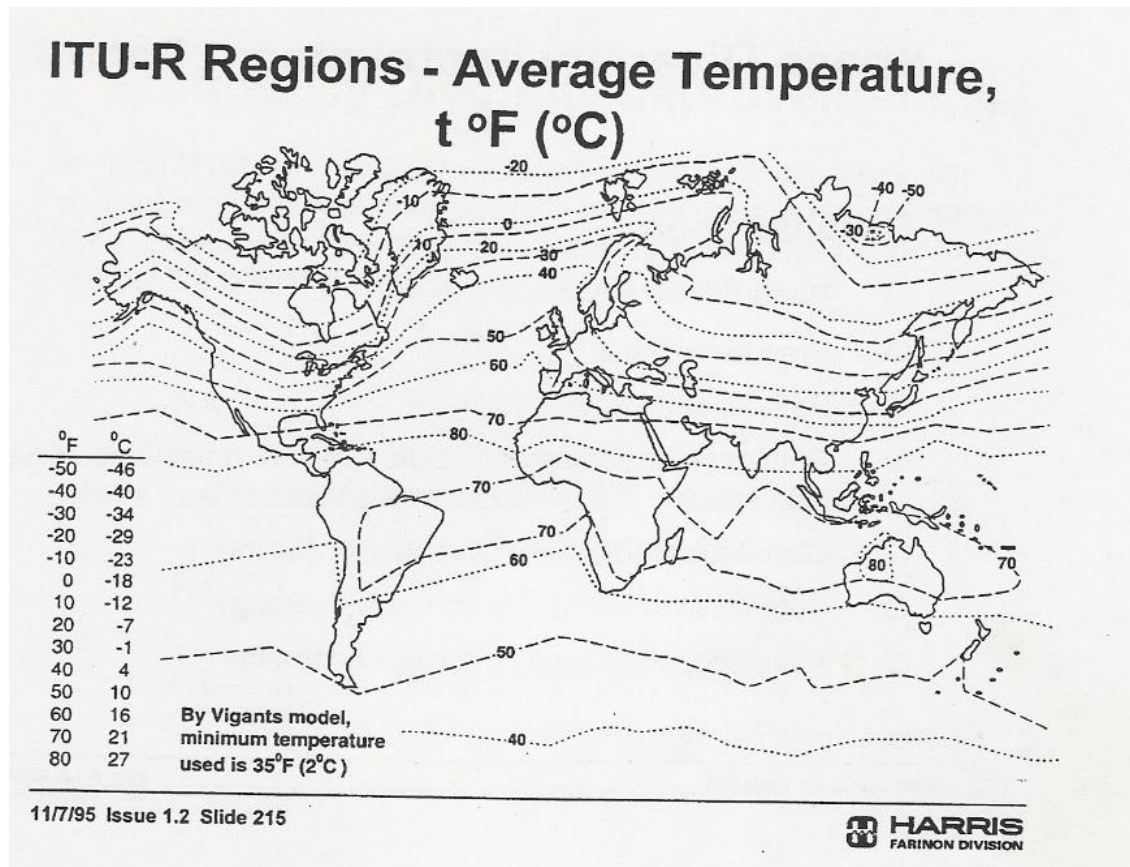
### APENDICE C: Tasa de lluvia por zonas geográficas

Percentage of Time (%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1.0	< 0.5	1	2	3	1	2	3	2	8	2	2	4	5	12	24
0.3	1	2	3	5	3	4	7	4	13	6	7	11	15	34	49
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

Source: Reference 9, Table I, ITU-R Rec. PN.837-1.

NOTA: Ver apéndice A para identificar la zona geográfica por su letra

### APENDICE D: Mapa de zonas de temperatura



# AUTOBIOGRAFIA

Nombre: Rafaela del Pilar Cabrera Alvarez

Nacida en Cd. Victoria, Tamaulipas, el 22 de ,Marzo de 1977. Terminé mis estudios de Licenciatura en el Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, en la carrera de Ingeniería Electrónica con especialidad en Instrumentación y control.

Mis padres:

Dr. José Manuel Cabrera Sanpedro.

Sra. Celia Guadalupe Alvarez Martínez.

En el inicio de mi carrera profesional, trabajé por espacio de casi tres años (Sep-1999-Ago-2002), en la empresa “Kemet Electronics” en el area de calidad como Supervisora. Después en Monterrey Nuevo León, en la empresa “Sanyo” como Ing. de Calidad, de Diciembre del 2002 a Marzo de 2004. Posteriormente en la compañía “Elcoteq” de Marzo del 2004 a Febrero del 2005, estas dos últimas compañías del ramo electrónico, y la ultima, específicamente de manufactura de tarjetas para equipo de Telecomunicaciones. Actualmente trabajo en “OSRAM S.A. de C.V.”, empresa dedicada al ramo de la iluminación. Todos los puestos en los que he trabajado han sido como Ingeniero de Calidad.

Empecé mis estudios de Posgrado en la Universidad Autónoma de Nuevo León en la Maestría en ciencias de la Ingeniería con especialidad en Telecomunicaciones, siendo este el grado que espero obtener con la tesis “EVALUACION DE LOS ENLACES ACTUALES DE MICROONDAS EN LA UANL PARA SU OPTIMIZACIÓN”.