

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS ATENUACIÓN Y DESVANECIMIENTO DE SEÑALES RADIOELÉCTRICAS PROPAGADAS EN LA BANDA Ka.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Freddy Brito Maestre

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Agra B., Eduardo
para optar al Título de Ingeniero Electricista

Caracas, 2005

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 06 de junio de 2005

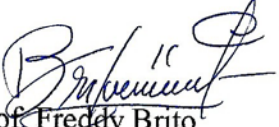
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Eduardo Agra B., titulado:

**“SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS
ATENUACIÓN Y DESVANECIMIENTO DE SEÑALES
RADIOELÉCTRICAS PROPAGADAS EN LA BANDA Ka.”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Comunicaciones, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Francisco Varela
Jurado


Prof. Luis Fernández
Jurado


Prof. Freddy Brito
Prof. Guía

A Eduardo Agra Martínez, mi hijo,
Quien me ha impulsado estos últimos años.

AGRADECIMIENTOS

A *Armiris Martínez*, mi esposa, quien lleva muchos años a mi lado brindándome su apoyo incondicional. A mis padres *Eduardo* e *Isaura*, quienes me brindaron una excelente formación. A mi tutor el *Prof. Freddy Brito*, por su adecuada orientación, disciplina y alta instrucción académica. Un reconocimiento especial a la *Ing. Cecilia Gómez* por su valiosa asesoría, quien siempre impregno este proyecto de animo y positivismo.

A los profesores de la escuela: *Prof. Francisco Varela* y el *Prof. Luis Fernández* por su ayuda y experticia. Al *Ing. Domingo Ramírez* de National Instruments, al *Ing. Andrés Parra* de Conatel, a la *Prof. Cristina Santamaría* de la Universidad Pontificia Bolivariana (Colombia) y al *Ing. Paul McKenna* del Institute for Telecommunication Sciences (U.S.A), por su atención oportuna.

A mis compañeros: Alfredo Freites, Luis Cárdenas, Albert Chávez, Tony Rodríguez, Ronald Grimaldo, José Czwienczek, Servando Álvarez, Daniel Pérez, José Varela, Angélica López, Felipe Sanhueza, Carlos Veroes, Gustavo Olivero, Yamileth Meléndez y a todos aquellos que de alguna manera participaron conmigo en esta actividad.

Agra B., Eduardo.

**SISTEMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS
ATENUACIÓN Y DESVANECIMIENTO DE SEÑALES
RADIOELÉCTRICAS PROPAGADAS EN LA BANDA Ka.**

Tutor Académico: Freddy Brito. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Comunicaciones.

Institución: Escuela de Ingeniería Eléctrica U.C.V. 2005. 98h. + anexos.

Palabras Claves: Atenuación, Desvanecimiento, Microondas, Banda Ka, Modelos de predicción.

Resumen. Se plantea el desarrollo de un sistema para la caracterización de los parámetros atenuación y desvanecimiento de señales radioeléctricas propagadas en la banda Ka. Para tal fin, se realiza el estudio de modelos de predicción sobre las pérdidas de potencia en ondas milimétricas. Estos modelos de predicción considerados, son los establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y el Institute for Telecommunication Science (ITS). Haciendo uso de la herramienta computacional *LabVIEW 7 Express de NATIONAL INSTRUMENTS*, se desarrollan los software: **SimuladorKa.exe** e **ITM.exe**, los cuales son simuladores de predicción de atenuaciones que se basan en los modelos antes mencionados. También se realiza la aplicación: **TiempoReal.exe**, la cual es una interfaz de usuario de software capaz de caracterizar la potencia de un radioenlace en la banda Ka en tiempo real, las condiciones ambientales existentes de forma simultanea, y además adquirir los datos de interés. Adicionalmente, se incorpora un ejemplo demostrativo sobre el uso de los simuladores para una implementación de un radioenlace en la banda Ka, entre la E.I.E. y una ubicación en el cerro el Ávila.

INDICE GENERAL

	Pág.
- CONSTANCIA DE APROBACIÓN	ii
- DEDICATORIA	iii
- AGRADECIMIENTOS	iv
- HOJA DE RESUMEN	v
- LISTA DE FIGURAS Y TABLAS	viii
- LISTA DE ACRONIMOS Y SIGLAS	ix
- INTRODUCCIÓN	10
- CAPITULO I	12
1. PRELIMINARES.....	12
1.1 Planteamiento y justificación.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Alcances.....	14
- CAPITULO II	15
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 Pérdidas en la propagación.....	15
2.1.1 Comunicación vía microondas.....	15
2.1.2 Atenuación en el espacio libre de enlaces punto a punto.....	17
2.1.3 Atenuación debida a los gases atmosféricos.....	18
2.1.4 Atenuación debida a la nubosidad.....	26
2.1.5 Atenuación debida a la lluvia.....	33
2.1.6 Recepción.....	40
2.2 Modelo de Terreno Irregular (Longley - Rice).....	41
2.2.1 Parámetros generales de entrada.....	42
2.2.2 Atenuación de referencia.....	48
2.2.3 Coeficientes para el rango de difracción.....	49

2.2.4	Coefficientes para el rango de línea de vista.....	53
2.2.5	Variabilidad – los cuantiles de la atenuación.....	59
2.2.6	Variabilidad del tiempo.....	61
2.2.7	Variabilidad de la situación.....	64
- CAPITULO III	.....	65
3.	DESARROLLO DE LAS APLICACIONES.....	65
3.1	Acerca de LabVIEW.....	65
3.2	Simulador para la caracterización de los parámetros atenuación y desvanecimiento de señales radioeléctricas propagadas en la banda Ka. (Basado en la Unión Internacional de Telecomunicaciones).....	68
3.3	Simulador ITM del Modelo de Terreno Irregular (Basado en el Institute for Telecommunication Science ITS).....	80
3.4	Interfaz de usuario de software y adquisición de datos.....	82
-CAPITULO IV	.....	87
4.	EJEMPLO DE LA APLICACIÓN DE LOS SIMULADORES PARA LA PREDICCIÓN.....	87
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	95
- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	.....	97
- ANEXOS	.....	99

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

	Pág.
FIGURA 1. Los elementos de un sistema de comunicación vía microondas.....	16
FIGURA 2. Atenuación específica debida a los gases atmosféricos.....	23
FIGURA 3. Atenuación específica de las pequeñas gotas de agua a diversas temperaturas en función de la frecuencia.....	29
FIGURA 4. Atenuación específica (dB/Km) debida a las precipitaciones para diferentes valores de intensidad en mm/h.....	39
FIGURA 5. Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de DATOS.....	69
FIGURA 6. Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de RESULTADOS.....	72
FIGURA 7. Representación de las variaciones de los niveles de potencia de recepción ante un evento de lluvia.....	73
FIGURA 8. Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de Ael/PRx.....	74
FIGURA 9. Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de OXIGENO.....	75
FIGURA 10. Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de VAPOR DE AGUA.....	76
FIGURA 11. Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de NUBOSIDAD.....	77
FIGURA 12. Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de LLUVIA.....	78
FIGURA 13. Ambiente de ITM.exe.....	80
FIGURA 14. Carpeta de almacenamiento de los archivos generados.....	83
FIGURA 15. Contenido de los archivos generados.....	84
FIGURA 16. Ambiente de TiempoReal.exe.....	85
FIGURA 17. Mensaje de confirmación para detener la ejecución de TiempoReal.exe.....	86
FIGURA 18. Representación de un enlace de microondas, perfil E.I.E.-Ávila.....	87
FIGURA 19. Representación del perfil en la zona de reflexión.....	90
FIGURA 20. Ejemplo de SimuladorKa.exe pestaña de DATOS.....	91
FIGURA 21. Ejemplo de SimuladorKa.exe pestaña de RESULTADOS.....	92
FIGURA 22. Ejemplo de ITM.exe.....	93

TABLA 1. Valores de L (Kg/m^2), para distintos porcentajes de indisponibilidad para Caracas.....	32
TABLA 2. Coeficientes de regresión para estimar el valor de la atenuación específica de la ecuación (19).....	37
TABLA 3. Valores típicos para ϵ_r y σ	46
TABLA 4. Puntos de elevación del perfil en la zona de reflexión.....	89

LISTA DE ACRONIMOS Y SIGLAS

UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones.
ITS	Institute for Telecommunication Sciences.
UCV	Universidad Central de Venezuela.
EIE	Escuela de Ingeniería Eléctrica.
VHF	Very Hight Frequency.
UHF	Ultra Hight Frequency.
SHF	Super Hight Frequency.
ITM	Irregular Terrain Model.
LMDS	Local Multipoint Distribution Service.
VI	Virtual Instrument.

INTRODUCCIÓN

En décadas anteriores se realizaron experimentos de comunicación móvil con frecuencias VHF, aproximadamente a 50 MHz. Los resultados de estas pruebas revelaron un ambiente de propagación muy hostil, particularmente en centros urbanos. Sin embargo, mediante la investigación se fueron superando los inconvenientes hasta obtener enlaces de optima calidad. Posteriormente, se fue desarrollando tecnología en frecuencias cada vez mayores, a saber, UHF y SHF en las bandas S (2-4 GHz), C (4-8 GHz), X (8-12 GHz) y Ku (12-18 GHz). Ahora, con el pasar del tiempo estas banda de frecuencias se encuentran con el problema de la saturación del espectro. Es por eso que los ingenieros están investigando el campo de frecuencias más elevadas. Tal es el caso de la banda de frecuencias denominada banda Ka, la cual abarca desde los 18 GHz hasta los 40 GHz.

La transmisión de la onda milimétrica a través de la atmósfera es adversamente mas afectada por propiedades de propagación que las centímetros. Estas propiedades son la absorción y dispersión de la onda que está siendo transmitida a través de la atmósfera. Es el resultado de este fenómeno la principal razón por la cual los ingenieros procuran evitar la utilización de estas frecuencias para la comunicación punto-punto, ya que tendrán que prestar mayor atención a la atenuación de la señal debido a los factores hidrometeorologicos, además de requerir de equipos más caros de fabricación foránea, ya que la mayor producción de componentes para radioenlaces se encuentra en frecuencias menores a los 20GHz.

Los fenómenos hidrometeorológicos afectan directamente el comportamiento de las señales de frecuencias elevadas, esto es porque las moléculas de agua absorben parte de la energía de la señal produciendo un efecto de degradación conocido como desvanecimiento por lluvia (rain fading). Tenemos que recordar que cuando una onda electromagnética incidente pasa a través de un objeto el cual posee propiedades

dieléctricas diferentes del medio circundante, alguna energía es absorbida excitando el material absorbente y alguna dispersada.

A pesar de estas desventajas, la transmisión de ondas milimétricas han dado una segunda impresión en los últimos años por varias razones. Probablemente la principal razón es el aumento del congestionamiento en las bandas de ondas centímetros en ciertas áreas del mundo. Otra consideración es la necesidad de anchos de bandas mayores para transmisión digital. El tercer factor es el desarrollo de equipos, muchos de estos como el resultado de la investigación militar y de tecnología.

La porción del espectro de ondas milimétricas promete bastante para el uso de técnicas de transmisión digital, utilizando las ventajas que esta porción provee. Esta llegando a ser una región extensamente abierta para su desarrollo, que provee grandes anchos de banda. Permite a los transmisores enviar más información por segundo. También puede contarse con un amplio espectro disponible, ya que estas bandas de frecuencias se encuentran con poca demanda en la actualidad.

El presente proyecto pretende desarrollar un sistema para la caracterización de los parámetros atenuación y desvanecimiento de señales radioeléctricas propagadas en la banda Ka, con el fin de disponer de mayor información práctica en el momento.

CAPITULO I

1) Preliminares

1.1) Planteamiento y justificación

El desarrollo de la transmisión de ondas milimétricas, ha alcanzado en la actualidad un punto equivalente al desarrollo de la transmisión de ondas centímetros a finales de los 1940's, cuando esta porción del espectro fue abierta para su uso en transmisiones punto a punto. En tal sentido, la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V. dando continuidad a una línea de investigación, se está abocando al estudio de esta banda de frecuencias del espectro radioeléctrico, conocida como la banda Ka. No se tiene conocimiento de alguna investigación e implementación de radioenlaces en esta banda por parte de alguna institución *académica* del país, por lo tanto, sería la E.I.E. pionera en la utilización de esta banda, antes considerada “problemática”, y ahora tan primordial para la Ingeniería de Telecomunicaciones.

El desarrollo de software para la simulación e interfaz de usuario, mediante el uso de una herramienta computacional, que caractericen como se afecta la potencia de una señal en la banda Ka durante la propagación, sustentará notablemente la investigación sobre esta banda de frecuencias, sus principales características, comportamiento, principales factores de afectación, tecnologías, etc.

1.2) Objetivos

1.2.1) Objetivo general

Desarrollar un sistema para la caracterización de los parámetros atenuación y desvanecimiento de señales radioeléctricas propagadas en la banda Ka, mediante la utilización de una herramienta computacional, permitiendo la simulación y la adquisición de datos en tiempo real.

1.2.2) Objetivos específicos

- Desarrollar e implementar un simulador basado en el método de predicción de la **UIT**, en el software *LabVIEW 7 Express de NATIONAL INSTRUMENTS*, que permita cuantificar las pérdidas de potencia de señales luego de la propagación, considerando como principales factores de afectación los fenómenos meteorológicos: Vapor de agua (H_2O), Oxígeno (O_2), Lluvia y Nubosidad. Además, distancia del enlace (Km), alturas de las antenas (m.s.n.m), polarización de las antenas, temperatura (°C) y presión atmosférica (hPa).

- Desarrollar e implementar un simulador basado en el método de predicción de la **ITS**, en el software *LabVIEW 7 Express de NATIONAL INSTRUMENTS*, que permita cuantificar las pérdidas de potencia de señales debido al terreno y la variabilidad, considerando como principales factores de afectación: distancia del enlace (Km), alturas de las antenas estructurales (m), parámetro de irregularidad del terreno (m), factor K (radio efectivo de la tierra), permitividad relativa, conductividad (siemens), polarización de las antenas y confianza y disponibilidad deseadas.

- Desarrollar e implementar una interfaz de usuario de software en *LabVIEW 7 Express de NATIONAL INSTRUMENTS*, que permita visualizar en tiempo real el comportamiento de la Potencia de Recepción de un enlace de microondas en

la banda Ka, así como los diferentes fenómenos meteorológicos que le afectan, y que permita realizar la adquisición de estos datos durante un periodo indefinido de tiempo.

1.3) Alcances:

Para el desarrollo de este proyecto se considerarán los siguientes aspectos:

- Radioenlaces cuya **propagación** es punto a punto con **visibilidad directa**, es decir, propagación entre dos puntos, en la que el primer elipsoide de Fresnel está suficientemente exento de obstáculos para que **la difracción tenga un efecto despreciable**. [1]
- La banda de frecuencias es desde **18GHz** hasta **40GHz**, designada frecuentemente por el símbolo K_a . [2]
- Las ondas transmitidas en la banda denominada K_a , serán llamadas milimétricas. Cuyas longitudes de onda abarcan desde **16mm** (18 GHz) hasta **7.5mm** (40 GHz). [3]
- Los efectos sobre la señal serán en los parámetros **atenuación** y **desvanecimiento** durante la propagación, es decir, la reducción de la **intensidad** de la señal, la disminución progresiva de la potencia conforme aumenta la distancia. Estos parámetros **NO** se manifiestan como alteraciones de la **forma** de la señal. [4]

CAPITULO II

2) Marco teórico

2.1) Pérdidas en la propagación

2.1.1) Comunicación vía microondas

Definimos **comunicación** como el proceso por medio del cual la información se transfiere de un punto llamado la **fuerza**, en espacio y tiempo, a otro punto que es el **destino**. El mensaje producido por una fuente no es eléctrico, por lo tanto, es necesario un **transductor de entrada** que convierta el mensaje en una **señal**, una magnitud eléctrica, tal como un voltaje o una corriente. Esta señal posee características propias y variables, dependientes de ciertas condiciones. Esta se puede caracterizar, determinando sus atributos peculiares, de modo que claramente se distinga de las demás. Según la UIT, “señal” se define: “Fenómeno físico, en el cual una o varias de sus características pueden variar para representar información”. [5]

Básicamente un enlace vía microondas consiste en tres componentes fundamentales: el transmisor, el receptor y el canal de transmisión que es donde ocurre la propagación.

El **transmisor** pasa el mensaje al canal en forma de señal. Para lograr una transmisión eficiente y efectiva, se deben desarrollar varias operaciones de procesamiento de la señal. La más común e importante de estas operaciones es la **modulación**, un proceso que se distingue por el acoplamiento de la señal transmitida a las propiedades del canal, por medio de una onda portadora.

En el **canal de transmisión** es donde se dará mayor atención para el desarrollo de este proyecto, ya que es en este puente de unión entre la fuente y el destino, donde se produce la **propagación de la señal**. El medio es la atmósfera, donde viaja una

onda de radio entre el transmisor y el receptor, la cual se caracteriza por sufrir **atenuación**. Esta atenuación es causada por variables intrínsecas del sistema las cuales son: la distancia, la frecuencia, reflexión y refracción debido a obstáculos y superficies reflectoras y a pérdidas atmosféricas. 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 estar libre de obstáculos.

El **receptor** extrae del canal la señal deseada y la entrega al transductor de salida. Como las señales son frecuentemente muy débiles debido a la atenuación, el receptor debe tener varias etapas de amplificación. La operación clave que ejecuta el receptor es la **demodulación**, el caso inverso del proceso de modulación del transmisor, con lo cual vuelve la señal a su forma original.

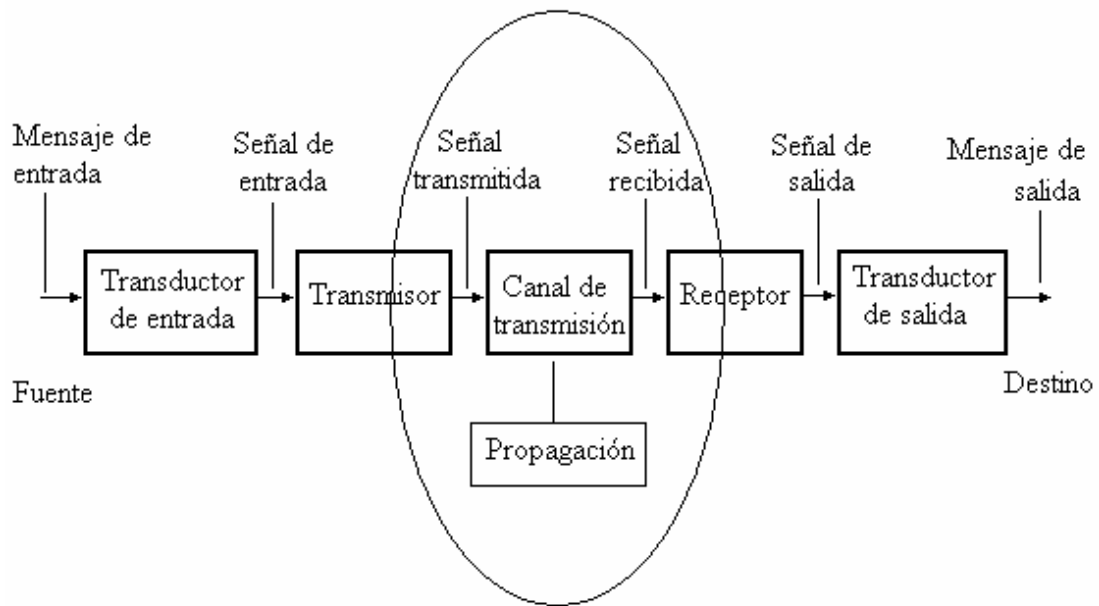


FIGURA No.1 Los elementos de un sistema de comunicación vía microondas

[4]

2.1.2) Atenuación en el espacio libre de enlaces punto a punto

La propagación en el espacio libre es fundamental en la transmisión de ondas radioeléctricas. Se refiere a la propagación de una onda electromagnética en un medio dieléctrico ideal homogéneo que se puede considerar infinito en todas las direcciones [1]. Cuando se trata de un enlace punto a punto, es preferible calcular la atenuación en el espacio libre entre antenas isótropas, denominada también pérdida básica de transmisión en el espacio libre, de la siguiente manera:

$$L_{bf} = 20 \cdot \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ dB} \quad [6] \quad (1)$$

donde:

L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)

d : distancia

λ : longitud de onda

d y λ se expresan en las mismas unidades.

La ecuación (1) puede también escribirse en función de la frecuencia en vez de la longitud de onda:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \text{ dB} \quad (2)$$

donde:

f : frecuencia (MHz)

d : distancia (Km)

$$L_{bf} = 92,45 + 20 \log f + 20 \log d \text{ dB} \quad (3)$$

donde:

f : frecuencia (GHz)

d : distancia (Km)

Para la transmisión de ondas milimétricas a través de la atmósfera, el problema toma en consideración mayores complejidades con respecto a la transmisión de ondas a frecuencias menores. Existen métodos de predicción para los efectos vinculados con la propagación, basados en las condiciones climáticas y topográficas, y debe tenerse en cuenta en la mayoría de los enlaces fijos con visibilidad directa que consideran únicamente los efectos sobre la señal deseada. Entonces, la pérdida de propagación para un trayecto con visibilidad directa, en ondas milimétricas considera las contribuciones siguientes:

- atenuación debida a los gases atmosféricos.
- atenuación debida a la nubosidad.
- atenuación debida a las precipitaciones.

Cada una de estas contribuciones tienen sus características propias en función de la frecuencia, la longitud del trayecto y la ubicación geográfica, y se describen en los puntos siguientes:

2.1.3) Atenuación debida a los gases atmosféricos

Los gases que componen la atmósfera se elevan desde la superficie del planeta hasta alcanzar unos 1.000 Km de altura a partir de la cual los investigadores consideran que los gases escapan de la atracción de la fuerza de la gravedad ejercida por la Tierra.

Sin embargo, hay que tener presente que los gases no se distribuyen de manera uniforme, pues la densidad disminuye al aumentar la altura y se concentra en las capas más bajas.

Para frecuencias superiores a los 10 GHz siempre está presente una cierta atenuación debida a la absorción del oxígeno y del vapor de agua, por lo tanto, se

debe evaluar la atenuación causada por los gases atmosféricos en trayectos e incluirse en el cálculo de la pérdida total de propagación.

Gases atmosféricos tales como: Oxido Nitroso (N_2O), Dióxido de Azufre (SO_2), Ozono (O_3), Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Amoníaco (NH_3) muestran también líneas resonantes, sin embargo, debido a que poseen una baja densidad en la atmósfera, su efecto sobre la propagación se considera despreciable. Por ejemplo, la atenuación inducida por la presión del nitrógeno se manifiesta por encima de 100 GHz¹.

Las atenuaciones específicas debidas al oxígeno (aire seco) y al vapor de agua, y consideradas a partir del nivel del mar hasta una altura de 5 Km, pueden estimarse utilizando los siguientes algoritmos:

En el caso del **oxígeno**, la atenuación γ_o (dB/Km) viene dada por la ecuación (4) de acuerdo con la referencia [7]:

$$\gamma_o = \left[\frac{7.34 r_p^2 r_t^3}{f^2 + 0.36 r_p^2 r_t^2} + \frac{0.3429 b(\gamma'_o(54))}{(54 - f)^a + b} \right] f^2 \times 10^{-3} \quad (4)$$

siendo:

$$a = \frac{\ln\left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right)}{\ln 3.5}$$

¹ Freeman, Roger L. *Telecommunication Transmisión Handbook*. New York. A Wiley – Interscience Publication. Pag. 433

$$b = \frac{4^a}{\eta_1}$$

$$\eta_1 = 6.7665 r_p^{-0.5050} r_t^{0.5106} e^{[1.5663(1-r_t)]} - 1$$

$$\eta_2 = 27.8843 r_p^{-0.4908} r_t^{0.8491} e^{[0.5496(1-r_t)]} - 1$$

$$\gamma'_o(54) = 2.128 r_p^{1.4954} r_t^{-1.6032} e^{[-2.5280(1-r_t)]}$$

$$r_p = \frac{p}{1013}$$

$$r_t = \frac{288}{273 + t}$$

donde:

f : frecuencia (GHz)

p : presión (hPa)

t : temperatura (°C)

En el caso del *vapor de agua*, la atenuación γ_w (dB/Km) viene dada por la ecuación (5) de acuerdo con la referencia [7]:

$$\gamma_w = \left\{ r_t^{2.5} \left[\begin{aligned} & 3.13 \times 10^{-2} r_p r_t^2 + 1.76 \times 10^{-3} \rho r_t^{8.5} + \\ & \frac{3.84 \xi_{w1} g_{22} e^{(2.23(1-r_t))}}{(f - 22.235)^2 + 9.42 \xi_{w1}^2} + \frac{10.48 \xi_{w2} e^{(0.7(1-r_t))}}{(f - 183.31)^2 + 9.48 \xi_{w2}^2} + \\ & \frac{0.078 \xi_{w3} e^{(6.4385(1-r_t))}}{(f - 321.226)^2 + 6.29 \xi_{w3}^2} + \frac{3.76 \xi_{w4} e^{(1.6(1-r_t))}}{(f - 325.153)^2 + 9.22 \xi_{w4}^2} + \\ & \frac{26.36 \xi_{w5} e^{(1.09(1-r_t))}}{(f - 380)^2} + \frac{17.87 \xi_{w5} e^{(1.46(1-r_t))}}{(f - 448)^2} + \\ & \frac{883.7 \xi_{w5} g_{557} e^{(0.17(1-r_t))}}{(f - 557)^2} + \frac{302.6 \xi_{w5} g_{752} e^{(0.41(1-r_t))}}{(f - 752)^2} \end{aligned} \right] \right\} f^2 \rho \times 10^{-4} \quad (5)$$

siendo:

$$\xi_{w1} = 0.9544 r_p r_t^{0.69} + 0.0061 \rho$$

$$\xi_{w2} = 0.95 r_p r_t^{0.64} + 0.0067 \rho$$

$$\xi_{w3} = 0.9561 r_p r_t^{0.67} + 0.0059 \rho$$

$$\xi_{w4} = 0.9543 r_p r_t^{0.68} + 0.0061 \rho$$

$$\xi_{w5} = 0.955 r_p r_t^{0.68} + 0.006 \rho$$

$$g_{22} = 1 + \left[\frac{(f - 22.235)^2}{(f + 22.235)^2} \right]$$

$$g_{557} = 1 + \left[\frac{(f - 557)^2}{(f + 557)^2} \right]$$

$$g_{752} = 1 + \left[\frac{(f - 752)^2}{(f + 752)^2} \right]$$

donde ρ es la densidad de vapor de agua (g/m^3).

La atenuación específica debida al oxígeno y al vapor de agua puede evaluarse con gran exactitud para cualquier valor de presión, temperatura y humedad. Para ello se suman cada una de sus curvas de resonancia.

En las proximidades de los 60 GHz existen muchas curvas de absorción del oxígeno que se fusionan a presiones correspondientes al nivel del mar, para formar una sola banda ancha de absorción, asimismo, también existen curvas individuales obtenidas a presiones inferiores como es el caso en 119 GHz. También para el vapor de agua a 22GHz y 183 GHz.

Por otro lado, existen las llamadas *ventanas* o aberturas en algunas bandas de radiofrecuencia que son sugeridas para servicio punto a punto. Tres de estas ventanas son las siguientes: (28-42), (75-95), (125-140) **GHz**. Por lo tanto, la banda Ka, incluye la primera ventana de servicio.

Estos puntos con su correspondiente atenuación específica se muestran en la figura No. 2, dadas por la UIT a valores típicos de Presión: 1013 hPa, Temperatura: 15°C, Vapor de agua: $7.5 g/m^3$.

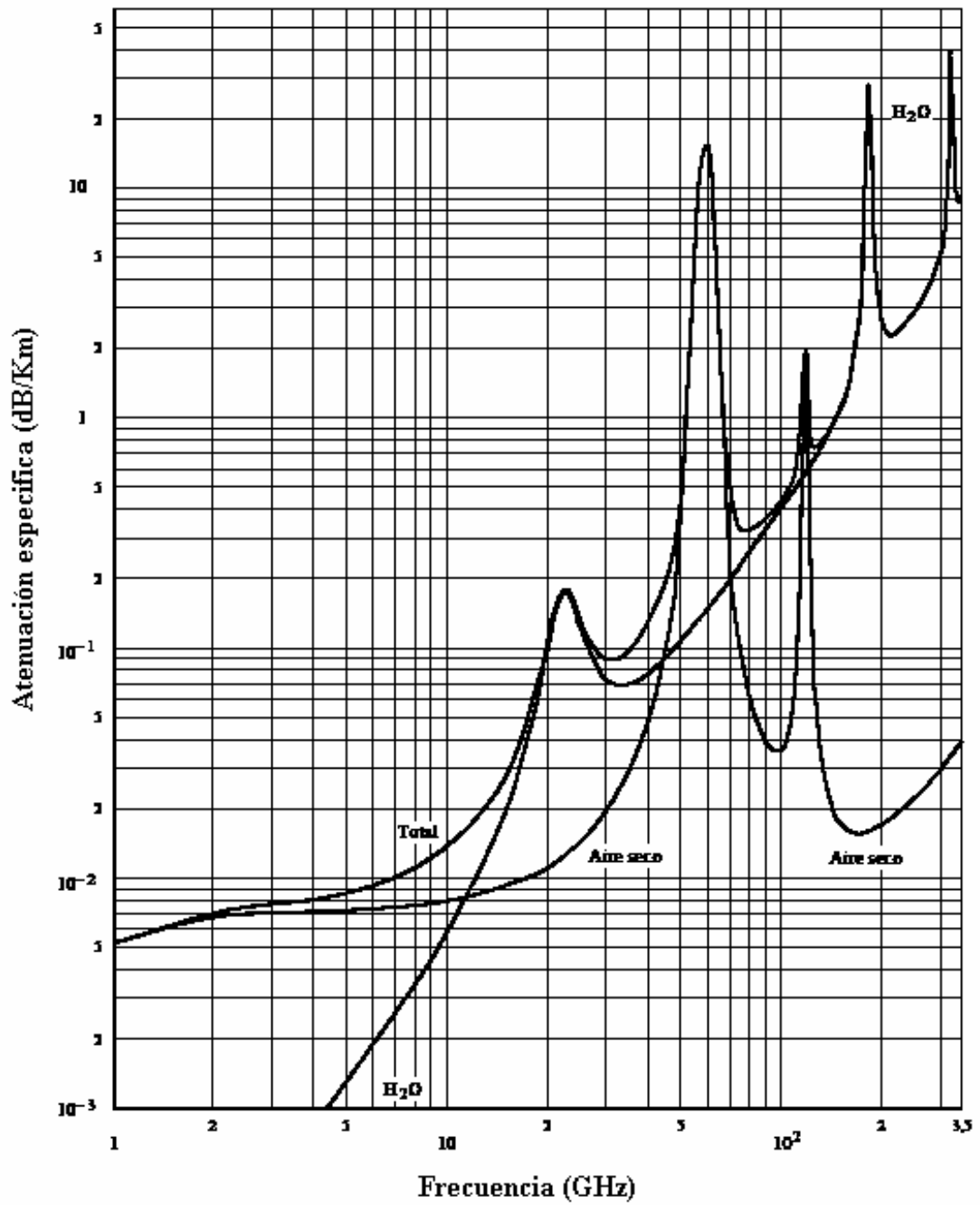


FIGURA No.2 Atenuación específica debida a los gases atmosféricos

En un **trayecto horizontal** o ligeramente inclinado y próximo al suelo (para un ángulo de elevación “ φ ”comprendida entre 0° y 5°), la atenuación en el trayecto A , puede escribirse como sigue:

$$A = \gamma.ro=(\gamma_o+\gamma_w).ro \quad \mathbf{dB} \quad (6)$$

donde ro es la longitud del trayecto (Km).

Para conocer los valores de la atenuación sobre un **trayecto oblicuo** (para un ángulo de elevación comprendida entre 5° y 90°) entre una estación situada a una altitud h_1 y otra a una altitud mayor h_2 , por encima del nivel medio del mar, la atenuación en el trayecto se obtiene mediante la ley de la cosecante como sigue:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\text{sen}\varphi} \quad \mathbf{dB} \quad (7)$$

donde:

$$A_o = h'_o \gamma_o$$

$$A_w = h'_w \gamma_w$$

$$h_o = 5.386 - 3.32734 \times 10^{-2} f + 1.87185 \times 10^{-3} f^2 - 3.52087 \times 10^{-5} f^3 + \frac{83.26}{(f - 60)^2 + 1.2}$$

$$h_w = 1.65 \left\{ 1 + \frac{1.61}{(f - 22.23)^2 + 2.91} + \frac{3.33}{(f - 183.3)^2 + 4.58} + \frac{1.90}{(f - 325.1)^2 + 3.34} \right\}$$

$$h'_o = h_o \left[e^{\frac{-h_1}{h_o}} - e^{\frac{-h_2}{h_o}} \right]$$

$$h'_w = h_w \left[e^{\frac{-h_1}{h_w}} - e^{\frac{-h_2}{h_w}} \right]$$

donde: h_o, h'_o, h_w, h'_w se expresan en Km. [7]

El vapor de agua y el oxígeno de la atmósfera producen la absorción de las ondas milimétricas, especialmente en la región de las curvas de absorción. La densidad del oxígeno atmosférico es relativamente constante, mientras que la del vapor de agua varía tanto con la posición geográfica como con el tiempo. Para calcular los efectos de la atenuación producida por este gas, se necesita información sobre la densidad del vapor de agua en la superficie.

Para obtener los valores de la densidad de vapor de agua en la superficie, ρ en g/m^3 , y en un emplazamiento determinado se utilizan los ficheros de datos mencionados a continuación, donde:

MOWIN.TXT - Valor de densidad de vapor de agua superficial (g/m^3) para Diciembre, Enero, Febrero.

MOSPR.TXT - Valor de densidad de vapor de agua superficial (g/m^3) para Marzo, Abril, Mayo.

MOSUM.TXT - Valor de densidad de vapor de agua superficial (g/m^3) para Junio, Julio, Agosto.

MOAUT.TXT - Valor de densidad de vapor de agua superficial (g/m^3) para Septiembre, Octubre, Noviembre.

y los ficheros de datos *MOLAT.TXT* y *MOLON.TXT* que contienen la latitud y la longitud de cada una de las entradas de datos de los otros ficheros.

Estos ficheros de datos son publicados por la **UIT-R** y se encuentran a disposición del usuario en su sitio Internet². Los datos abarcan desde 0° a 360° en longitud y desde +90° a -90° en latitud, con una separación de 1° en ambas.

[8]

Para el caso que nos ocupa y como ilustración obtendremos el valor de densidad de vapor de agua en la superficie para la **región capital (Caracas)**, donde las coordenadas de la ciudad son el paralelo 10 latitud norte y entre 66° y 67° longitud oeste. Se toma como referencia la siguiente coordenada geográfica: **10.5° Latitud Norte, 66.5° Longitud Oeste.**

ρ para Diciembre, Enero, Febrero = 15.354457 (g / m³)

ρ para Marzo, Abril, Mayo = 17.952264 (g / m³)

ρ para Junio, Julio, Agosto = 23.624318 (g / m³)

ρ para Septiembre, Octubre, Noviembre = 20.111256 (g / m³)

2.1.4) Atenuación debida a la nubosidad

La atenuación debida a las nubes es un factor importante, especialmente para los sistemas de microondas que funcionan en frecuencias superiores a 10 GHz o para los sistemas de baja disponibilidad.

² [www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/rec836/Surface%20data%20\(seasonal%20average\)](http://www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/rec836/Surface%20data%20(seasonal%20average))

Para las nubes y la niebla compuestas totalmente de gotas minúsculas, generalmente inferiores a 0.01 cm, la aproximación de Rayleigh [9] es válida para frecuencias inferiores a 200 GHz y se puede expresar la atenuación en términos del contenido total de agua líquida por unidad de volumen. Así pues, la atenuación específica en el interior de una nube o de la niebla puede expresarse como:

$$\gamma_c = Kl M \quad \text{dB/Km} \quad (8)$$

siendo:

γ_c : atenuación específica (dB / Km) en la nube

Kl : coeficiente de la atenuación específica ((dB / Km)/(g / m³))

M : densidad de agua líquida en la nube o la niebla (g / m³)

La densidad de agua líquida es típicamente de unos 0.05 (g / m³) a 0.25 (g / m³) en nubosidad moderada y de 0.3 (g / m³) a 1.3 (g / m³) en nubosidad espesa.

Para calcular el valor de Kl se puede utilizar un modelo matemático válido hasta frecuencias de 1000 GHz basado en la dispersión de Rayleigh, que utiliza un modelo Debye doble [9] para la permitividad dieléctrica $\epsilon(f)$ del agua. Por lo tanto:

$$K_l = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad ((\text{dB} / \text{Km}) / (\text{g} / \text{m}^3)) \quad (9)$$

donde f es la frecuencia (GHz), y:

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (10)$$

La permitividad dieléctrica compleja del agua viene dada por:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} \quad (11)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} + \varepsilon_2 \quad (12)$$

donde:

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1)$$

$$\varepsilon_1 = 5.48$$

$$\varepsilon_2 = 3.51$$

$$\theta = \frac{300}{T}$$

siendo T la temperatura (K).

Las frecuencias de relajación principal y secundaria son f_p y f_s , respectivamente, y se definen:

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 \quad \text{GHz} \quad (13)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad \text{GHz} \quad (14)$$

La Figura No. 3 dada por la UIT muestra los valores de Kl en frecuencias entre 5 y 200 GHz y temperaturas entre -8°C y 20°C .

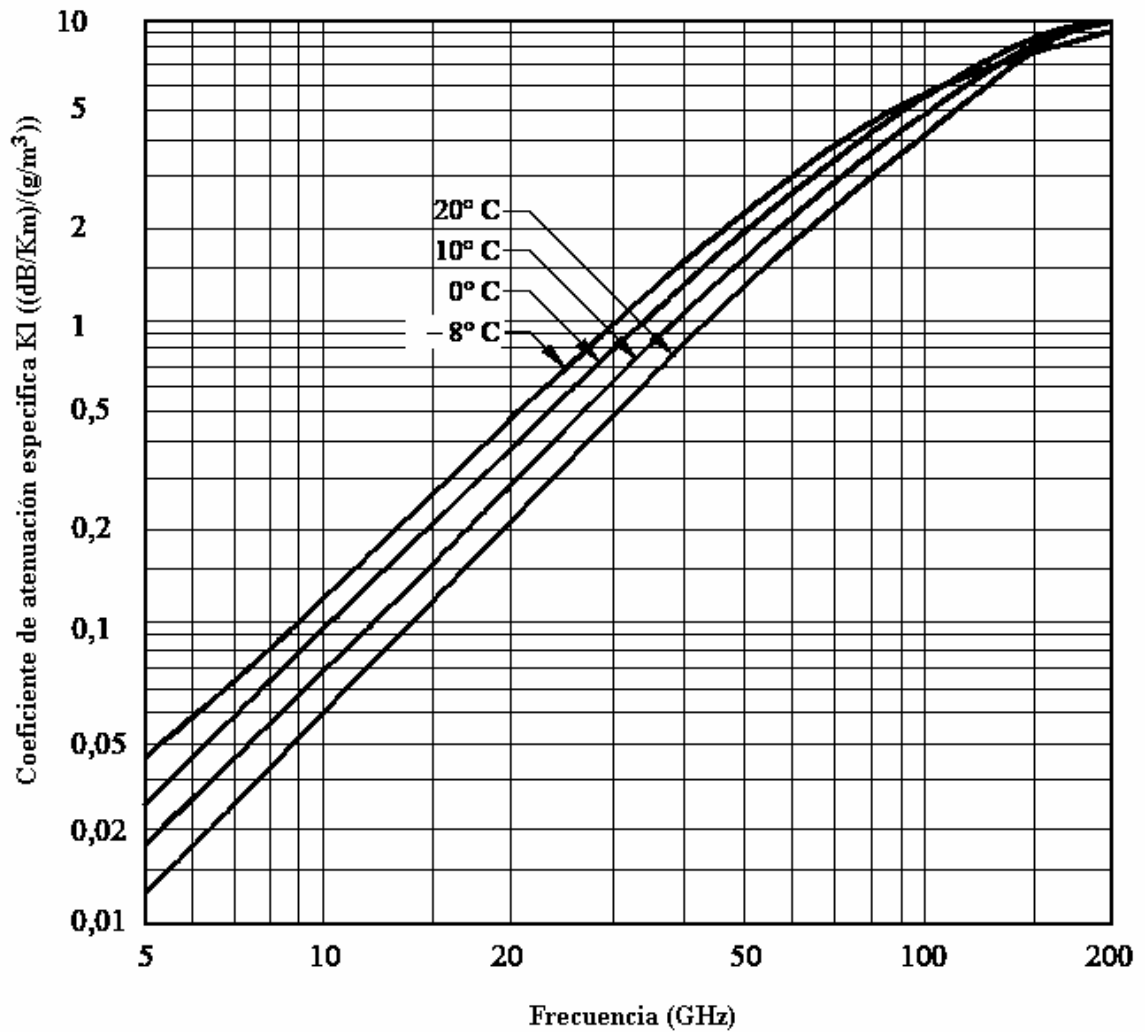


FIGURA No. 3 *Atenuación específica de las pequeñas gotas de agua a diversas temperaturas en función de la frecuencia*

En un **trayecto horizontal** o ligeramente inclinado y próximo al suelo (para un ángulo de elevación comprendida entre 0° y 5°), la atenuación en el trayecto A, puede escribirse como sigue, según la ecuación (6):

$$A = \gamma \cdot r \cdot o \quad \text{dB}$$

donde:

r_o es la longitud del trayecto (Km)

γ_c : atenuación específica (dB/Km) en la nube determinada por la ecuación (8)

En el caso que se desee obtener la atenuación debida a las nubes para un valor de probabilidad determinado, y **trayecto oblicuo** (para un ángulo “ θ ” de elevación comprendida entre 5° y 90°) deben conocerse las estadísticas del contenido de la columna total de agua líquida $L(Kg/m^2)$ o de forma equivalente, milímetros de agua precipitable para un emplazamiento determinado, lo que da:

$$A = \frac{LK_l}{\text{sen}\theta} \quad (15)$$

siendo Kl el que se obtiene anteriormente por la ecuación (9)

Para obtener las estadísticas del contenido de la columna total de agua líquida $L (Kg/m^2)$, y en un emplazamiento determinado se utilizan los ficheros de datos mencionados a continuación:

WREDP50.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida $L (Kg/m^2)$ para una excedencia anual de 50%.

WREDP30.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida $L (Kg/m^2)$ para una excedencia anual de 30%.

WREDP20.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida $L (Kg/m^2)$ para una excedencia anual de 20%.

WREDP10.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 10%.

WREDP5.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 5%.

WREDP3.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 3%.

WREDP2.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 2%.

WREDP1.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 1%.

WREDP0.5.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 0.5%.

WREDP0.3.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 0.3%.

WREDP0.2.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 0.2%.

WREDP0.1.TXT - Contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2) para una excedencia anual de 0.1%.

Estos ficheros de datos son publicados por la **UIT-R** y se encuentran a disposición del usuario en su sitio Internet³. La cuadrícula de latitudes de los ficheros de datos va de +90° N a -90° S en pasos de 1,5°; la cuadrícula de longitud va de 0° a 360° en pasos de 1,5°. [9]

Una excedencia corresponde al porcentaje de tiempo que el valor es excedido, es decir, una correspondiente a XX% es sinónimo de tiempo de indisponibilidad de XX%, o un tiempo de disponibilidad de (100-XX)%.

Para el caso que nos ocupa y como ilustración, obtendremos el valor del contenido de la columna total de agua líquida L (Kg/m^2), para los valores de indisponibilidad de los ficheros de datos para la **región capital (Caracas)**:

TABLA No. 1 Valores de L (Kg/m^2) para distintos porcentajes de indisponibilidad para Caracas.

Indisponibilidad (%)	L (Kg/m2)
50	0
30	0
20	0
10	0,1
5	0,2
3	0,3
2	0,4
1	0,6
0,5	0,8
0,3	0,9
0,2	1,1
0,1	1,6

³ www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/rec840

2.1.5) Atenuación debida a la lluvia

Se considera que el principal factor de atenuación en radioenlaces por encima de los 18 GHz, es la lluvia o precipitación. En ciertas regiones del mundo, el exceso de atenuación debido a este factor puede superar los 150 dB dependiendo de la variabilidad del tiempo y del trayecto en particular. Este varía con la densidad de lluvia y el tamaño de las gotas de agua. Se considera que goteos menores a 0.01 cm de diámetro corresponden a leve llovizna y neblina, mientras que, estos mayores a 0.01 cm son lluvia.

Para estimar las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo puede utilizarse la siguiente técnica sencilla:

Paso 1: Se obtiene el índice de precipitación $R_{0.01}$ superado durante el 0.01% del tiempo. Una excedencia, es decir, porcentaje de tiempo que el valor es excedido, correspondiente a 0.01% es sinónimo de tiempo de indisponibilidad de 0.01% o un tiempo de disponibilidad de 99.99%. Idealmente este valor debe ser adquirido de fuentes locales de información del clima, sin embargo, si no se dispone de esta información a partir de las fuentes locales de medidas a largo plazo puede obtenerse una estimación utilizando el siguiente método:

Para obtener la intensidad de lluvia sobrepasada durante un porcentaje determinado del año medio y en un emplazamiento determinado se utilizan los ficheros de datos mencionados a continuación: *ESARAINPR6.TXT*, *ESARAIN_MC.TXT* y *ESARAIN_MS.TXT* los cuales contienen respectivamente los valores numéricos de las variables: $Pr6$, Mc y Ms , y los ficheros de datos *ESARAINLAT.TXT* y *ESARAINLON.TXT* que contienen la latitud y la longitud de cada una de las entradas de datos de los otros ficheros. Estos ficheros de datos son publicados por la **UIT-R** y se encuentran a disposición del usuario en su sitio

Internet⁴. Estos ficheros de datos se obtuvieron a partir de los datos recogidos durante 15 años por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM).

Paso 1.1: Obtener los valores $Pr6(Lat, Lon)$, $Mc(Lat, Lon)$ y $Ms(Lat, Lon)$. Extraer las variables $Pr6$, Mc y Ms correspondientes en latitud y longitud a las coordenadas geográficas del emplazamiento deseado. La gama de valores de la latitud va de 90°N a -90°S en pasos de 1,5° y la gama de valores de la longitud va de 0° a 360° en pasos de 1,5°.

Para el caso que nos ocupa y como ilustración obtendremos el valor del índice de precipitación R con una indisponibilidad de 0.01% para la **región capital (Caracas)**:

$$Pr6(Lat, Lon) = 3.78280.10^1$$

$$Mc(Lat, Lon) = 7.41180.10^2$$

$$Ms(Lat, Lon) = 3.79600.10^2$$

Paso 1.2: Obtener la probabilidad de lluvia Po , mediante la siguiente expresión:

$$P_0(Lat, Lon) = P_{r6}(Lat, Lon) \left(1 - e^{-0.0117 \left(\frac{M_s(Lat, Lon)}{P_{r6}(Lat, Lon)} \right)} \right) \quad (16)$$

Si el resultado de esta operación queda indeterminado (ningún número), la probabilidad de lluvia $Po(Lat, Lon)$ es igual a cero, y en consecuencia también es cero la intensidad de lluvia.

⁴ www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/rec837

Para el caso que nos ocupa:

$$P_o(Lat, Lon) = 3.78280 \cdot 10^1 \left(1 - e^{-0.0117 \left(\frac{3.79600 \cdot 10^2}{3.78280 \cdot 10^1} \right)} \right)$$

$$P_o(Lat, Lon) = \mathbf{4.19}$$

Paso 1.3: Obtener la intensidad de lluvia R_p , sobrepasada durante el $p\%$ del año medio mediante la siguiente expresión:

$$R_p(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (17)$$

donde:

$$A = ab$$

$$B = a + c \ln \left(\frac{P}{P_o(Lat, Lon)} \right)$$

$$C = \ln \left(\frac{P}{P_o(Lat, Lon)} \right)$$

$$a = 1.11$$

$$b = \frac{(M_c(Lat, Lon) + M_s(Lat, Lon))}{22932P_o}$$

$$c = 31.5b \quad [10]$$

Para el caso que nos ocupa y con una indisponibilidad de 0.01%, tenemos:

$$R_{0.01}(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

donde:

$$A = 1.11(1.166445 \cdot 10^{-2}) = 0.0129475$$

$$B = 1.11 + 0.3674303 \ln\left(\frac{0.01}{4.19}\right) = -1.108496$$

$$C = \ln\left(\frac{0.01}{4.19}\right) = -6.03787$$

$$a = 1.11$$

$$b = \frac{(7.41180 \cdot 10^2 + 3.79600 \cdot 10^2)}{22932(4.19)} = 1.166445 \cdot 10^{-2}$$

$$c = 31.5(1.166445 \cdot 10^{-2}) = 0.3674303$$

$$R_{0.01} = \mathbf{90.75 (mm/h)}$$

Paso 2: Se calcula la atenuación específica, γR (dB/Km) para la frecuencia, polarización e índice de precipitación de interés, utilizando el siguiente método:

La atenuación específica γR (dB/Km) se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia R (mm/h) mediante la ley exponencial:

$$\gamma_R = k \cdot R^\alpha \quad (18)$$

En la Tabla No. 2 se indican los valores de k y α que dependen de la frecuencia, para las polarizaciones lineales (horizontal: H, vertical: V). Estos valores han sido probados y se han considerado lo suficientemente precisos como para realizar predicciones de la atenuación en la banda Ka.

Es notable que las ondas de polarización horizontal, sufren mayores atenuaciones que las polarizadas verticalmente, esto se debe a que las gotas de lluvia generalmente son como óvalos alargados que se encuentran alineados con ejes de rotación vertical. [3]

TABLA No. 2: Coeficientes de regresión para estimar el valor de la atenuación específica de la ecuación (19)

<i>frecuencia (GHz)</i>	<i>kH</i>	<i>kV</i>	<i>αH</i>	<i>αV</i>
18	0,05974	0,05486	1,121	1,0902
19	0,06742	0,06198	1,11	1,0776
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
21	0,08488	0,07788	1,0914	1,058
22	0,09466	0,08666	1,0838	1,051
23	0,10444	0,09544	1,0762	1,044
24	0,11422	0,10422	1,0686	1,037
25	0,124	0,113	1,061	1,03
26	0,1366	0,1238	1,053	1,024
27	0,1492	0,1346	1,045	1,018
28	0,1618	0,1454	1,037	1,012
29	0,1744	0,1562	1,029	1,006
30	0,187	0,167	1,021	1
31	0,2022	0,1802	1,0126	0,9926
32	0,2174	0,1934	1,0042	0,9852
33	0,2326	0,2066	0,9958	0,9778
34	0,2478	0,2198	0,9874	0,9704
35	0,263	0,233	0,979	0,963
36	0,2804	0,2484	0,971	0,9562
37	0,2978	0,2638	0,963	0,9494
38	0,3152	0,2792	0,955	0,9426
39	0,3326	0,2946	0,947	0,9358
40	0,35	0,31	0,939	0,929

[11]

Paso 3: Se calcula la longitud efectiva del trayecto “*deff*” del enlace, multiplicando la longitud del trayecto real *d* por un factor de distancia *r*. Una estimación de este factor viene dada por:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_o}} \quad (19)$$

donde, para $R_{0.01} \leq 100$ mm/h:

$$d_o = 35.e^{-0.015.R_{0.01}} \quad (20)$$

Para $R_{0.01} > 100$ mm/h utilícese el valor 100 mm/h en vez de $R_{0.01}$.

Paso 4: Una estimación de la atenuación del trayecto excedida durante el 0.01% del tiempo viene dada por:

$$A_{0.01} = \gamma R \cdot deff = \gamma R \cdot d \cdot r \quad \text{dB} \quad (21)$$

Paso 5: Para enlaces radioelétricos situados a 30° o más (Norte o Sur) de latitud, las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo *p* en la gama de 0.0001% a 1% pueden deducirse de la siguiente ley exponencial:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0.12 p^{-(0.546+0.043 \log_{10} p)} \quad (22)$$

Paso 6: Para enlaces radioelétricos situados por debajo de 30° (Norte o Sur) de latitud, las atenuaciones excedidas durante otros porcentajes de tiempo *p* en la gama de 0.001% a 1% pueden deducirse de la siguiente ley exponencial:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0.07 p^{-(0.855+0.139 \log_{10} p)} \quad (23)$$

[12]

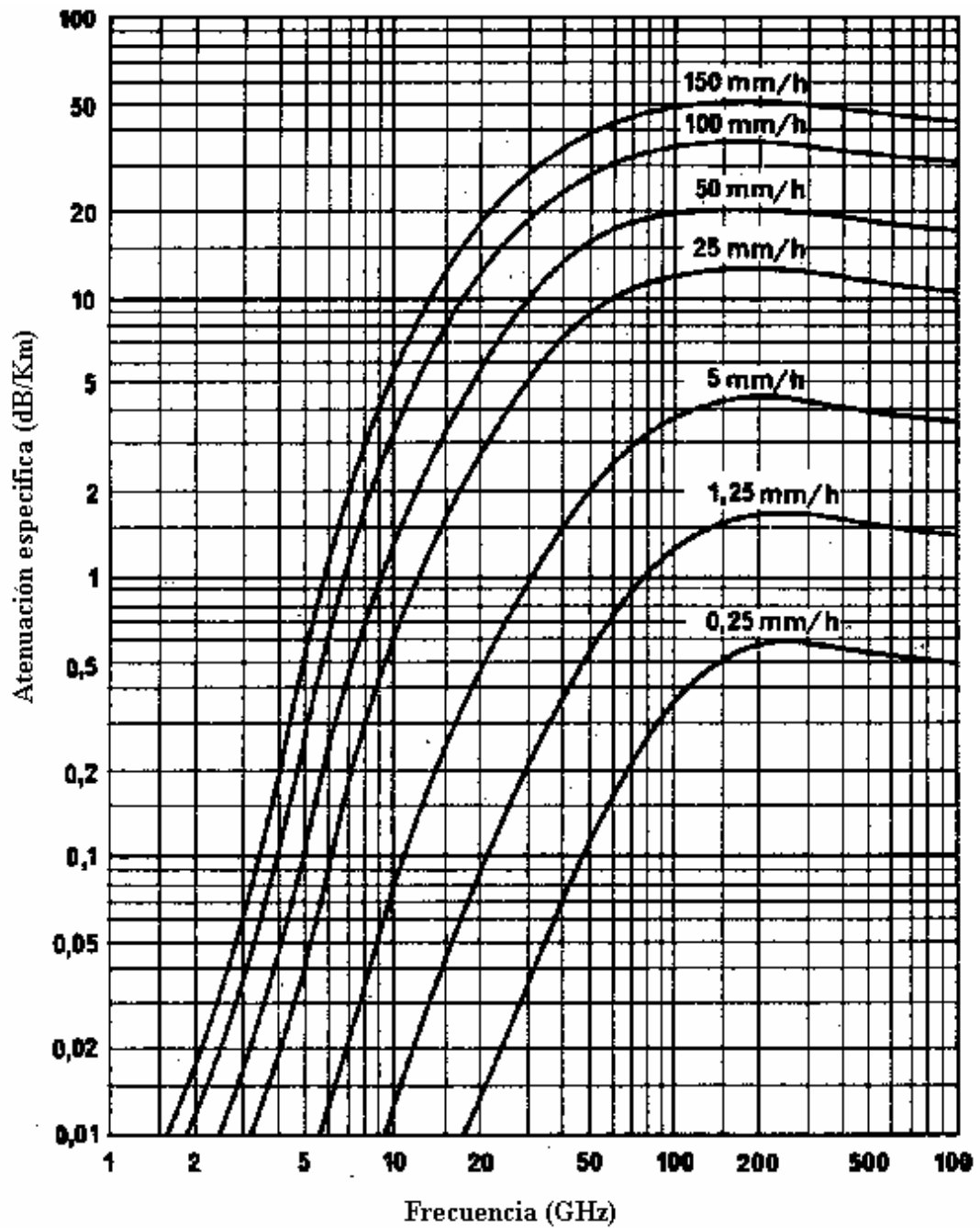


FIGURA No. 4 Atenuación específica (dB/Km) debida a las precipitaciones para diferentes valores de intensidad en mm/h

2.1.6) Recepción

Para garantizar que la señal sea recibida y finalmente pueda llegar al destino, la **potencia de recepción** menos el **margen de desvanecimiento**, debe superar el umbral de recepción del equipo, llamado **potencia umbral**.

Tenemos de esta forma que:

$$\left(\frac{P_{RX}}{P_{TX}} \right)_{(dB)} = P_{RX(dBm)} - P_{TX(dBm)} = G_{TX(dB)} + G_{RX(dB)} - Ael_{(dB)} - Atotal_{(dB)} \quad (24)$$

$$MD_{(dB)} = P_{RX(dBm)} - P_{umbral(dB)} \quad (25)$$

donde:

$P_{RX(dBm)}$ es la potencia de recepción (luego de la propagación).

$P_{TX(dBm)}$ es la potencia de transmisión (antes de la propagación).

$G_{TX(dB)}$ es la ganancia del transmisor.

$G_{RX(dB)}$ es la ganancia del receptor.

$Ael_{(dB)}$ es la atenuación de espacio libre.

$Atotal_{(dB)}$ es la atenuación total producida por los **fenómenos fijos o siempre presentes durante la propagación**.

$MD_{(dB)}$ es el margen de desvanecimiento.

$P_{umbral(dB)}$ es la potencia umbral del equipo receptor.

Se consideran fenómenos fijos o siempre presentes, a aquellos que se encuentran constantemente en el ambiente. Por eso, se toma $Atotal_{(dB)}$ como la

contribución de las atenuaciones debido al oxígeno, al vapor de agua y la nubosidad, las cuales generalmente no introducen pérdidas significativas en la potencia.

Caso contrario sucede con la lluvia, la cual ocurre eventualmente. Debido a que la atenuación debido a la lluvia es la más predominante y generalmente introduce pérdidas de la potencia bastante elevadas, suele relacionarse con desvanecimiento de la señal debido a la lluvia (rain fading), donde se toma el criterio de establecer este valor como margen de desvanecimiento, a fin de garantizar la transmisión de la señal ante la ocurrencia de lluvia para el valor de disponibilidad deseado.

2.2) Modelo de Terreno Irregular (Longley - Rice)

El Modelo de Terreno Irregular (ITM)⁵, también conocido como modelo de propagación Longley-Rice predice la pérdida de transmisión *mediana* en relación con la del espacio libre debido al terreno irregular. El modelo fue diseñado para las frecuencias entre 20 MHz y 40 GHz y para las longitudes de trayectoria entre 1 Km y 2000 Km.

Dado un enlace de radio punto a punto situado en una cierta región, se debe proporcionar ciertos detalles del perfil del terreno del enlace. Los dos terminales del enlace son denotamos como terminales 1 y 2, para así identificar cual es el transmisor y cual es el receptor.

Siempre deben utilizarse unidades consistentes del sistema internacional, donde expresamos longitudes y distancias en metros. La excepción a la regla de unidades es la refractividad atmosférica (N-unidades por millón) y nuestra medida de pérdidas, atenuaciones, ganancias, etc. (en dB).

⁵ George, Hufford. *The Irregular Terrain Model, versión 1.2.2 The Algorithm*. National Telecommunications and Information Administration (NTIA), Institute for Telecommunication Sciences (ITS).

2.2.1) Parámetros generales de entrada:

d : Distancia entre los dos terminales.

hg1, hg2 : Alturas estructurales de las antenas 1 y 2.

k : número de onda: medido en unidades recíprocas de longitud. Se define como:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{f}{fo} \quad (26)$$

donde:

$$fo = 47.70 \text{ MHz.m}$$

λ es la longitud de onda

f es la frecuencia (hemos asumido que la velocidad de la luz en aire es 299.7 m/s.)

La gama de frecuencia nominal para el modelo de Longley-Rice se encuentra de 20 MHz a 40 GHz en el documento algoritmo original. Sin embargo, el límite superior se modifica a 20 GHz en la documentación más reciente⁶. Esto se debe, a qué en el modelo por debajo de 20 GHz la atenuación por multitrayectoria es significativa con respecto a la producida por los factores hidrometeorológicos. Sin embargo, si se añaden las atenuaciones debido a los gases, nubosidad y lluvia a la atenuación de Longley-Rice, esto dará un buen resultado.

Ns : *Refractividad de la superficie*: El efecto de la refractividad se incorpora por la curvatura eficaz de la tierra, típicamente “4/3” (1.333). Una curvatura de 4/3 corresponde a un valor superficial de la refractividad de aproximadamente 301 N-unidades. Longley - Rice recomienda un Ns igual a 301 N-unidades para las

⁶ The “Definitive” representation of the Irregular Terrain Model, Updated 5 August 2002. National Telecommunications and Information Administration (NTIA), Institute for Telecommunication Sciences (ITS).

condiciones atmosféricas medias. Usted puede incorporar el valor eficaz **K** de la curvatura de la tierra (tal como 1.333) y la refractividad superficial N_s será calculada como:

$$N_s = 179.3 \ln \left(\frac{1}{0.046665 \left(1 - \frac{1}{K} \right)} \right) \quad (27)$$

Δh : *Parámetro de irregularidad del terreno en la zona de reflexión*: Para realizar una valoración apropiada de la irregularidad del terreno en el trayecto, es preciso obtener una superficie efectiva de «tierra lisa»⁷ como plano de referencia. Una vez obtenida ésta, pueden obtenerse los valores del parámetro de rugosidad del terreno.

Obtención de la superficie de tierra lisa: Una aproximación en línea recta de las alturas del terreno por encima del nivel medio del mar se obtendrá de la fórmula:

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad (28)$$

donde:

h_{si} : altura snmm (m), de la superficie ajustada por mínimos cuadrados y situada a una distancia d_i (Km) del sitio 1.

h_{st} : altura snmm (m), de la superficie de la tierra lisa en el origen del trayecto, es decir; en el sitio 1.

m : pendiente (m/Km) de la superficie ajustada por mínimos cuadrados con respecto al nivel del mar.

Se consideran los $(n+1)$ puntos del perfil separados uniformemente.

$$m = \frac{\sum_{i=0}^n (h_i - h_a) \left(d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=0}^n \left(d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{m/Km} \quad (29)$$

⁷ RECOMENDACIÓN UIT-R P.452-10

donde:

h_i : altura real snmm del punto i -ésimo del terreno (m)

h_a : media de las alturas reales snmm del trayecto desde h_0 a h_n ambas inclusive (m), que viene dada por:

$$h_a = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n h_i \quad \mathbf{m} \quad (30)$$

La elevación de la superficie uniforme de la tierra en el sitio 1 h_{st} , viene dada por:

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \mathbf{m} \quad (31)$$

Hay que realizar una corrección si las alturas de tierra lisa se sitúan por encima de la altura real del terreno, es decir:

$$h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad \mathbf{m} \quad (32)$$

$$h_{sr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad \mathbf{m} \quad (33)$$

El parámetro de irregularidad del terreno Δh (m), es la altura máxima del terreno correspondiente a la superficie de tierra lisa, en la sección del trayecto.

[13]

γ_e : *Curvatura efectiva de la tierra*: medida en unidades recíprocas de longitud. Esta es la recíproca del radio efectivo de la tierra y se expresa como:

$$\gamma_e = \frac{\gamma_a}{K} \quad (34)$$

donde γ_a es la curvatura actual de la tierra, y K es el factor del radio efectivo de la tierra. Este valor puede ser determinado de la refractividad superficial usando la fórmula empírica:

$$\gamma_e = \gamma_a \left(1 - 0.04665 e^{\frac{Ns}{N1}} \right) \quad (35)$$

donde:

$$N1 = 179.3 \text{ N-unidades}$$

$$\gamma_a = 157.10^{-9} \text{ m}^{-1} = 157 \text{ N-unidades / Km}$$

Zg : *Impedancia de transferencia superficial de la tierra*: Es un numero complejo y adimensional. Está normalmente definido en términos de la permitividad relativa ϵ_r , la conductividad σ de la tierra y la polarización de las ondas de radio envueltas. En estos términos, tenemos:

$$\begin{aligned} Zg &= \sqrt{\epsilon_r' - 1} \quad \text{polarización horizontal} \\ Zg &= \frac{\sqrt{\epsilon_r' - 1}}{\epsilon_r'} \quad \text{polarización vertical} \end{aligned} \quad (36)$$

donde ϵ_r' es la permitividad relativa compleja definida por:

$$\epsilon_r' = \epsilon_r + i \frac{Z_0 \sigma}{k} \quad (37)$$

donde: $Z_0 = 376.62 \text{ Ohm}$.

La conductividad σ se expresa normalmente en Siemens (el reciproco de Ohm) por metro.

La polarización horizontal o vertical debe ser especificada. El modelo de Longley-Rice asume que ambas antenas tienen la misma polarización.

TABLA No. 3 Valores típicos para ϵ_r y σ .⁸

<i>Tipo de Terreno</i>	<i>ϵ_r</i>	<i>σ</i>
Tierra media	15	0.005
Tierra pobre	4	0.001
Buena tierra	25	0.020
Agua dulce	81	0.010
Agua de mar	81	5.000

h_{e1} , h_{e2} : *Alturas efectivas de las antenas*: **Una dificultad con el modelo es que no hay una definición explícita de esta cantidad, y la exactitud del modelo depende a veces de la habilidad del usuario en estimar los valores para estas alturas efectivas.**

$dL1$, $dL2$: *Distancias de cada terminal a su horizonte de radio.*

θ_{e1} , θ_{e2} : *Ángulos de elevación de los horizontes* de cada terminal a la altura de las antenas. Éstos se miden en radianes.

En el caso de una trayectoria con línea de vista, no existen horizontes, sin embargo, el modelo aun requiere valores para $dL1$, $dL2$, θ_{e1} y θ_{e2} . Estos deben ser determinados mediante algunos cálculos preliminares de naturaleza geométrica:

⁸ www.softwright.com/faq/engineering/prop_longley_rice.html

Primero, determinamos las alturas efectivas de las antenas. Una buena estimación de las alturas, basándonos en el criterio para *área de cobertura*, definido en el algoritmo y considerando que tenemos los terminales 1 y 2 localizados como “*gran cuidado*”, es decir, cuando los terminales de un sistema son ubicados en sitios, bien definidos y donde las señales son particularmente fuertes, hacemos:

$$h_{e1} = h_{g1} + B_1 e^{\frac{-2h_{g1}}{\Delta h}} \quad (38)$$

$$h_{e2} = h_{g2} + B_2 e^{\frac{-2h_{g2}}{\Delta h}} \quad (39)$$

$$B_1 = B_2 = 9 \sin\left(\frac{\pi}{2} \min\left(\frac{h_{g1}}{5}, 1\right)\right) + 1 \quad (40)$$

Los parámetros restantes se determinan rápidamente:

$$d_{Ls1} = \sqrt{\frac{2h_{e1}}{\gamma_e}} \quad (41)$$

$$d_{Ls2} = \sqrt{\frac{2h_{e2}}{\gamma_e}} \quad (42)$$

$$d_{L1} = d_{Ls1} \exp\left[-0.07 \sqrt{\frac{\Delta h}{\max(h_{e1}, 5)}}\right] \quad (43)$$

$$d_{L2} = d_{Ls2} \exp\left[-0.07 \sqrt{\frac{\Delta h}{\max(h_{e2}, 5)}}\right] \quad (44)$$

$$\theta_{e1} = \frac{\left[0.65\Delta h \left(\frac{d_{Ls1}}{d_{L1}} - 1 \right) - 2h_{e1} \right]}{d_{Ls1}} \quad (45)$$

$$\theta_{e2} = \frac{\left[0.65\Delta h \left(\frac{d_{Ls2}}{d_{L2}} - 1 \right) - 2h_{e2} \right]}{d_{Ls2}} \quad (46)$$

$$d_{Ls} = d_{Ls1} + d_{Ls2} \quad (47)$$

$$d_L = d_{L1} + d_{L2} \quad (48)$$

$$\theta_e = \max(\theta_{e1} + \theta_{e2}, -d_L \gamma_e) \quad (49)$$

2.2.2) Atenuación de referencia

La salida del modelo puede tomar una de varias formas. La más simple de estas formas es justamente la *atenuación de referencia* **Aref**. Esta es la *mediana* atenuación relativa a la del espacio libre debida al perfil del terreno, que debe ser observada en todas las trayectorias similares cuando las condiciones atmosféricas corresponden a una atmósfera estándar y mixta.

La atenuación de referencia se determina en función de la distancia **d**, como sigue:

$$A_{ref} = \begin{cases} \max(0, A_{el} + K_1 d + K_2 \log(d)) & d \leq d_{Ls} \\ A_{ed} + m_d d & e.o.c. \end{cases} \quad (50)$$

2.2.3) Coeficientes para el rango de difracción.

$$X_{ae} = (k\gamma_e^2)^{-\frac{1}{3}} \quad (51)$$

$$d_3 = \max(d_{Ls}, d_L + 1.3787X_{ae}) \quad (52)$$

$$d_4 = d_3 + 2.7574X_{ae} \quad (53)$$

$$A_3 = A_{diff}(d_3) \quad (54)$$

$$A_4 = A_{diff}(d_4) \quad (55)$$

$$m_d = \frac{(A_4 - A_3)}{(d_4 - d_3)} \quad (56)$$

$$A_{ed} = A_3 - m_d d_3 \quad (57)$$

Donde la función $A_{diff}(s)$ se describe a continuación:

$$w = \frac{25.1}{25.1 + \sqrt{Q}} \quad (58)$$

$$Q = \min(k\Delta h(s), 6283.2) \left[\left(\frac{h_{e1}h_{e2} + 10}{h_{g1}h_{g2} + 10} \right)^{1/2} + \frac{d_L + \frac{\theta_e}{\gamma_e}}{s} \right] \quad (59)$$

donde:

$$\Delta h(s) = \left(1 - 0.8e^{\frac{-s}{50.10^3}} \right) \Delta h$$

$$A_{fo} = \min \left[15, 2.171 \log \left(1 + 4.77 \cdot 10^{-4} \kappa h_{g1} h_{g2} \sigma_h(d_{Ls}) \right) \right] \quad (60)$$

donde:

$$\sigma_h(d_{Ls}) = 0.78\Delta h(d_{Ls}) \exp \left[- \left(\frac{\Delta h(d_{Ls})}{16} \right)^{\frac{1}{4}} \right]$$

$$\Delta h(d_{Ls}) = \left(1 - 0.8e^{\frac{-d_{Ls}}{50.10^3}} \right) \Delta h$$

Entonces:

$$A_{diff}(s) = (1-w)A_k + wA_r + A_{fo} \quad (61)$$

donde: A_k es la atenuación por doble filo de cuchillo.

A_r es la atenuación por tierra esférica.

$$\theta = \theta_e + s\gamma_e \quad (62)$$

$$v_1 = \frac{0.0795775k\theta^2 d_{L1}(s-d_L)}{s-d_L + d_{L1}} \quad (63)$$

$$v_2 = \frac{0.0795775k\theta^2 d_{L2}(s-d_L)}{s-d_L + d_{L2}} \quad (64)$$

y entonces:

$$A_k = Fn(v_1) + Fn(v_2) \quad (65)$$

donde $Fn(v)$ es la integral de Fresnel:

$$Fn(v) = 20 \log \left| \frac{1}{\sqrt{2i}} \int_v^\infty e^{\frac{i\pi u^2}{2}} du \right| \quad (66)$$

cuya aproximación a la solución de la ecuación (66) es:

$$Fn(v) \approx \begin{cases} 6.02 + 9.11\sqrt{v} - 1.27v & v \leq 5.76 \\ 12.953 + 4.343 \log v & e.o.c. \end{cases}$$

Para la “atenuación por tierra esférica” utilizamos el método aplicado a la formulación de Vogler de la solución al problema liso.

Fijamos:

$$\gamma_0 = \frac{\theta}{(s - d_L)} \quad (67)$$

$$\gamma_1 = \frac{2h_{e1}}{d_{L1}^2} \quad (68)$$

$$\gamma_2 = \frac{2h_{e2}}{d_{L2}^2} \quad (69)$$

$$\alpha_0 = \left(\frac{k}{\gamma_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (70)$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{k}{\gamma_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (71)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{k}{\gamma_2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (72)$$

$$K_0 = \frac{1}{i\alpha_0 Z_g} \quad (73)$$

$$K_1 = \frac{1}{i\alpha_1 Z_g} \quad (74)$$

$$K_2 = \frac{1}{i\alpha_2 Z_g} \quad (75)$$

Observe que los K_0, K_1 y K_2 son números complejos. Para continuar, fijamos:

$$x_1 = 151.03B(K_1)\alpha_1\gamma_1d_{L1} \quad (76)$$

$$x_2 = 151.03B(K_2)\alpha_2\gamma_2d_{L2} \quad (77)$$

$$x_0 = 151.03B(K_0)\alpha_0\theta + x_1 + x_2 \quad (78)$$

y entonces:

$$A_r = G(x_0) - F(x_1, K_1) - F(x_2, K_2) - C_1(K_0) \quad (79)$$

donde las funciones $B(K)$, $G(x)$, $F(x, K)$ y $C_1(K)$ están definidas por Vogler. Siendo una muy buena aproximación a la solución:

$$B(K) \approx 1.607 - |K|$$

$$G(x) = 0.05751x - 4.343 \log x$$

$$F(x, K) = \begin{cases} F_2(x, K) & 0 < x \leq 200 \\ G(x) + 0.0134 x e^{\frac{-x}{200}} (F_1(x) - G(x)) & 200 < x < 2000 \\ G(x) & 2000 \leq x \end{cases}$$

donde:

$$F_1(x) = 17.372 \log(x) - 117$$

$$F_2(x, K) = \begin{cases} \frac{2.5 \cdot 10^{-5} x^2}{|K|} + 8.686 \log|K| - 15 & |K| \left(\left\langle 10^{-5} \text{ or } x(-\log|K|)^3 \right\rangle 5495 \right. \\ & \left. e.o.c. \right) \end{cases}$$

$$C_1(K) \approx 20$$

2.2.4) Coeficientes para el rango de línea de vista

Comenzamos fijando:

$$d_2 = d_{Ls} \quad (80)$$

$$A_2 = A_{ed} + m_d d_2 \quad (81)$$

Entonces hay dos casos generales. Primero, si $A_{ed} \geq 0$

$$d_0 = \min \left(\frac{1}{2} d_L, 1.908 k h e_1 h e_2 \right) \quad (82)$$

$$d_1 = \frac{3}{4} d_0 + \frac{1}{4} d_L \quad (83)$$

$$A_0 = A_{los}(d_0) \quad (84)$$

$$A_1 = A_{los}(d_1) \quad (85)$$

La idea, ahora, es obtener una curva de la forma: $A_{el} + K_1 d + K_2 \log(d)$

Primeramente definimos:

$$K_2' = \max \left[0, \frac{(d_2 - d_0)(A_1 - A_0) - (d_1 - d_0)(A_2 - A_0)}{(d_2 - d_0) \log\left(\frac{d_1}{d_0}\right) - (d_1 - d_0) \log\left(\frac{d_2}{d_0}\right)} \right] \quad (86)$$

$$K_1' = \frac{\left(A_2 - A_0 - K_2' \log\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \right)}{(d_2 - d_0)} \quad (87)$$

Ahora si tenemos que $K_1' \geq 0$, entonces:

$$K_1 = K_1' \quad K_2 = K_2'$$

Ahora si tenemos que $K_1' < 0$, entonces:

$$K_2'' = \frac{(A_2 - A_0)}{\log\left(\frac{d_2}{d_0}\right)} \quad (88)$$

Y si ahora tenemos que $K_2'' \geq 0$, entonces:

$$K_1 = 0 \quad K_2 = K_2''$$

en otro caso, hacemos:

$$K_1 = m_d \quad K_2 = 0$$

En el segundo caso general tenemos $\mathbf{Aed} < \mathbf{0}$. Entonces fijamos:

$$d_0 = 1.908kh_{e1}h_{e2} \quad (89)$$

$$d_1 = \max\left(\frac{-A_{ed}}{m_d}, \frac{d_L}{4}\right) \quad (90)$$

Ahora si tenemos que $d_0 < d_1$, entonces, se evalúa nuevamente A_0, A_1 y K'_2 como en el caso anterior, es decir, formulas (84), (85) y (86):

$$A_0 = A_{los}(d_0)$$

$$A_1 = A_{los}(d_1)$$

$$K'_2 = \max\left[0, \frac{(d_2 - d_0)(A_1 - A_0) - (d_1 - d_0)(A_2 - A_0)}{(d_2 - d_0)\log\left(\frac{d_1}{d_0}\right) - (d_1 - d_0)\log\left(\frac{d_2}{d_0}\right)}\right]$$

Y si ahora tenemos que $K'_2 > 0$, entonces, evaluamos K'_1 y procedemos exactamente como el caso anterior, es decir, formula (87):

$$K'_1 = \frac{\left(A_2 - A_0 - K'_2 \log\left(\frac{d_2}{d_0}\right)\right)}{(d_2 - d_0)}$$

Ahora si tenemos que $K'_1 \geq 0$, entonces:

$$K_1 = K'_1 \quad K_2 = K'_2$$

Ahora si tenemos que $K_1' < 0$, entonces:

$$K_2'' = \frac{(A_2 - A_0)}{\log\left(\frac{d_2}{d_0}\right)} \quad (91)$$

Y si ahora tenemos que $K_2'' \geq 0$, entonces:

$$K_1 = 0 \quad K_2 = K_2''$$

en otro caso, hacemos:

$$K_1 = m_d \quad K_2 = 0$$

Ahora si tenemos que $d_0 \geq d_1$ o $K_2' = 0$, entonces, evaluamos A_1 según la formula (85), y se define:

$$A_1 = A_{los}(d_1)$$

$$K_1'' = \frac{(A_2 - A_1)}{(d_2 - d_1)} \quad (92)$$

Y si ahora tenemos que $K_1'' > 0$, entonces:

$$K_1 = K_1'' \quad K_2 = 0$$

en otro caso, hacemos:

$$K_1 = m_d \quad K_2 = 0$$

A este punto tendremos definidos los coeficientes K_1 y K_2 . Entonces, finalmente fijamos:

$$A_{el} = A_2 - K_1 d_2 - K_2 \log(d_2) \quad (93)$$

Donde la función $A_{los}(s)$, se define a continuación:

Primero definimos el factor:

$$w = \frac{0.021}{0.021 + \frac{k\Delta h}{\max(10 \cdot 10^3, d_{Ls})}} \quad (94)$$

Entonces:

$$A_{los} = (1 - w)A_d + wA_t \quad (95)$$

donde: A_d es la atenuación por difracción extendida.

A_t es la atenuación por dos-rayos.

Primero, la atenuación por difracción extendida A_d , se da simplemente como:

$$A_d = A_{ed} + m_d s \quad (96)$$

Para la atenuación por dos-rayos A_t , fijamos:

$$\sin \varphi = \frac{h_{e1} + h_{e2}}{\sqrt{s^2 + (h_{e1} + h_{e2})^2}} \quad (97)$$

$$R'_e = \frac{\sin \varphi - Z_g}{\sin \varphi + Z_g} \exp[-\min(10, k\sigma_h(s)\sin \varphi)] \quad (98)$$

donde:

$$\sigma_h(s) = 0.78\Delta h(s) \exp\left[-\left(\frac{\Delta h(s)}{16}\right)^{\frac{1}{4}}\right]$$

$$\Delta h(s) = \left(1 - 0.8e^{\frac{-s}{50.10^3}}\right)\Delta h$$

Observe que R'_e es un numero complejo puesto que usa la impedancia de transferencia superficial compleja Z_g . Entonces:

$$R_e = \begin{cases} \left(\frac{R'_e}{|R'_e|}\right) \sqrt{\sin \varphi} & |R'_e| \geq \max\left(\frac{1}{2}, \sqrt{\sin \varphi}\right) \\ & e.o.c. \end{cases} \quad (99)$$

Tambi3n fijamos:

$$\delta' = \frac{2kh_{e1}h_{e2}}{s} \quad (100)$$

$$\delta = \begin{cases} \delta' & \delta' \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2}{\delta'} & e.o.c. \end{cases} \quad (101)$$

Entonces finalmente:

$$A_t = -20 \log |1 + R_e e^{i\delta}| \quad (102)$$

Una limitación del modelo es que la predicción depende de la base de datos del terreno y el método de la extracción del perfil utilizado. Por ejemplo, si un usuario accedió a una base de datos y extrajo puntos de la elevación cada 500 metros y un segundo usuario extrajo puntos de la elevación cada 50 metros, es posible que sus pérdidas predichas no serán iguales.

2.2.5) Variabilidad – los cuantiles de la atenuación.

Mientras que el algoritmo evalúa explícitamente la pérdida de la señal debido al terreno, las pérdidas debido a la vegetación y a las estructuras o edificaciones hechas por el hombre, por ejemplo, se consideran solamente implícito en los ***parámetros de la variabilidad.***

La segunda forma de **salida** proporciona la distribución acumulativa bidimensional de la atenuación en cuanto a la variabilidad del tiempo y la situación. Esta viene dada por el cuantil $A(qT, qS)$, la atenuación que no será excedida como una función de las fracciones del tiempo y la situación. Se dice: con la confianza de qS de probabilidad, la atenuación no excederá $A(qT, qS)$ por lo menos qT del tiempo.

Ahora deseamos calcular el cuantil $A(qT, qS)$, donde qT, qS son las deseadas fracciones de disponibilidad y confianza respectivamente.

Debido a que las distribuciones implicadas son todas “normal”, expresamos las fracciones deseadas en términos de una “desviación normal estándar”. Utilizamos la distribución normal complementaria:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (103)$$

y entonces la desviación es simplemente la función inversa:

$$z(q) = Q^{-1}(q) \quad (104)$$

cuya aproximación a la solución es dada por *C. Hastings, Jr.* (“*Approximations for digital computers*” *Princeton Univ. Press, 1955*)

$$X1 = \max(q, 0.000001)$$

$$X2 = \sqrt{-2 \log(X1)}$$

$$z(q) = X2 - \frac{(0.010328X2 + 0.802853)X2 + 2.515516698}{((0.001308X2 + 0.189269)X2 + 1.432788)X2 + 1}$$

Tenemos entonces: $zT = z(qT)$ $zS = z(qS)$

Primeramente definimos:

$$A' = A_{ref} - V_{med} - Y_T - Y_S \quad (105)$$

donde:

A_{ref} es la atenuación de referencia.

V_{med} es el ajuste a todo el año medio.

Y_T y Y_S son las desviaciones que dependen de las variables zT y zS respectivamente.

El cuantil final es una modificación de A' dada por:

$$A(qT, qS) = \begin{cases} \frac{A'}{29 - A'} & A' \geq 0 \\ A' \frac{29 - A'}{29 - 10A'} & e.o.c. \end{cases} \quad (106)$$

Una cantidad importante es la distancia efectiva. Fijamos:

$$d_{ex} = \sqrt{2(9000 \cdot 10^3 h_{e1})} + \sqrt{2(9000 \cdot 10^3 h_{e2})} + 9000 \cdot 10^3 (k1266 \cdot 10^3)^{-1} \quad (107)$$

Entonces la distancia efectiva esta dada por:

$$d_e = \begin{cases} \frac{130 \cdot 10^3 d}{d_{ex}} & d \leq d_{ex} \\ 130 \cdot 10^3 + d - d_{ex} & d \geq d_{ex} \end{cases} \quad (108)$$

2.2.6) Variabilidad del tiempo

La variabilidad del tiempo explica variaciones de los valores medianos de la atenuación, por ejemplo, debido a cambios en la refracción o en la intensidad de la turbulencia atmosférica. La variabilidad del tiempo describe los efectos de estos cambios en un cierto plazo. Para el cálculo se expresa como porcentaje a partir de la 0.1% a 99.9%, y representa la **disponibilidad** del enlace.

El ajuste de la atenuación de referencia al punto medio del año es:

$$V_{med} = V_{med}(d_e, c \text{ lim})$$

$$V_{med} = \left(cv1 + \frac{cv2}{1 + \left(\frac{d_e - yv2}{yv3} \right)^2} \right) \left(\frac{\left(\frac{d_e}{yv1} \right)^2}{1 + \left(\frac{d_e}{yv1} \right)^2} \right) \quad (109)$$

Para el caso específico del clima *Continental Subtropical*, tenemos:

$$cv1 = -0,62$$

$$cv2 = 9,19$$

$$yv1 = 228,9 \cdot 10^3$$

$$yv2 = 205,2 \cdot 10^3$$

$$yv3 = 143,6 \cdot 10^3$$

La desviación Y_T , puede ser escrita en la forma:

$$Y_T = \begin{cases} (\sigma_{T-})z_T & z_T \leq 0 \\ (\sigma_{T+})z_T & 0 \leq z_T \leq z_D \\ (\sigma_{T+})z_D + \sigma_{TD}(z_T - z_D) & z_D \leq z_T \end{cases} \quad (110)$$

donde las desviaciones pseudo estándar, están definidas como:

$$\sigma_{T-} = \sigma_{T-}(d_e, c \text{ lim})$$

$$\sigma_{T+} = \sigma_{T+}(d_e, c \text{ lim})$$

$$\sigma_{T-} = \left(csm1 + \frac{csm2}{1 + \left(\frac{d_e - ysm2}{ysm3} \right)^2} \right) \left(\frac{\left(\frac{d_e}{ysm1} \right)^2}{1 + \left(\frac{d_e}{ysm1} \right)^2} \right) gm \quad (111)$$

$$gm = cfm1 + \frac{cfm2}{(cfm3 \cdot \log(0.133k))^2 + 1} \quad (112)$$

$$\sigma_{T+} = \left(csp1 + \frac{csp2}{1 + \left(\frac{d_e - ysp2}{ysp3} \right)^2} \right) \left(\frac{\left(\frac{d_e}{ysp1} \right)^2}{1 + \left(\frac{d_e}{ysp1} \right)^2} \right) gp \quad (113)$$

$$gp = cfp1 + \frac{cfp2}{(cfp3 \cdot \log(0.133k))^2 + 1} \quad (114)$$

Para el caso específico del clima *Continental Subtropical*, tenemos:

$$csm1 = 2,66 \qquad cfp1 = 0,93$$

$$csm2 = 7,67 \qquad cfp2 = 0,31$$

$$ysm1 = 100,4 \cdot 10^3 \qquad cfp3 = 2$$

$$ysm2 = 172,5 \cdot 10^3$$

$$ysm3 = 136,4 \cdot 10^3$$

$$cfm1 = 1$$

$$cfm2 = 0$$

$$cfm3 = 0$$

$$csp1 = 6,87$$

$$csp2 = 15,53$$

$$ysp1 = 138,7 \cdot 10^3$$

$$ysp2 = 143,7 \cdot 10^3$$

$$ysp3 = 98,6 \cdot 10^3$$

y las constantes de ductos o de baja probabilidad, están definidas como:

$$\sigma_{TD} = (\sigma_{T+})C_D(c \text{ lim})$$

$$z_D = z_D(c \text{ lim})$$

Para el caso específico del clima *Continental Subtropical*, tenemos:

$$z_D = 2.161$$

$$C_D = 0.801$$

2.2.7) Variabilidad de la situación

La variabilidad de la situación para el cálculo se expresa como porcentaje a partir de la 0.1% a 99.9%, y da un criterio de *confianza* para la predicción.

El qS de la variabilidad de la situación es una medida de la probabilidad impuesta ante la colección de todas las trayectorias posibles o concebibles de la propagación y todos los momentos posibles o concebibles del tiempo. Puesto que el modelo se basa en muchos sistemas de medidas de la propagación, el valor predicho de la propagación obtenido del modelo se puede predisponer con el término de la variabilidad de la situación. Por lo tanto, la variabilidad de la situación permite que el usuario de ITM tenga cierto aseguramiento que la pérdida predicha tiene cierta relación predefinida con pérdidas medidas.

Dado:

$$\sigma_S = 5 + 3e^{\frac{-d_e}{100.10^3}} \quad (115)$$

Tenemos:

$$Y_S = \left(\sigma_S^2 + \frac{Y_T^2}{7.8 + z_S^2} \right)^{\frac{1}{2}} z_S \quad (116)$$

[14] [15]

CAPITULO III

3) Desarrollo de las Aplicaciones

3.1) *Acerca de LabVIEW*

LabVIEW de *NATIONAL INSTRUMENTS*, es una herramienta de programación gráfica, orientada al objeto. LabVIEW nos provee de la capacidad de crear rápidamente una interfaz de usuario que nos proporcione la interactividad con el sistema. Es un amigable ambiente de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos. LabVIEW nos da la flexibilidad de un poderoso ambiente de programación sin la complejidad de los ambientes tradicionales. A diferencia de los lenguajes de propósito general, LabVIEW provee funcionalidad específica para que pueda acelerar el desarrollo de aplicaciones de medición, control y automatización. Con LabVIEW podemos colocar objetos ya construidos para rápidamente crear interfases de usuario. LabVIEW se puede conectar de manera transparente con todo tipo de hardware incluyendo instrumentos de escritorio, tarjetas insertables, controladores de movimiento y controladores lógicos programables. Para el desarrollo de nuestras aplicaciones, la velocidad de ejecución es vital. Con LabVIEW obtenemos velocidades de ejecución comparables con programas C compilados. Con LabVIEW podemos desarrollar sistemas que cumplan con nuestros requerimientos de desempeño a través de las plataformas Windows, Macintosh, UNIX o sistemas de tiempo real.

Con LabVIEW podemos conectarnos a instrumentos de medida para construir sistemas de medida completos, incluyendo desde cualquier tipo de instrumento autónomo hasta dispositivos de adquisición de datos, controladores de movimiento, medidores de variables ambientales y sistemas de adquisición de imagen.

LabVIEW puede también crear ejecutables autónomos o librerías compartidas y DLLs para que pueda llamarlos desde otros entornos. LabVIEW es ideal para el monitoreo de maquinaria y para aplicaciones de mantenimiento predictivo que necesitan controles determinísticos, análisis de vibraciones, análisis de visión e imagen o control de movimiento.

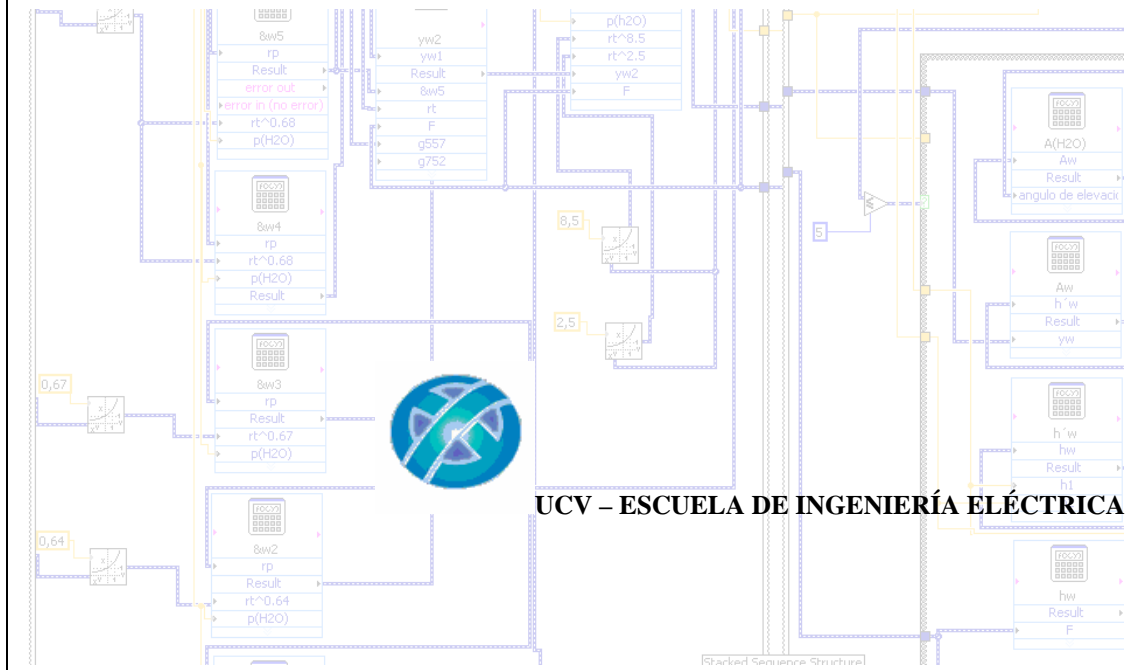
Es por todas estas razones que consideramos que esta herramienta computacional es la adecuada para el desarrollo de nuestras aplicaciones, ya que está orientada hacia el trabajo con señales tanto para la simulación como en tiempo real.

La **programación gráfica LabVIEW** se estructura como sigue:

- La interfaz interactiva de usuario de un VI se llama **Panel Frontal**, debido a que simula el panel de un instrumento físico. El panel frontal puede contener botones, interruptores, pulsadores, gráficas y otros controles e indicadores. Los datos se introducen utilizando el ratón y el teclado, y los resultados se muestran en la pantalla del ordenador.
- El VI recibe instrucciones de un **Diagrama de Bloques** que construimos. El diagrama de bloques es la solución gráfica a un determinado problema de programación. Además, el diagrama de bloques es el código fuente de nuestro programa o VI.



MANUAL DE USUARIO



3.2) Simulador para la caracterización de los parámetros atenuación y desvanecimiento de señales radioeléctricas propagadas en la banda Ka.

(Basado en la Unión Internacional de Telecomunicaciones)

Es un programa destinado básicamente a caracterizar los parámetros atenuación y desvanecimiento de señales que se propagan vía microondas, en la banda de frecuencias conocida como K_a . Según la UIT-R Rec.V.431-7, esta banda de frecuencias es desde **18GHz** hasta **40GHz**. Las ondas transmitidas en esta banda son denominadas milimétricas, ya que sus longitudes de onda abarcan desde **16mm** hasta **7.5mm**, tal como lo muestra la referencia: **Freeman, Roger L. Telecommunication Transmisión Handbook**. New York. A Wiley – Interscience Publication.

El simulador considera únicamente radioenlaces cuya **propagación** es punto a punto con **visibilidad directa**, es decir, la propagación es entre dos puntos, en la que el primer elipsoide de Fresnel está suficientemente exento de obstáculos para que **la difracción tenga un efecto despreciable**, concepto que se toma de la UIT-R Rec. P.310-9.

Los efectos sobre la señal será en los parámetros **atenuación** y **desvanecimiento** durante la propagación, es decir, la reducción de la *intensidad* de la señal, la disminución progresiva de la potencia conforme aumenta la distancia. Estos parámetros **NO** se manifiestan como alteraciones de la *forma* de la señal, tal como lo muestra la referencia: **Carlson, A. Bruce Sistemas de Comunicación**. McGRAW-HILL.

El simulador es desarrollado en un ambiente de programación gráfico, orientado al objeto, denominado *LabVIEW 7 Express* de **NATIONAL INSTRUMENTS**.

Se tiene como referencia la tecnología LMDS, la cual opera en esta banda de frecuencias K_a , específicamente en 28GHz, por lo tanto, se realizarán sugerencias técnicas de acuerdo a esta tecnología.

Primeramente debe instalarse en el equipo PC el RUN-TIME de *LabVIEW 7*, *lvruntimeeng.msi*, que viene en el disco junto al software. Posteriormente, puede abrirse el archivo denominado **SimuladorKa**, que es una aplicación de tipo ejecutable. Se requiere una configuración de pantalla de 1024 x 768 píxeles.

DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

Pestaña No. 1 El usuario introduce los ***DATOS*** necesarios.



FIGURA No. 5 Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de DATOS

Distancia del enlace (Km): Se refiere a la distancia en kilómetros que tendrá que viajar la onda electromagnética desde el transmisor hasta el receptor. Para esta banda de frecuencias la transmisión tiene lugar en términos de **distancias cortas**, por lo tanto se sugieren intervalos en torno a los **2-7 kilómetros**.

Altitud de estación 1 y 2 (m.s.n.m.): Se refiere a las alturas de las antenas en los dos puntos de emplazamiento en metros sobre el nivel del mar.

Potencia de transmisión (dBm): Este dato se toma de las especificaciones del fabricante de los equipos de radio transmisores.

Ganancia de la antena 1 y 2 (dBi): Al igual que en el caso anterior, este dato se toma de las especificaciones del fabricante de las antenas.

Polarización de las antenas: Se debe determinar el tipo de polarización de las antenas a utilizar para la transmisión, siendo las opciones: Vertical y Horizontal. Este valor tiene un efecto importante sobre el cálculo de la atenuación debido a la lluvia.

Frecuencia (GHz): Se refiere a la frecuencia de la onda portadora en GHz, donde la banda es la denominada K_a .

Presión (hPa): Dato atmosférico. La UIT ha establecido sus curvas de atenuación específica (dB/Km) debida a los gases atmosféricos, para el valor de presión de 1013 hPa, según la UIT-R P.676-5. Los valores para **Caracas** también oscilan alrededor de ese valor de presión atmosférica.

Temperatura (°C): Dato atmosférico. La UIT ha establecido sus curvas de atenuación específica (dB/Km) debida a los gases atmosféricos, para el valor de temperatura de 15°C, según la UIT-R P.676-5. Los valores para **Caracas** oscilan

entre 22°C y 32°C. Es interesante resaltar que mientras la temperatura es más baja, esta afecta más negativamente la ganancia de la señal.

Densidad de vapor de agua (g/m^3): Dato atmosférico. La UIT ha establecido sus curvas de atenuación específica (dB/Km) debida a los gases atmosféricos, para el valor de densidad de vapor de agua de $7,5 g/m^3$, según la UIT-R P.676-5. Sin embargo, la densidad del vapor de agua varía tanto con la posición geográfica como con el tiempo, por lo tanto, la UIT facilita estos valores en unos ficheros de datos, según pueden consultarse en UIT-R P.836-2. Los valores de densidad de vapor de agua a utilizar para la **región capital (Caracas)**, son los siguientes:

ρ para Diciembre, Enero, Febrero = $15.354457 (g/m^3)$.

ρ para Marzo, Abril, Mayo = $17.952264 (g/m^3)$.

ρ para Junio, Julio, Agosto = $23.624318 (g/m^3)$.

ρ para Septiembre, Octubre, Noviembre = $20.111256 (g/m^3)$.

Intensidad de lluvia (mm/h): Dato atmosférico. Se considera que la lluvia es el principal factor de atenuación en radioenlaces en la banda K_a . Para obtener la intensidad de lluvia en mm/h sobrepasada durante un porcentaje determinado del año medio y en un emplazamiento determinado se utilizan los ficheros de datos suministrados por la UIT, según pueden consultarse en UIT-R P.837-3. El valor de intensidad de lluvia a utilizar para conseguir una indisponibilidad del enlace de 0.01%, para la **región capital (Caracas)**, es el siguiente: $R_{0,01} = 90.75 (mm/h)$

Densidad de agua líquida en la nube o la niebla (g/m^3): Dato atmosférico. La densidad de agua líquida es típicamente de unos $0.05 g/m^3$ a $0.25 g/m^3$ en nubosidad moderada y de $0.3 g/m^3$ a $1.3 g/m^3$ en nubosidad espesa.

Contenido de la columna total de agua líquida (Kg / m^2): Dato atmosférico. Para obtener las estadísticas del contenido de la columna total de agua líquida en Kg / m^2 , y en un emplazamiento determinado se utilizan los ficheros de datos suministrados por la UIT, según pueden consultarse en UIT-R P.840-3. El valor del contenido de la columna total de agua líquida a utilizar para conseguir una indisponibilidad del enlace de 0.1%, para la **región capital (Caracas)**, es el siguiente: $L_{0.01} = 1.6 (Kg / m^2)$

Pestaña No. 2 RESULTADOS numéricos para los valores dados.

The screenshot displays the 'RESULTADOS' (RESULTS) tab of the 'SimuladorKa.exe' software. The interface is organized into two main columns of input fields, each with a numerical value of 0. The top navigation bar includes tabs for 'DATOS', 'RESULTADOS', 'Ael / PRx', 'OXIGENO', 'VAPOR DE AGUA', 'NUBOSIDAD', and 'LLUVIA'. The left column contains fields for: 'Atenuación específica debido al Oxígeno (dB/Km)', 'Atenuación específica debido al Vapor de Agua (dB/Km)', 'Coeficiente de atenuación específica para la Nubosidad ((dB/Km)/(g/m³))', and 'Atenuación específica debido a la Lluvia (dB/km)'. The right column contains fields for: 'Atenuación en el Espacio Libre (dB)', 'Atenuación debido al Oxígeno (dB)', 'Atenuación debido al Vapor de Agua (dB)', 'Atenuación debido a la Nubosidad (dB)', 'Potencia de Recepción (dBm) (fenómenos fijos)', 'Atenuación debido a la Lluvia (dB)', and 'Potencia Total de Recepción (dBm)'. At the bottom, there is a logo for the 'Unión Internacional de Telecomunicaciones / UIT' and a 'STOP' button. The footer text reads 'UCV - ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA - BANDA Ka'.

FIGURA No. 6 Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de RESULTADOS

Se obtienen como resultados los valores numéricos correspondientes a la atenuación específica (dB/Km) para el caso del oxígeno, vapor de agua y lluvia y el coeficiente de atenuación específica para la nubosidad ((dB/Km)/(g / m³)),

correspondientes a los valores introducidos como datos, así como la atenuación en dB según sea el caso. También se obtiene la atenuación en el espacio libre en dB. Estos valores son calculados según los métodos de predicción propuestos en las recomendaciones: UIT-R P.676-5, UIT-R P.840-3, UIT-R P.530-10, UIT-R PN.525-2. Se consideran fenómenos fijos o siempre presentes a aquellos que se encuentran constantemente en el ambiente. Por eso se toma $A_{(dB)}$ de fenómenos fijos, la contribución de las atenuaciones debido al oxígeno, al vapor de agua y la nubosidad, las cuales generalmente no introducen pérdidas significativas de la potencia.

Caso contrario sucede con la lluvia, la cual ocurre eventualmente. Debido a que la atenuación debido a la lluvia es la más predominante y generalmente introduce pérdidas de la potencia bastante elevados, suele relacionarse con desvanecimiento de la señal debido a la lluvia (rain fading). Es por eso, que debe tomarse el criterio de establecer este valor como margen de desvanecimiento, a fin de garantizar la transmisión de la señal ante un evento de lluvia para el valor de disponibilidad establecido. Incluyendo este valor, el simulador calcula la potencia total de recepción (dBm).

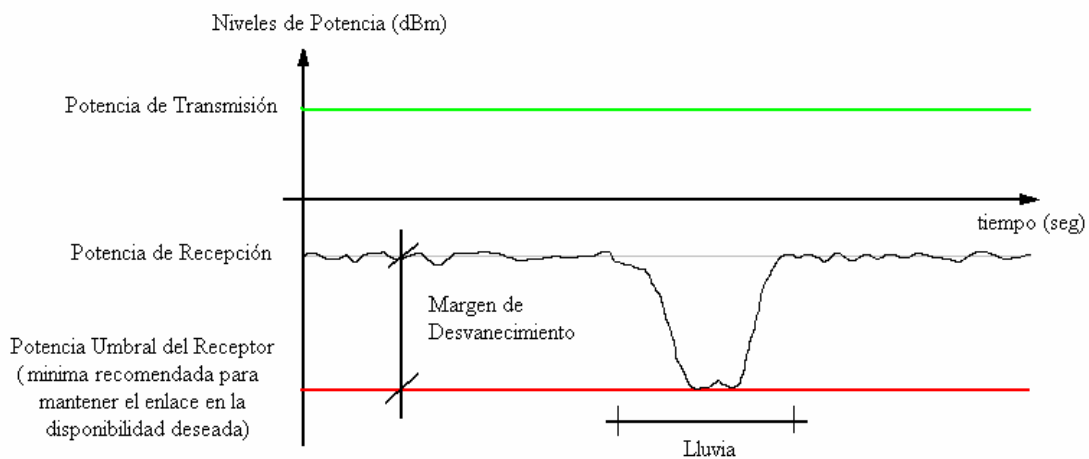


FIGURA No. 7 Representación de las variaciones de los niveles de potencia de recepción ante un evento de lluvia.

Pestaña No. 3 Gráficos correspondientes a la atenuación de espacio libre (dB) y potencia de recepción (dBm) en la banda K_a , para los datos especificados.

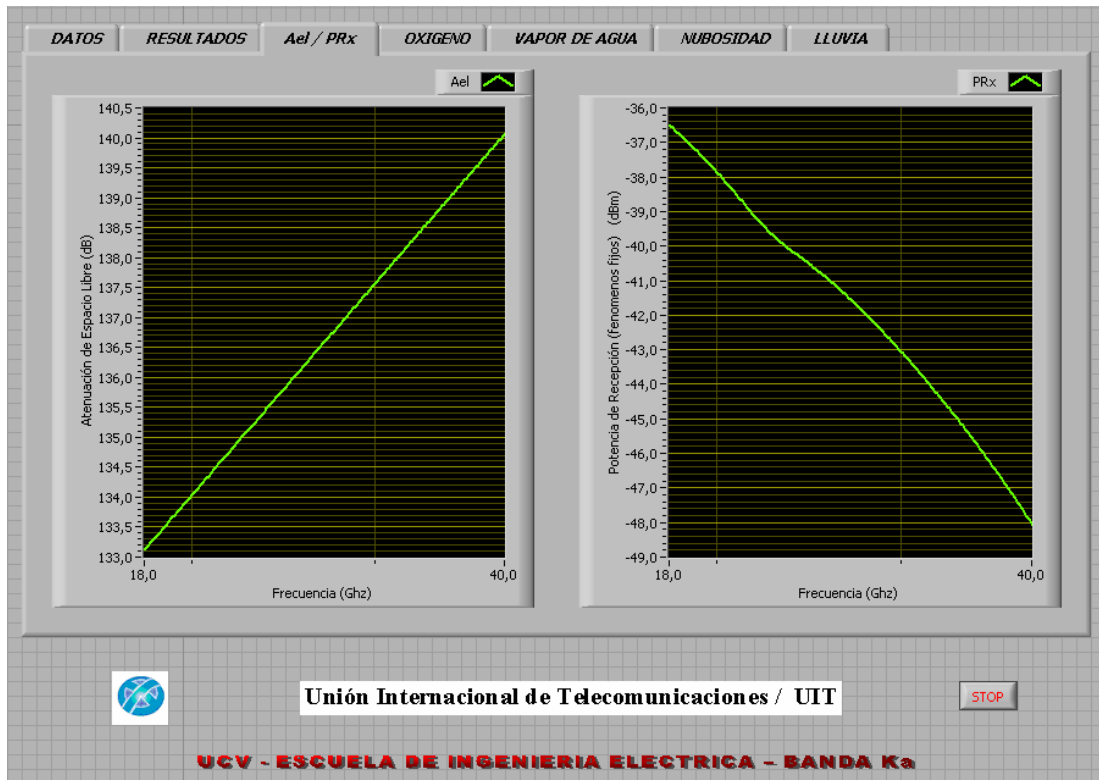


FIGURA No. 8 Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de Ael/PRx

De la curva correspondiente a la atenuación de espacio libre observamos como esta aumenta linealmente conforme se incrementa la frecuencia. Esto corresponde con la disminución que se aprecia en la curva de potencia de recepción, la cual decreta para frecuencias mayores. Esto genera como consecuencia, una exigencia cada vez mayor a los equipos del radioenlace en términos de la potencia de transmisión, ganancia de las antenas y los márgenes de recepción umbrales, lo cual se traduce en costos mas elevados.

Pestaña No. 4 Gráficos correspondientes a la atenuación específica debida al oxígeno (dBm/Km) y a la atenuación total debida al oxígeno (dB) en la banda K_a , para los datos especificados.

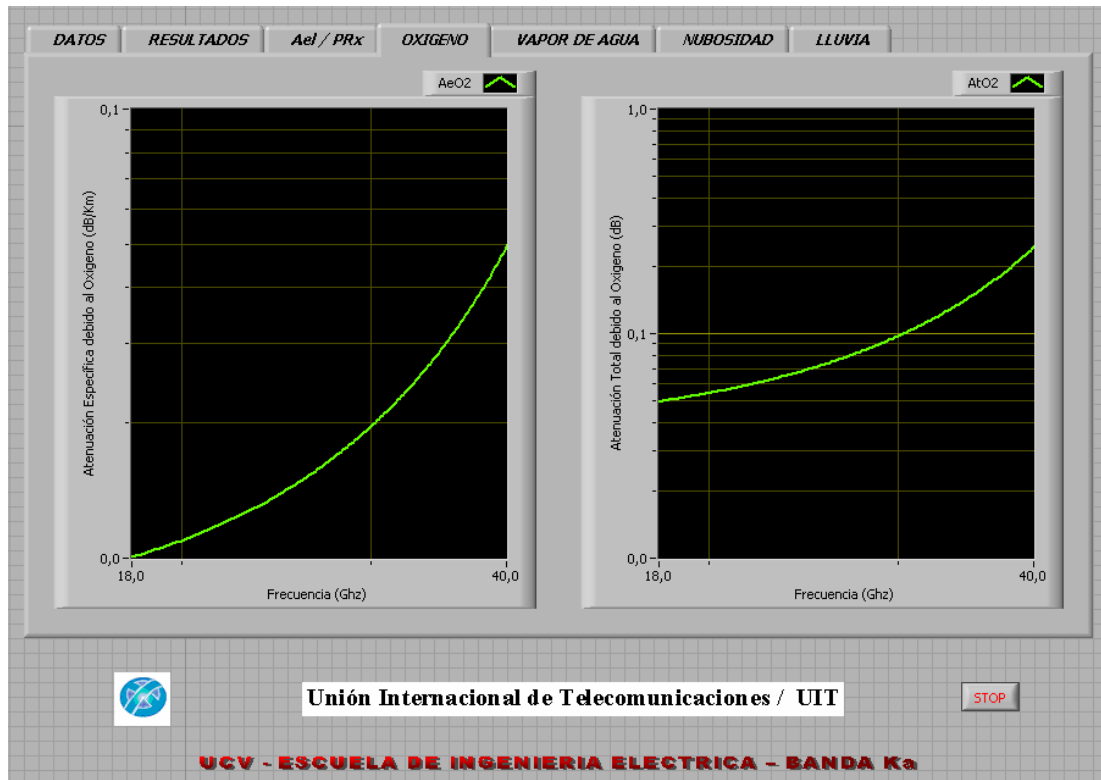


FIGURA No. 9 Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de OXIGENO

Estas curvas se generan según el método de predicción propuesto por la UIT según la recomendación UIT-R P.676-5 “Atenuación debida a los gases atmosféricos”.

Puede observarse para el caso del oxígeno, que este introduce muy bajos niveles de atenuación en la banda Ka. Además, se aprecia como a medida que aumenta la frecuencia también se incrementa la atenuación en la propagación debido a este factor. Este aumento es no lineal, presentando la mayor contribución en los valores de frecuencia mas elevados. Estas curvas variarán en cantidades numéricas

dependiendo de los datos introducidos para algún caso específico, sin embargo, tiende a mantenerse la forma o espécimen de la curva.

Pestaña No. 5 Gráficos correspondientes a la atenuación específica debida al vapor de agua (dBm/Km) y a la atenuación total debido al vapor de agua (dB) en la banda K_a , para los datos especificados.

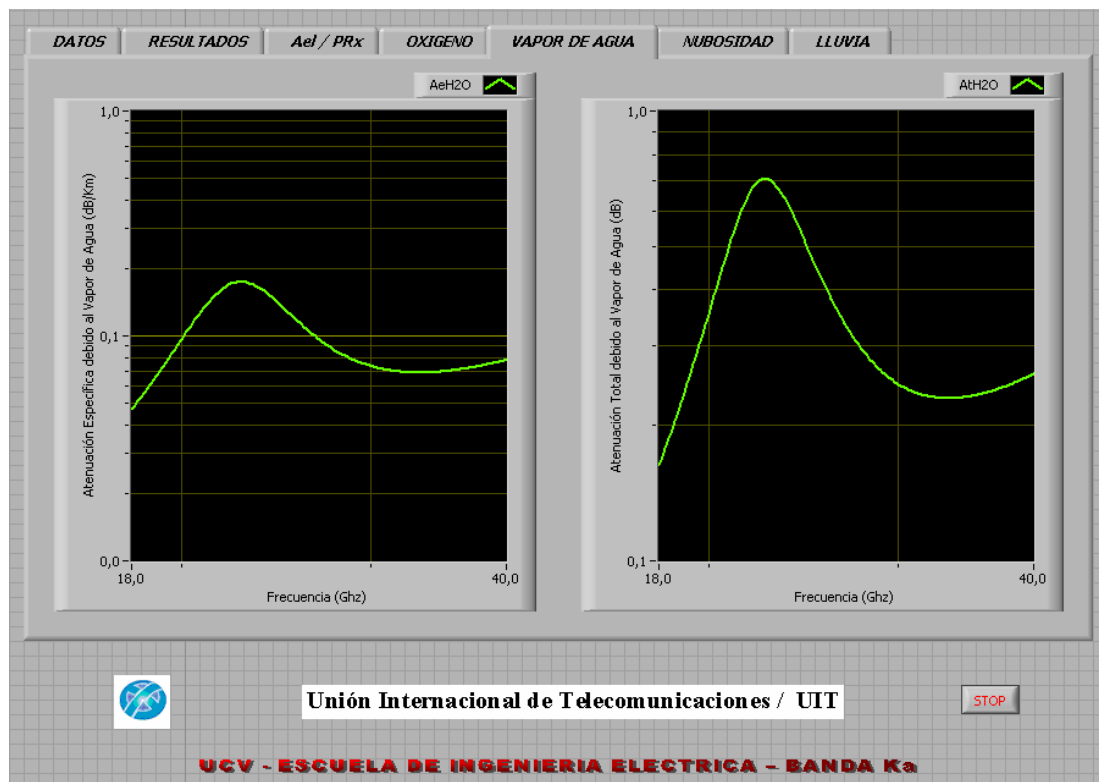


FIGURA No. 10 Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de VAPOR DE AGUA

Estas curvas se generan según el método de predicción propuesto por la UIT según la recomendación UIT-R P.676-5 “Atenuación debida a los gases atmosféricos”.

Puede observarse para el caso del vapor de agua, que este introduce bajos niveles de atenuación en la banda Ka. Conforme varía la frecuencia también varía la

atenuación en la propagación debido a este factor. Esta variación es no lineal, presentando la mayor contribución alrededor de un pico de resonancia que se aprecia en el intervalo de los 22 GHz. Estas curvas variarán en cantidades numéricas dependiendo de los datos introducidos para algún caso específico, sin embargo, tiende a mantenerse la forma o espécimen de la curva.

Pestaña No. 6 Gráficos correspondientes al coeficiente de atenuación específica, Kl ((dB/Km)/(g/m³)) y a la atenuación total debida a la nubosidad (dB) en la banda K_a , para los datos especificados.

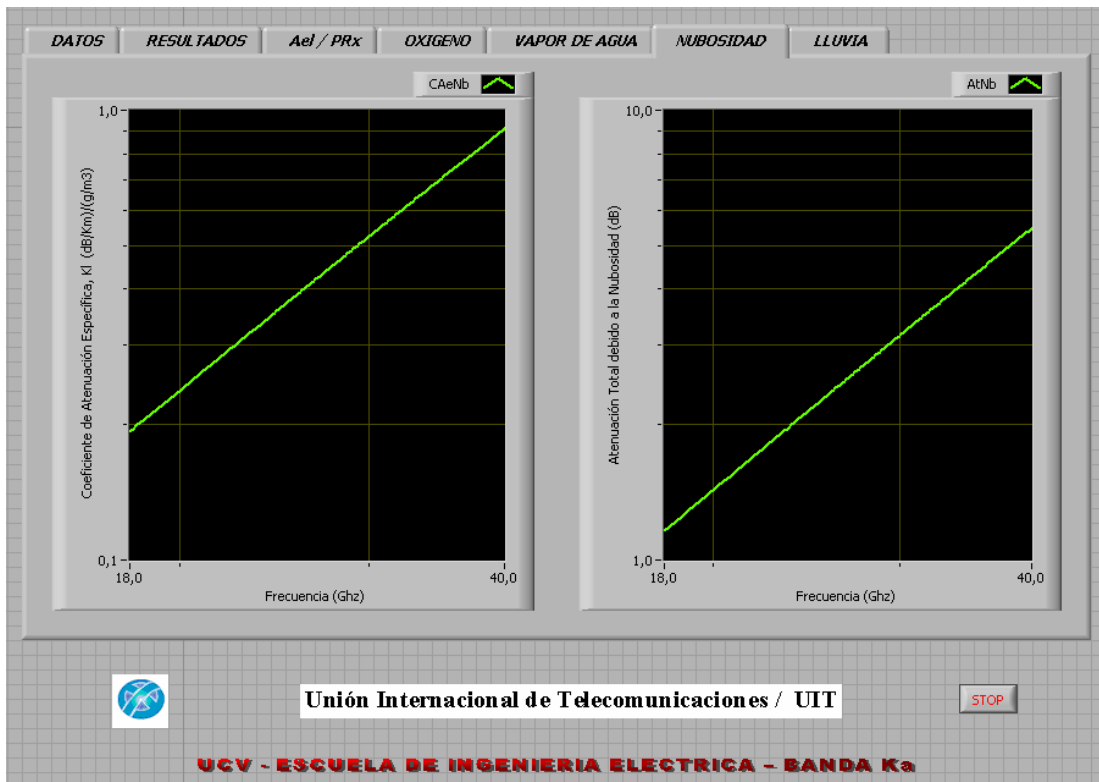


FIGURA No. 11 Ambiente de Simulador Ka.exe pestaña de NUBOSIDAD

Estas curvas se generan según el método de predicción propuesto por la UIT según la recomendación UIT-R P.840-3 “Atenuación debida a las nubes y a la niebla”.

Puede observarse para la nubosidad, que esta introduce niveles medios de atenuación en la banda Ka. Además, se aprecia como a medida que aumenta la frecuencia se incrementa la atenuación en la propagación debido a este factor. Este aumento se aprecia lineal, presentando la mayor contribución en los valores de frecuencia mas elevados. Estas curvas variarán en cantidades numéricas dependiendo de los datos introducidos para algún caso específico, sin embargo, tiende a mantenerse la forma o espécimen de la curva.

Pestaña No. 7 Gráficos correspondientes a la atenuación específica debida a la lluvia (dBm/Km) y a la atenuación total debida a la lluvia (dB) en la banda K_a , para los datos especificados.

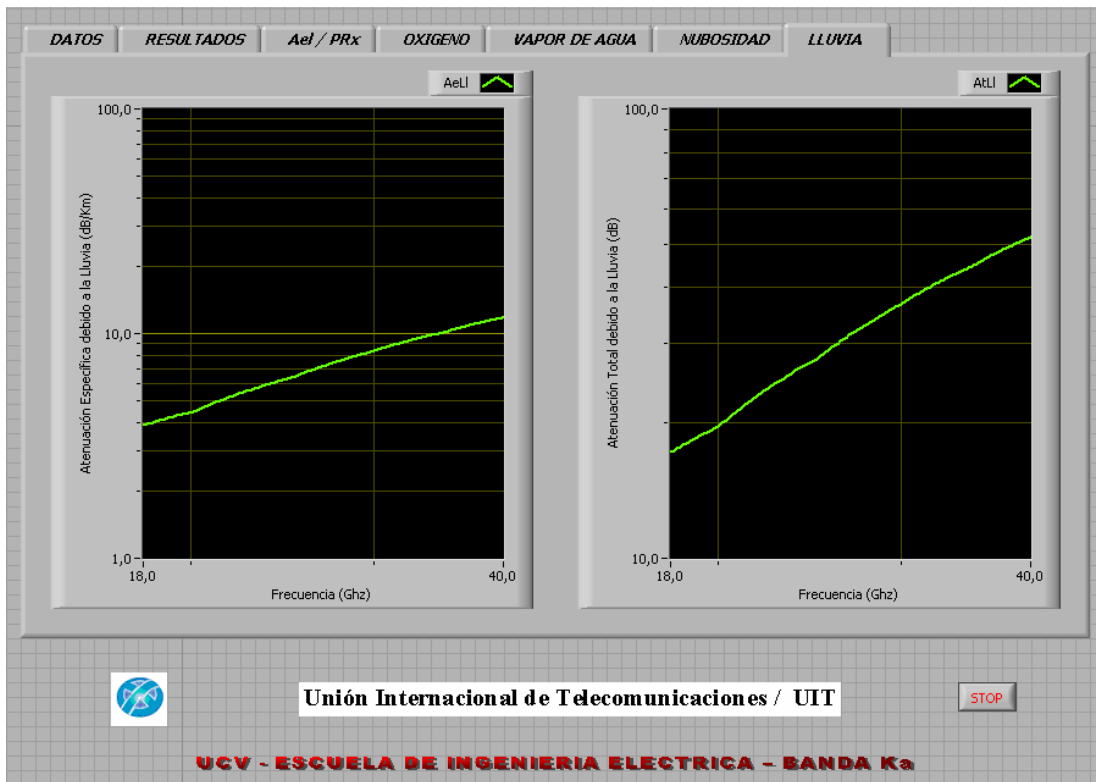


FIGURA No. 12 Ambiente de SimuladorKa.exe pestaña de LLUVIA

Estas curvas se generan según el método de predicción propuesto por la UIT según las recomendaciones: UIT-R P.530-10 “Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa”, UIT-R P.837-3 “Características de la precipitación para establecer modelos de propagación”, UIT-R P.838-1 “Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción”.

Puede observarse para el caso de la lluvia, que esta introduce elevados niveles de atenuación para estos valores de frecuencia. Se considera que es el principal factor de atenuación en radioenlaces por encima de los 18 GHz. Esto debido a que nuestra ubicación geográfica se encuentra en un emplazamiento de alto contenido pluviométrico. Además, se aprecia como a medida que aumenta la frecuencia también se incrementa la atenuación en la propagación debido a este factor. Este aumento se aprecia no lineal, presentando la mayor contribución en los valores de frecuencia mas elevados.

La polarización de las antenas es preponderante, ya que es notable que las ondas de polarización horizontal, sufren mayores atenuaciones que las polarizadas verticalmente, esto se debe a que las gotas de lluvia generalmente son como óvalos alargados que se encuentran alineados con ejes de rotación vertical.

Estas curvas variarán en cantidades numéricas dependiendo de los datos introducidos para algún caso específico, sin embargo, tiende a mantenerse la forma o espécimen de la curva.

3.3) Simulador ITM del Modelo de Terreno Irregular

(Basado en el Institute for Telecommunication Sciences ITS)

A fin de predecir la atenuación de referencia A_{ref} , debido a las irregularidades del terreno y las variabilidades, que nos garanticen una confianza y disponibilidad determinada, podemos implementar el simulador **ITM.exe**.

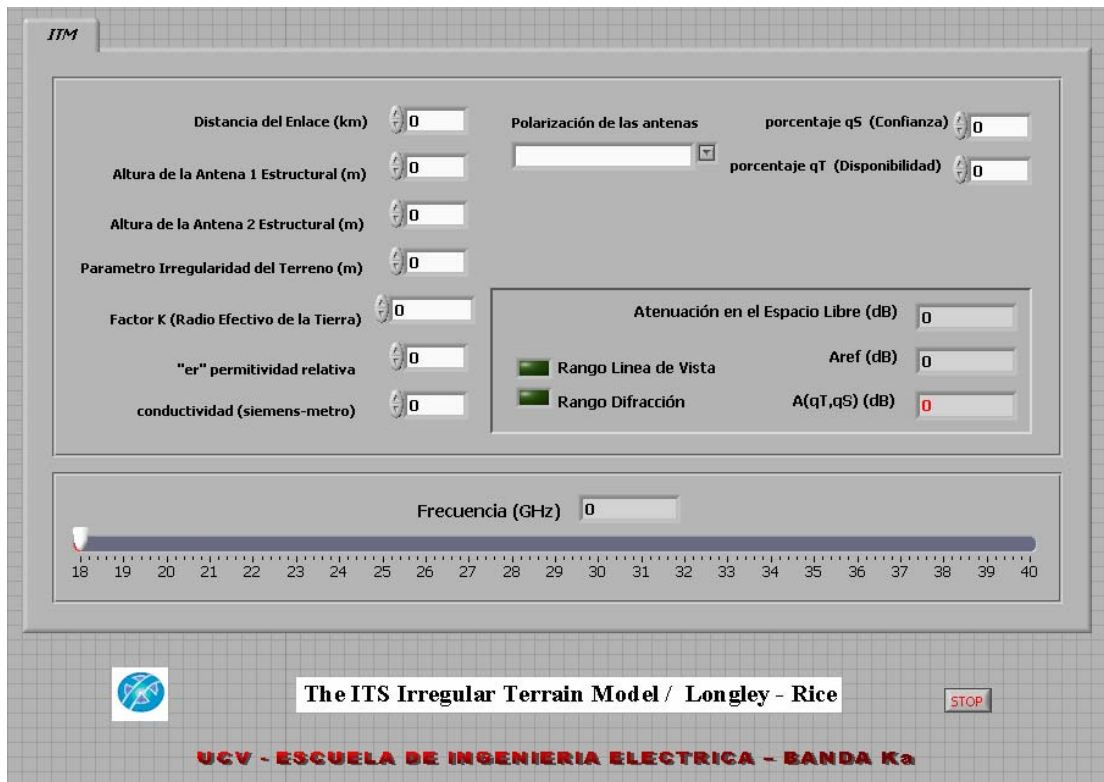


FIGURA No. 13 Ambiente de ITM.exe

El usuario debe introducir los siguientes datos:

Distancia del Enlace (Km): Se refiere a la distancia en kilómetros que tendrá que viajar la onda electromagnética desde el transmisor hasta el receptor. Para esta banda de frecuencias la transmisión tiene lugar en términos de **distancias cortas**, por lo tanto se sugieren intervalos en torno a los **2-7 kilómetros**.

Alturas Estructurales de las Antenas 1 y 2 (m): Se refiere a las alturas de las antenas en los dos puntos de emplazamiento en metros, contados a partir de la superficie terrestre, donde 1 corresponde al transmisor y 2 al receptor.

Parámetro de Irregularidad del Terreno (m): Este parámetro lo determina el usuario de la geometría del perfil. Se requiere determinar una valoración apropiada de la irregularidad del terreno del trayecto, en la zona de reflexión (Ver ejemplo Capítulo IV).

Factor K (Radio Efectivo de la Tierra): En Venezuela se ha hallado, que el valor normal es de “3/2”. Sin embargo, se recomienda diseñar con un valor típico de “4/3” (1.333). Una curvatura eficaz de la tierra de 4/3 corresponde a un valor superficial de la refractividad de aproximadamente 301 N-unidades.

Permitividad Relativa y Conductividad: Se determinan de la tabla No.3

TABLA No. 3 Valores típicos para ϵ y σ .⁹

<i>Tipo de Terreno</i>	<i>ϵ</i>	<i>σ</i>
Tierra media	15	0.005
Tierra pobre	4	0.001
Buena tierra	25	0.020
Agua dulce	81	0.010
Agua de mar	81	5.000

⁹ www.softwright.com/faq/engineering/prop_longley_rice.html

Porcentajes qS y qT : Se refieren a los grados de confianza y disponibilidad, respectivamente, deseados por el usuario para calcular la atenuación por la variabilidad.

Polarización de las Antenas: Se debe determinar el tipo de polarización de las antenas a utilizar para la transmisión, siendo las opciones: Vertical y Horizontal.

Frecuencia (GHz): Se refiere a la frecuencia de la onda portadora en GHz, donde la banda es la denominada K_a .

El simulador da como resultados, la atenuación correspondiente al espacio libre (dB), y su mediana atenuación relativa A_{ref} (atenuación de referencia) debida a las irregularidades del terreno en el trayecto. Además, proporciona la distribución acumulativa bidimensional de la atenuación en cuanto a la variabilidad del tiempo y la situación. Esta viene dada por el cuantil $A(qT, qS)$. Uno dice: con la confianza de qS de probabilidad, la atenuación no excederá $A(qT, qS)$ por lo menos qT del tiempo.

3.4) Interfaz de usuario de software y adquisición de datos

Se utilizó el ambiente de programación *LabVIEW 7 Express* de *NATIONAL INSTRUMENTS*, para crear una interfaz de usuario de software denominada: **TiempoReal.exe**, que permite visualizar en tiempo real el comportamiento de la potencia de recepción de un enlace de microondas en la banda Ka, así como los diferentes fenómenos meteorológicos que le afectan. Además, permite realizar la adquisición de estos datos durante un periodo indefinido de tiempo. LabVIEW permite que la adquisición de los datos pueda realizarse a través del puerto Serial o del puerto Ethernet del computador, lo cual podrá definirse e implementarse con la presencia física de los equipos de radio. Para el desarrollo de

esta interfaz de usuario, debido a no poseer el instrumento a comunicar se establecieron como señales de entradas, señales simuladas por el mismo software. Sin embargo, la interfaz permite la expansión y adaptación con instrumentos a posteriori. En un proceso como el que se describe, las adquisiciones de datos se realizan en instantes específicos de tiempo, en este caso cada 5 segundos. Los datos son guardados automáticamente en disco duro, en archivos *.lvm que pueden ser abiertos como block de notas. A cada archivo creado se le asigna un nombre único. La dirección de ubicación de estos archivos es: “Mis documentos/ LabVIEW Data”.

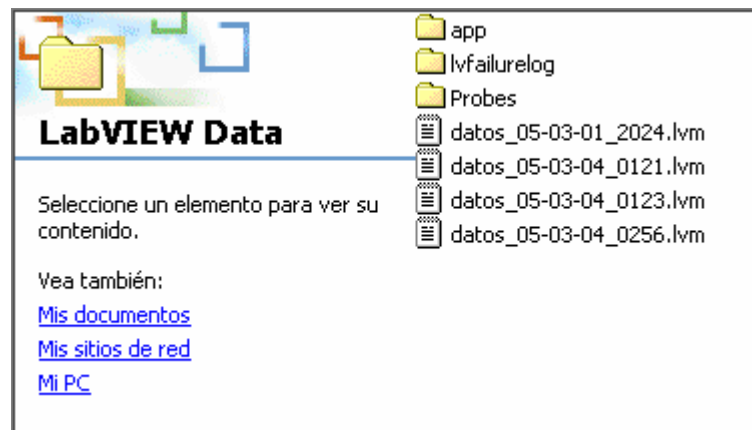


FIGURA No. 14 Carpeta de almacenamiento de los archivos generados

Como puede observarse, los archivos son almacenados, desde el momento que se inicia la adquisición de los datos, con el nombre:

datos_AA-BB-CC_DDEE.lvm

donde:

AA: corresponde a los dos últimos dígitos del año. Por ejemplo, 05 para el año 2005.

BB: corresponde al mes en numero. Por ejemplo, 03 para el mes de Marzo.

CC: corresponde al día.

DD: corresponde a la hora, en la forma de 01 a 24.

EE: corresponde al minuto.

Si no se interrumpe la ejecución, el programa cierra automáticamente el archivo donde está almacenando, todos los días a las 12 de la noche y genera un nuevo archivo *.lvm con el nuevo nombre correspondiente. La realización de esta interfaz de usuario de software, yace pensando en la creación de una base de datos con registros de la potencia recibida y mediciones meteorológicas en sistemas punto a punto de transmisión por radio en la banda Ka durante un periodo indefinido de tiempo. Los archivos *.lvm almacenan los datos de la siguiente manera:

HORA	MINUTO	SEGUNDO	POTENCIA DE RX (dBm)	PRESION ATMOSFERICA (hPa)	TEMPERATURA (°C)	INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/h)	COLUMNA TOTAL DE AGUA (Kg/m2)
2.000000	56.000000	15.000000	-48.244295	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	56.000000	20.000000	-40.978870	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	56.000000	25.000000	-40.978870	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	56.000000	30.000000	-48.244295	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	56.000000	35.000000	-60.000000	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	56.000000	40.000000	-71.755705	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	56.000000	45.000000	-79.021130	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	56.000000	50.000000	-79.021130	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	56.000000	55.000000	-71.755705	1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	57.000000	0.000000		1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	57.000000	5.000000		1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000
2.000000	57.000000	10.000000		1013.000000	20.000000	50.000000	1.000000

FIGURA No. 15 Contenido de los archivos generados

Utilizar **TiempoReal.exe** es muy sencillo, ya que no requiere de ninguna instrucción o entrada del usuario. Sin embargo, debe realizarse algunos preparativos previos para su buen funcionamiento. Primeramente debe instalarse en el equipo PC el RUN-TIME de *LabVIEW 7*, **lvruntimeeng.msi**, que viene en el disco junto al software. También se requiere una configuración de pantalla de 1024 x 768 píxeles. Usualmente, se destina un PC preparado y conectado con el equipo de radio para dejar en el lugar donde se realizaran las adquisiciones de los datos. Cuando **TiempoReal.exe** es ejecutado, el usuario podrá observar la interfaz de software. Esta se describe a continuación:

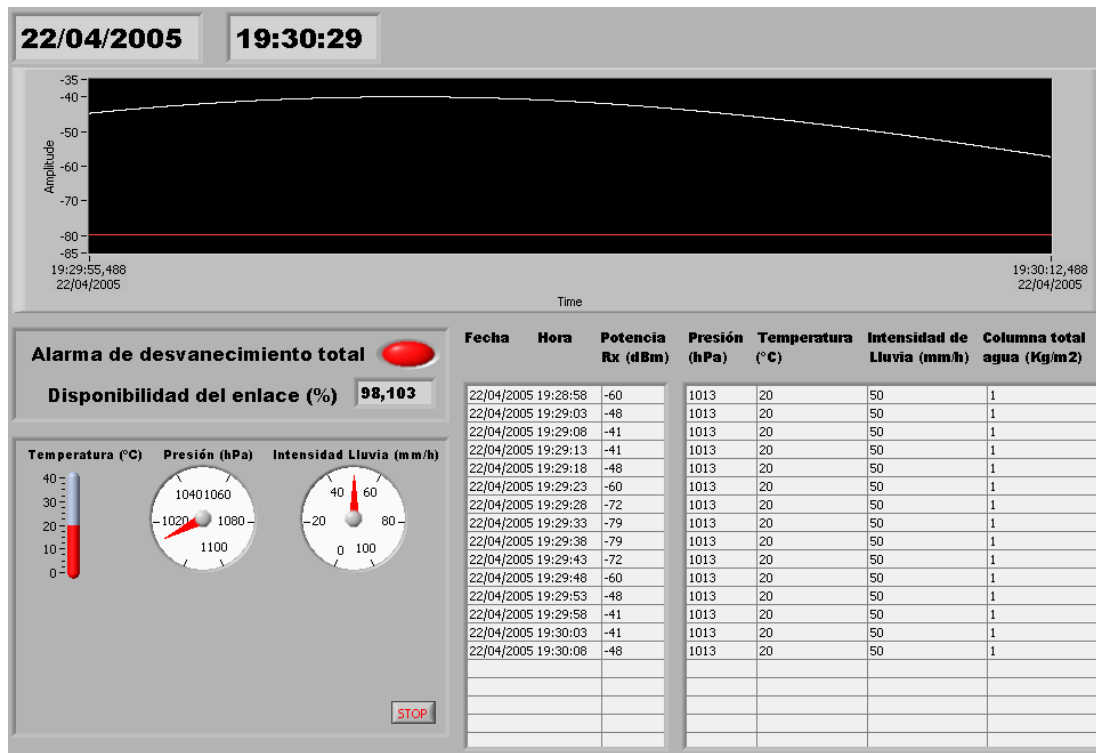


FIGURA No. 16 Ambiente de TiempoReal.exe

En la esquina superior izquierda, puede observarse la fecha y hora en tiempo real, la cual se obtiene de la configurada en la computadora. Es sumamente importante, que esta información sea la correcta ya que es este dato el que se tomara para la adquisición.

La onda de color blanco, corresponde a los niveles de potencia recibidos medidos en dBm para cada momento en tiempo real. El nivel rojo, corresponde a la potencia umbral o sensibilidad del equipo receptor. Cuando, la onda blanca supera el umbral establecido por el nivel rojo, se enciende automáticamente una señal de alarma de color rojo, lo cual indica que hubo un desvanecimiento total de la transmisión. Esta alarma permanecerá encendida para aviso al usuario, el cual la podrá apagar haciendo click derecho con el mouse sobre ella, y seleccionando *“Reinitialize to Default Value”*. Esto le permitirá al usuario revisar el historial de

datos, para determinar las magnitudes de las variables meteorológicas involucradas para el momento del desvanecimiento.

También puede observarse la disponibilidad del enlace en porcentaje. Este será de 100 % mientras la onda roja no supere el nivel umbral rojo. Inmediatamente, exista algún desvanecimiento de la transmisión, se comenzará a tener el valor correspondiente de la disponibilidad hasta ese momento. Al cabo de un año sin interrupciones, estaremos en capacidad de determinar la disponibilidad del enlace, según la denominada “*p% del año medio*” según la UIT.

Para detener la ejecución se acciona el botón *STOP*, y aparecerá un mensaje de confirmación:

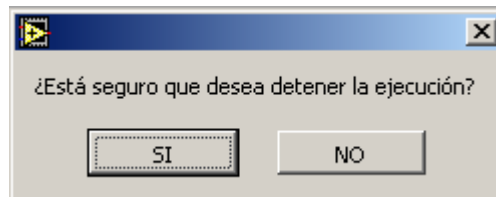


FIGURA No. 17 Mensaje de confirmación para detener la ejecución de TiempoReal.exe

CAPITULO IV

4) Ejemplo de la aplicación de los simuladores para la predicción

Dado un enlace de microondas, en la banda Ka, específicamente en la frecuencia de **26 GHz**, desde la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V. hasta una ubicación en el cerro el Ávila, según se muestra en la figura. Donde se desea un enlace confiable, con una disponibilidad del 99,9%. Las coordenadas geográficas de los sitios corresponden a:

E.I.E. 10° 29' 23" Latitud Norte
66° 53' 19" Longitud Oeste

Ávila 10° 32' 29,4' Latitud Norte
66° 52' 40,5' Longitud Oeste

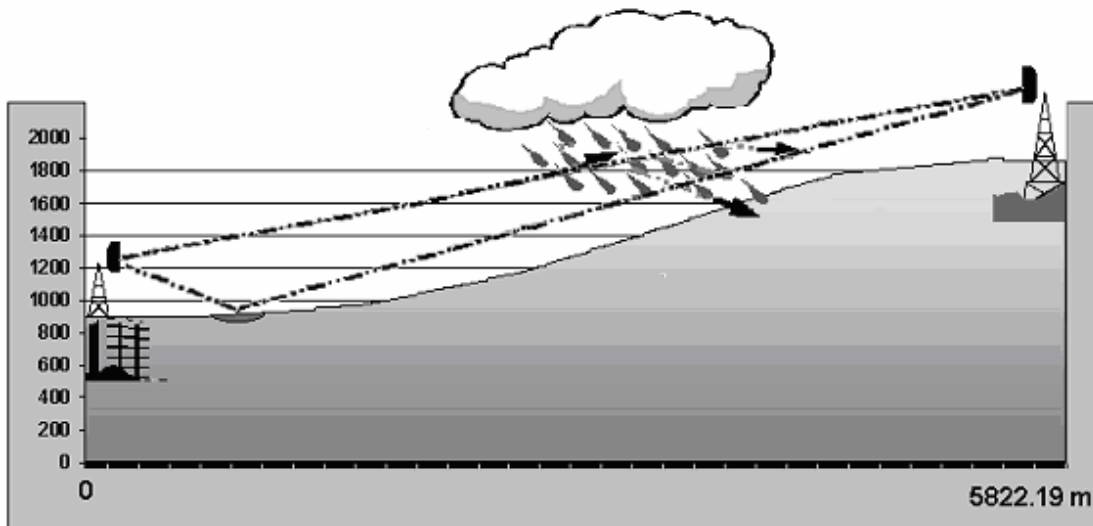


FIGURA No. 18 Representación de un enlace de microondas, perfil E.I.E.-Ávila

La distancia del enlace es de 5,9 Km.

La altura del sitio (E.I.E.) es de 896 m.s.n.m.

La altura del sitio (Ávila) es de 1861 m.s.n.m.

La altura estructural de la antena en el sitio (E.I.E) es de 16 m.

La altura estructural de la antena en el sitio (Ávila) es de 6 m.

La polarización de las antenas es Vertical.

La permitividad relativa se considera para tierra media, y es 15.

La conductividad se considera para tierra media, y es 0.005 Siemens.

Determinamos la distancia a la cual se encuentra el punto de reflexión desde la antena de transmisión , mediante la ecuación:

$$d_1 = \frac{d}{2} \frac{1 + \frac{2h_1(h_1 + h_2)}{\lambda d}}{1 + \frac{(h_1 + h_2)^2}{\lambda d}}$$

$$d_1 = \left(\frac{5822.19}{2} \right) \frac{\left(1 + \frac{2 \cdot 16 \cdot (16 + 971)}{3 \cdot 10^8} \right) \frac{5822.19}{26 \cdot 10^9}}{\left(1 + \frac{(16 + 971)^2}{3 \cdot 10^8} \right) \frac{5822.19}{26 \cdot 10^9}} = 94.57m$$

Determinamos el eje mayor (X) de la zona de reflexión, mediante la ecuación:

$$X = d \frac{\sqrt{1 + \frac{4h_1h_2}{\lambda d}}}{1 + \frac{(h_1 + h_2)^2}{\lambda d}}$$

$$X = 5822.19 \frac{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot 16 \cdot 971}{3 \cdot 10^8}}}{1 + \frac{(16 + 971)^2}{3 \cdot 10^8}} \frac{5822.19}{5822.19} = 12.21m$$

Se observa claramente la alta directividad de las antenas, ya que para valores de frecuencia en la banda Ka, la zona de reflexión es bastante pequeña.

De los datos del perfil, se toman los valores correspondientes a esta zona del área de reflexión $\left(94.57 - \frac{12.21}{2}, 94.57 + \frac{12.21}{2}\right) = (88.46m, 100.68m)$. Se consideran los puntos del perfil que están separados uniformemente:

TABLA No. 4 Puntos de elevación del perfil en la zona de reflexión

distancia (m)	altura (m.s.n.m.)
88,46	896
89,682	896
90,904	896
92,126	896
93,348	896
94,57	896
95,792	897
97,014	897
98,236	897
99,458	897
100,68	897

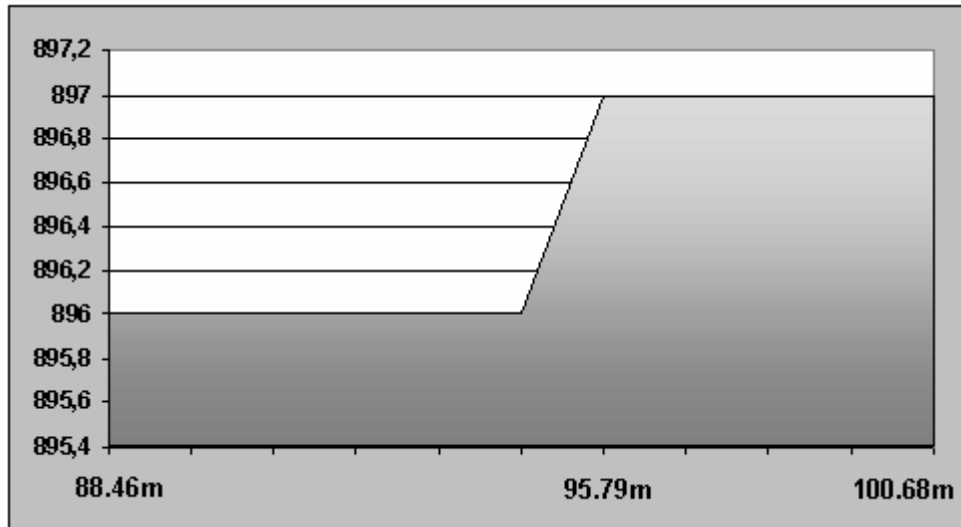


FIGURA No. 19 Representación del perfil en la zona de reflexión

De la ecuación (31), tenemos:

$$h_a = \frac{1}{10 + 1} ((896)6 + (897)5) = 896.4545 \text{ m}$$

De la ecuación (30), tenemos: $m = 0.11159 \text{ m/Km}$.

De la ecuación (32), tenemos:

$$h_{st} = 896.4545 - 0.11159 \left(\frac{12.22}{2} \right) = 895.77 \text{ m}$$

De la ecuación (29) tenemos:

$$h_{si} = 895.77 + 0.11159(0.01222) = 895.771 \text{ m.s.n.m.}$$

El parámetro de irregularidad del terreno, Δh (m), es la altura máxima del terreno correspondiente a la superficie de tierra lisa, en la sección del trayecto, es decir, $\Delta h = 897 - 895.771 = 1.2286 \text{ m}$

Utilizamos la herramienta: *Simulador para la caracterización de los parámetros atenuación y desvanecimiento de señales radioeléctricas propagadas en*

la banda Ka. (Basado en la UIT), para predecir las pérdidas debidas a la propagación, específicamente aquellas producto de la atenuación atmosférica e hidrometeorológicos. Se entran datos asociados a las condiciones ambientales mas desfavorables en la zona, y a la disponibilidad deseada de 99.9%.

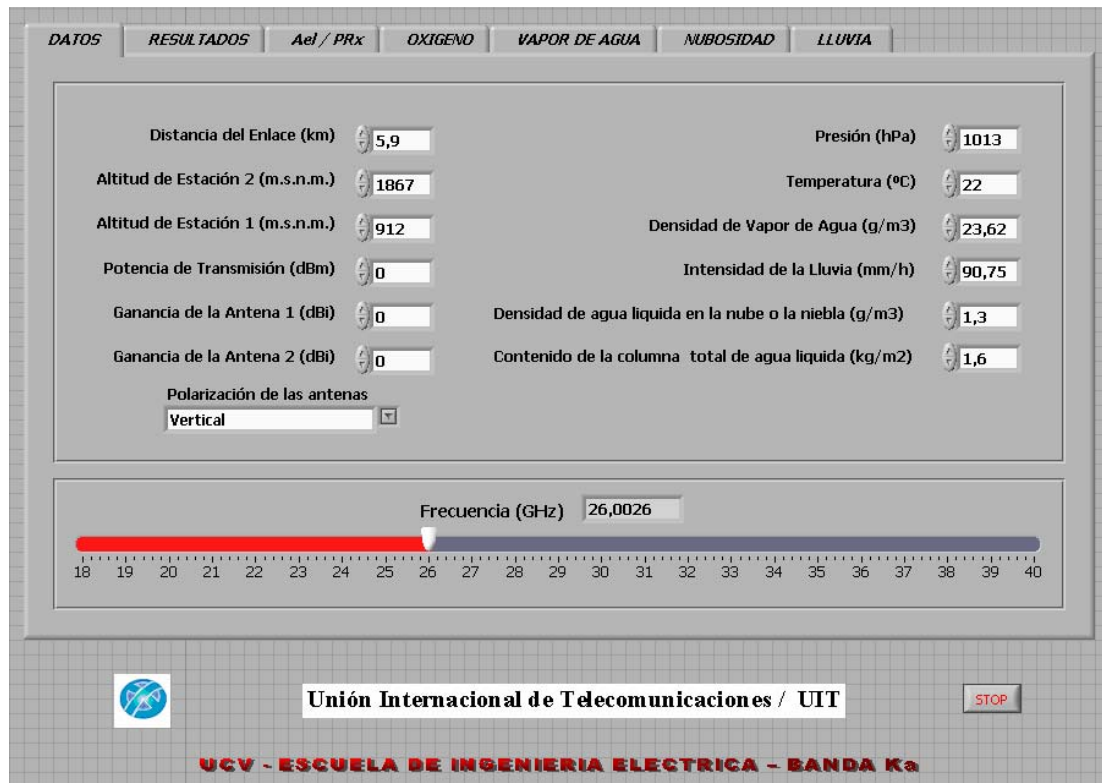


FIGURA No. 20 Ejemplo de SimuladorKa.exe pestaña de DATOS

Observe, que no se introducen datos de los equipos, esto se debe a que primeramente estamos estimando las pérdidas debido a la propagación, para luego tener una idea de los requisitos en cuanto a ganancia deben cumplir los equipos que conformarán el enlace de microondas, es decir, transmisor – receptor y antenas.

Se considera un evento fuerte de lluvia que cumple con la norma de la UIT de 99.99% de disponibilidad para la región, y se asume una temperatura la mas baja en

promedio de la región, lo cual incrementa la atenuación debido a la nubosidad y gases atmosféricos.



FIGURA No. 21 Ejemplo de SimuladorKa.exe pestaña de RESULTADOS

Se observa como se predicen atenuaciones, que ascienden hasta los **185,207** dB, siendo estas:

Atenuación en el Espacio Libre = **136.167** dB

Atenuación debido al Oxígeno = **0.066** dB

Atenuación debido al Vapor de Agua = **1.0423** dB

Atenuación debido a la Nubosidad = **3.3665** dB

Atenuación debido a la Lluvia = **44.5649** dB

Observamos como definitivamente, las pérdidas por hidrometeoros, específicamente la lluvia, son las mas significativas en la transmisión de ondas milimétricas.

Ahora utilizamos la herramienta: *Simulador ITM del Modelo de Terreno Irregular (Basado en el ITS)*, para predecir la Atenuación de Referencia debido a las irregularidades del terreno y las variabilidades, que nos garanticen una confianza de 99% y una disponibilidad de 99,9%.

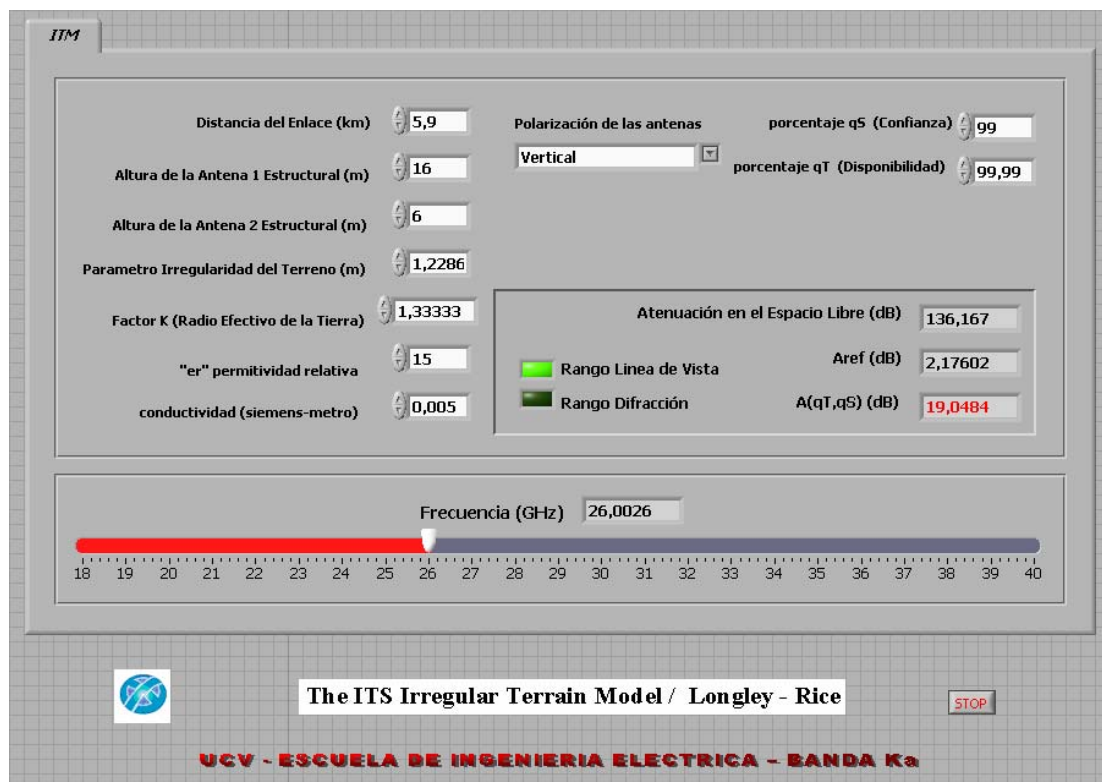


FIGURA No. 22 *Ejemplo de ITM.exe*

Se muestra que el trayecto es definitivamente **línea de vista**, libre del efecto de la difracción. Además se predicen pérdidas debido a la variabilidad igual a

19.0484 dB, esto nos da una banda de resguardo ante variaciones de refractividad de la atmósfera, vegetación, edificaciones, reflexiones, etc.

En definitiva se predicen pérdidas en la propagación que ascienden hasta los **204.2554 dB**, a fin de garantizar una alta confiabilidad y una disponibilidad de 99,99%.

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

Las aplicaciones que se han desarrollado en este proyecto: **SimuladorKa.exe**, **ITM.exe** y **TiempoReal.exe**, resultan ser de gran utilidad para la caracterización de señales radioeléctricas, en cuanto a las pérdidas de potencia que estas sufren en la transmisión de ondas milimétricas, específicamente en la banda de frecuencias Ka. Los simuladores desarrollados nos permiten cuantificar las pérdidas existentes en un radioenlace debido a distintos factores, utilizando los modelos de predicción disponibles de las fuentes *UIT* e *ITS*. Una interfaz de usuario de software donde podamos visualizar el nivel de potencia de un radioenlace en la banda Ka, y además, las condiciones ambientales existentes simultáneamente, en tiempo real, nos permitirá caracterizar la atenuación real en la propagación de la señal.

Adicionalmente, se puede indicar:

- 1) El factor que introduce mayores pérdidas en la propagación en la banda de frecuencias Ka, es la lluvia.
- 2) La atenuación será menor ante un posible evento de lluvia, si se utiliza una polarización de tipo vertical para la transmisión..
- 3) La transmisión de ondas milimétricas es una tecnología de banda ancha. Ya que ofrecen importantes ventajas en términos de ancho de banda y bajo nivel de saturación del espectro,
- 4) En vista de que las pérdidas básicas de transmisión aumentan considerablemente con la frecuencia y la distancia, se recomienda enlaces cuyas longitudes deberían ser cortas, que no sobrepasen los 7 Km.

- 5) El uso masivo de la transmisión de ondas milimétricas, impulsará avances importantes en el desarrollo de los equipos de radio.

- 6) Se recomienda, la implementación de la aplicación **TiempoReal.exe** en un enlace de microondas en la banda Ka, estableciendo un sistema de monitoreo conformado por un PC conectado al equipo de radio y a las variables meteorológicas involucradas junto con la interfaz de usuario de software, a fin de adquirir datos reales, y así validar los métodos de predicción descritos.

- 7) La incorporación de los software: **SimuladorKa.exe**, **ITM.exe** y **TiempoReal.exe**, para su utilización en laboratorios, tanto a nivel de pregrado como de postgrado, resultará ser de gran utilidad académica para el estudio de la banda de frecuencias Ka y de la caracterización de señales radioeléctricas, en cuanto a las pérdidas de potencia que estas sufren en la transmisión de ondas milimétricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Recomendación UIT-R P.310-9. *Definición de términos relativos a la propagación en medios no ionizados.*
- [2] Recomendación UIT-R V.431-7. *Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones.*
- [3] Freeman, Roger L. *Telecommunication Transmisión Handbook* . New York. A Wiley – Interscience Publication.
- [4] Carlson, A. Bruce *Sistemas de Comunicación*. McGRAW-HILL.
- [5] Recomendación UIT-T G.701 *Vocabulario de términos relativos a la transmisión y multiplexación digitales y a la modulación por impulsos codificados.*
- [6] Recomendación UIT-R PN.525-2. *Calculo de la atenuación en el espacio libre.*
- [7] Recomendación UIT-R P.676-5. *Atenuación debida a los gases atmosféricos.*
- [8] Recomendación UIT-R P.836-2. *Vapor de agua: densidad en la superficie y contenido de columna total.*
- [9] Recomendación UIT-R P.840-3. *Atenuación debida a las nubes y a la niebla.*
- [10] Recomendación UIT-R P.837-3. *Características de la precipitación para establecer modelos de propagación.*
- [11] Recomendación UIT-R P.838-1. *Modelo de la atenuación especifica debida a la lluvia para los métodos de predicción.*
- [12] Recomendación UIT-R P.530-10. *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa.*
- [13] Recomendación UIT-R P.452-10. *Procedimiento de predicción para evaluar la interferencia en microondas entre estaciones situadas en la superficie de la tierra a frecuencias superiores a unos 0.7 GHz.*

- [14] George, Hufford. *The Irregular Terrain Model, versión 1.2.2 The Algorithm*. National Telecommunications and Information Administration (NTIA), Institute for Telecommunication Sciences (ITS).
- [15] *The “Definitive” representation of the Irregular Terrain Model, Updated 5 August 2002*. National Telecommunications and Information Administration (NTIA), Institute for Telecommunication Sciences (ITS).

INTERNET

- www.itu.int
- www.monografias.com/trabajos13/guiadeim/guiadeim.shtml
- www.conatel.gov.ve
- www.softwright.com/faq/engineering/prop_longley_rice.html
- www.flattop.its.bldrdoc.gov/itm/itm.pdf
- www.flattop.its.bldrdoc.gov/itm/itm_alg.pdf
- www.harris.com