



Universidad Nacional de Misiones



Facultad de Ingeniería
OBERÁ

Facultad de Ingeniería de Oberá

Carrera de Ingeniería Electrónica

Materia:

Propagación y Antenas (ET-444)

Actividad:

Trabajo Final Integrador

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE CÁLCULO DE RADIOENLACES

Autor:

KOLOSWKI, Facundo Nicolas

Docentes responsables:

GARASSINO, Sergio Alberto

MENDOZA, Horacio Aurelio

SEBELY, José Guillermo

Año 2022

Índice

1. Introducción teórica	3
1.1. La propagación de ondas	3
1.2. Acerca de la troposfera y su índice de refracción	5
1.2.1. La refracción electromagnética	6
1.3. Geometría del trayecto respecto del suelo	7
1.4. Propagación por difracción	11
1.4.1. Zona de Fresnel	11
1.4.2. Cálculo de los radios de Fresnel	12
1.4.3. Difracción en obstáculos	13
1.5. Dispersión de Rayleigh (<i>scattering</i>)	13
1.6. Propagación por dispersión troposférica	14
1.6.1. Recepción con diversidad	14
1.7. Fading	14
1.8. Radiocomunicación transhorizonte	15
1.8.1. Influencia de la ubicación de las estaciones	15
2. Consideraciones de diseño	15
2.1. Primera Zona de Fresnel	16
2.2. Atenuación de espacio libre	16
2.3. Atenuación por difracción	17
2.4. Atenuación por vegetación	19
2.5. Atenuación por gases y vapores atmosféricos	20
2.6. Atenuación por lluvia	21
2.7. Atenuación por Fading	22
2.8. Ecuación del enlace	23
2.8.1. Sensibilidad en el receptor	23
2.8.2. La ecuación	24
2.9. De las alturas de las antenas	25
2.10. Del método en síntesis	25
2.11. Recomendación UIT-R P.617-5 (vigente): Datos de propagación y técnicas de predicción necesarios para el diseño de sistemas de radioenlaces transhorizonte	26
2.11.1. Distribución de la pérdida de transmisión debida a la dispersión troposférica	26
3. Análisis de aplicaciones comerciales	26
3.1. ISP Design Center de la empresa tecnológica Ubiquiti Inc.	26
3.2. LinkCalc de LigoWave	28
4. Estado del arte	30
5. Conclusiones	34

Objetivos

El objetivo principal del trabajo final integrador es, obtener una visión integral sobre las competencias específicas esperadas en un alumno al finalizar el cursado de las mismas. Si bien estas fueron presentadas oportunamente se transcriben a continuación.

- Identifica, plantea y resuelve problemas sencillos vinculados al fenómeno de radiación electromagnéticas para su correcta implementación en el campo de acción a distancia.
- Interpreta e identifica cabalmente los fenómenos involucrados en la radiación electromagnética en distintos ámbitos de aplicación.
- Interpreta e identifica cabalmente las relaciones existentes entre los distintos tipos de antenas y propiedades características para su correcta explotación.
- Interpreta e identifica las variables intervinientes en un radio enlace para su correcta implementación.
- Interpreta e identifica las variables intervinientes en la propagación de ondas electromagnéticas en fibras ópticas para su correcta implementación.
- Desarrolla habilidad en el manejo de los instrumentos básicos de medición de variables relacionadas a la radiación de ondas electromagnéticas para su correcta utilización.

Consigna del trabajo a realizar

El trabajo consiste en la descripción general del proceso de cálculo básico aplicable a un radioenlace terrestre, más allá de la línea de horizonte óptico y el correspondiente cálculo de disponibilidad del mismo.

Finalmente deberá completar análisis de al menos dos aplicaciones comerciales y una breve descripción del estado del arte.

1. Introducción teórica

1.1. La propagación de ondas

La propagación de las ondas a través de los medios reales pueden estudiarse a partir de las ecuaciones de Maxwell, analizando las soluciones compatibles con las condiciones de contorno que imponga el medio. Sin embargo, tal estudio riguroso es a veces impracticable y en todo caso muy complejo, por lo que la predicción de pérdidas de propagación se utilizan modelos simplificados basados en la óptica geométrica. Cuando tales modelos dejan de ser válidos se acude a expresiones empíricas o curvas de propagación normalizadas obtenidas a partir de mediciones[1].

La propagación directa de punto a punto (entre transmisor y receptor) se da cuando existe una línea de vista entre ambas antenas, en tal situación no existen grandes problemáticas para la transmisión de señales a modo de radiación electromagnética (comunicación inalámbrica) y esto se usa cuando las distancias son tales que no es viable utilizar medios guiados como cables coaxiales y/o fibra óptica. Considerando que la distancia no es tal que deba tenerse en cuenta la curvatura de la tierra, los estudios arrojan que la onda recibida por una antena se compone de un rayo directo y otro reflejado, esto se comprende gráficamente si se observa la figura 1. En este caso se tienen la transmisión de ondas de largo alcance y de potencia considerable, como la AM.

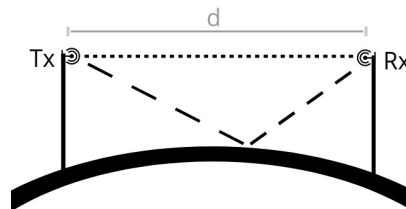


Figura 1: Propagación directa.

Existen entonces dos caminos, uno directo y otro reflejado que resulta de la reflexión de la onda en la superficie terrestre. La energía que llega a la antena receptora es la resultante vectorial de la composición de estos dos rayos que en su propagación a través del espacio sufren atenuaciones despreciables y la intensidad de campo que llega es función de la inversa de la distancia.

Cuando las distancias se hacen importantes el ángulo de incidencia se hace mínimo, la onda reflejada se hace razante y comienza a influir la curvatura del terreno y la atenuación de la onda pasa a tener componentes que dependen del tipo de terreno. Por último, otra consecuencia de la curvatura surge del hecho de que cuando una antena receptora de altura moderada (no infinitamente larga) está a gran distancia de la transmisora, se encuentra por debajo del radio horizonte y tanto el rayo incidente como el reflejado no pueden alcanzarla, como se ve en la figura 2. Es posible aún frente a esta situación que se propague la señal y se analizará mas adelante.



Figura 2: Línea de vista perdida.

La onda espacial, también denominada troposférica, se propaga dentro de los 15 Km de altura y sufre fenómenos de reflexión, refracción y dispersión; los cuales determinan su comportamiento. En el enlace influye el concepto del alcance en cuanto al radio horizonte siendo las alturas de las antenas el aspecto relevante. Por las características, el tamaño de las antenas y la gran cantidad de información que se multiplexa se constituye en el enlace por excelencia[2]. La atmósfera a través de la cual viaja la onda espacial, influye sobre la propagación en medida importante. Ello es consecuencia de que la presencia de moléculas gaseosas, particularmente las de vapor de agua (que poseen una elevada constante dieléctrica) hacen que el aire troposférico posea una constante dieléctrica algo mayor que la unidad. Por otro lado, la densidad del aire y el contenido de vapor de agua varían con la altitud. En consecuencia se espera que índice de refracción varíe con la altitud, en general disminuye a mayor altura. Esta variación del índice de refracción con la altura genera fenómenos tales como refracción, la difracción y la dispersión, también este tipo de propagación sufre del efecto de reflexión.

Por causa de la refracción, resultante de la variación del índice de refracción, la onda no viaja en línea recta y existen fenómenos de inversión del índice, lo que genera ductos de propagación a nivel superficial y a determinada altura, que aumenta significativamente el alcance.

Los efectos climatológicos afectan el índice y esto implica que al variar la curvatura del haz se pierde instantáneamente la señal en el punto de recepción, esto se lo denomina fading.

Despreciando a la onda reflejada y el efecto de la refracción troposférica (el índice de refracción se supone constante) se puede expresar que la señal recibida depende de la onda directa que viajaría en línea recta hasta que encuentre a la antena receptora. Como se aprecia en la figura 3 se puede definir gráficamente el límite visual, y matemáticamente con la ecuación 1.

$$d = d_1 + d_2 = \sqrt{(2a)}[\sqrt{(h_t)} + \sqrt{(h_r)}] \tag{1}$$

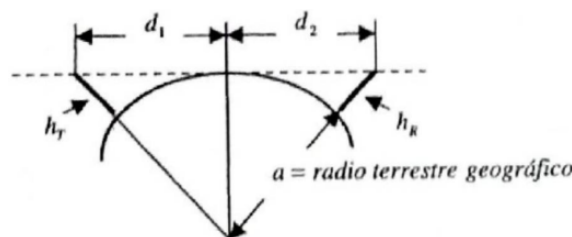


Figura 3: Límite visual.

De esta manera se obtiene el alcance máximo denominado horizonte visual, considerando la trayectoria recta. Este valor es diferente cuando se tiene en cuenta el efecto de la curvatura del haz, definiendo un radio horizonte de mayor alcance que el óptico. Para los cálculos se considera que el radio geográfico de la tierra es de $a = 6370$ Km de modo que, por ejemplo, el horizonte óptico para dos personas de $1,7$ m de altura es de $9307,63$ m.

1.2. Acerca de la troposfera y su índice de refracción

La troposfera es la región de la atmósfera en donde se concentra el 90 % del peso de la atmósfera, su altura es variable y se toma como referencia 11 Km. Si tenemos en cuenta que el índice de refracción es función de la presión atmosférica, la temperatura y la presión de vapor de agua, debido a que todos ellos disminuyen con la altura, el índice de refracción también disminuye generando una trayectoria curva en la onda. Este índice medido en la superficie vale $\eta = 1,000319$ con una atmósfera normalizada en los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \text{Presión atmosférica: } P &= 1000 \text{ milibares} \\ \text{Presión del vapor de } H_2O: p &= 10 \text{ milibares} \\ \text{Temperatura absoluta: } T &= 300 \text{ Kelvin} \end{aligned}$$

Cuadro 1: Temperatura y presión estandar

Este valor del índice de refracción disminuye con la altura, a la tasa que se muestra en 2, también al cociente $-1/4a$ se conoce como curvatura del haz ρ . Además en algunas investigaciones se usa, por comodidad, un nuevo índice o coíndice de refracción, llamado *refractividad* N .

$$\frac{d\eta}{dh} = -0,039 \cdot 10^{-6} = -\frac{1}{4a} \quad (2)$$

$$N = (1 - \eta) \cdot 10^6 \quad (3)$$

Dado que el índice de refracción (o su coíndice) dependen de la temperatura absoluta, la presión atmosférica y la presión del vapor de agua, la recomendación UIT-R P.453 [14] (que además aporta mapas mundiales de valores de N), proporciona el siguiente valor de N en función de los parámetros mencionados

$$N = \frac{77,6}{T} \cdot (P + 4810 \cdot \frac{e}{T}) \quad (4)$$

En condiciones normales $N = 316$ (valor medio en la Argentina). Como este índice varía con la altura se tiene una ley que modela la variación de η con h que se muestra en 5

$$n(h) = 1 + N_o 10^{-6} \exp\left(\frac{-h}{h_o}\right) \quad (5)$$

Donde N_o es el *nivel medio de la refractividad atmosférica extrapolada al nivel del mar* y h_o es la altura en kilómetros, y son parámetros que se obtienen por procedimientos estadísticos. La recomendación UIT-R P.617-5 proporciona un mapa del valor medio anual de N_o se ve en la figura 4

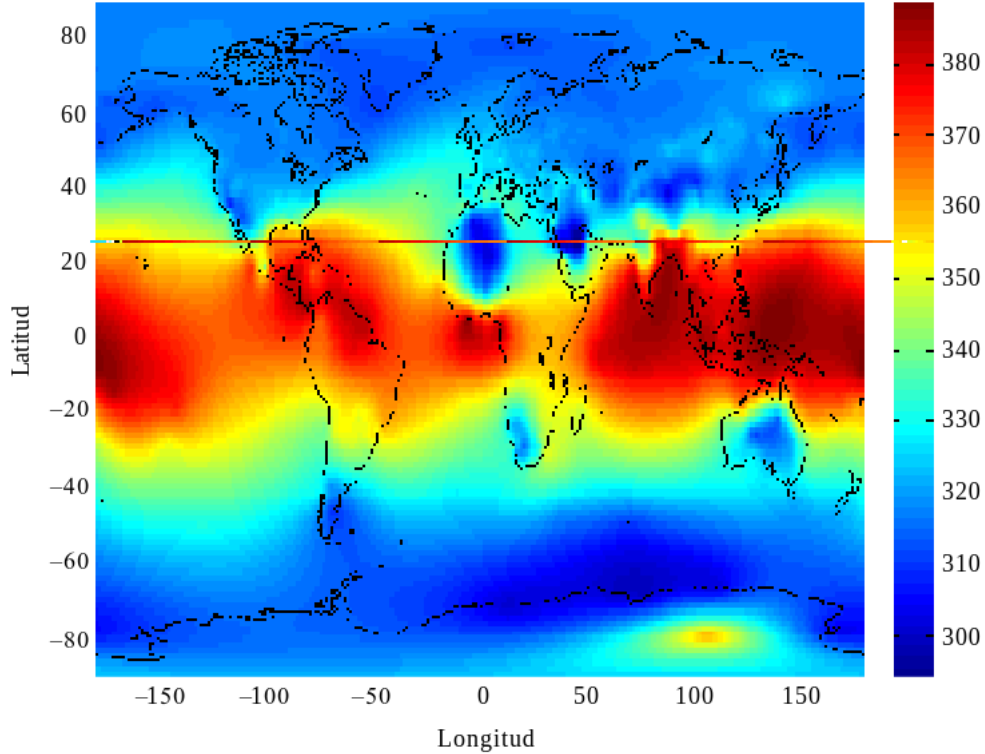


Figura 4: Refractividad de la superficie a nivel del mar media anual, N_o

1.2.1. La refracción electromagnética

La refracción electromagnética es el cambio de dirección de un rayo conforme pasa de un medio a otro, con diferentes velocidades de propagación y haciendo que la trayectoria se curve. La ley de Snell vincula los índices de refracción del medio con los ángulos del haz para la entrada y salida a los medios. Cuando el haz se pasa por diferentes índices de refracción su ángulo de incidencia va variando hasta llegar a un ángulo límite donde la onda se refleja totalmente, y como los índices n dependen de la constante dieléctrica del medio se define la relación 6

$$\frac{\cos \phi_0}{\cos \phi_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}} \quad (6)$$

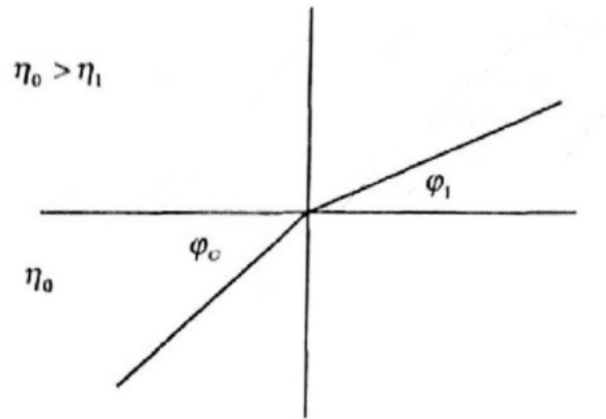


Figura 5: Cambio de medio de propagación.

Cuando el haz se pasa por diferentes índices de refracción su ángulo de incidencia va variando hasta llegar a un ángulo límite donde la onda se refleja totalmente. Entonces el haz completará su trayectoria de manera inversa a la inicial y si cuando se desplazaba veía que índice disminuía con la altura al reflejarse verá que este aumenta. La situación es tal que la trayectoria es curva en lugar de ser recta, esto se ejemplifica en la figura 6.

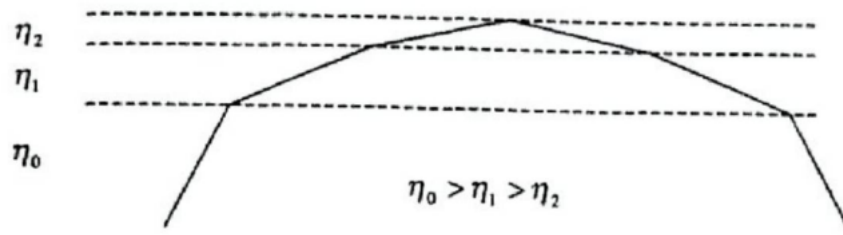


Figura 6: Trayectoria curvada por el cambio de η

Al variar la curvatura del haz, por efectos de la variación del índice trae aparejado distintas alturas de antenas. De hecho una de las situaciones más ventajosas ocurre cuando el gradiente $\frac{d\eta}{dh}$ es negativo, lo que implica que se hace necesario menor altura de antenas. Al considerar la tierra curva queda definido el concepto de radiohorizonte. Tomando la altura de antenas correspondiente a un enlace en tierra plana, dispondremos de mayor alcance si consideramos el efecto de la refracción, con un índice que disminuye con la altura.

1.3. Geometría del trayecto respecto del suelo

La intención es analizar cómo influye la refractividad N sobre la situación del trayecto radioeléctrico respecto al suelo, partiendo de la figura 7

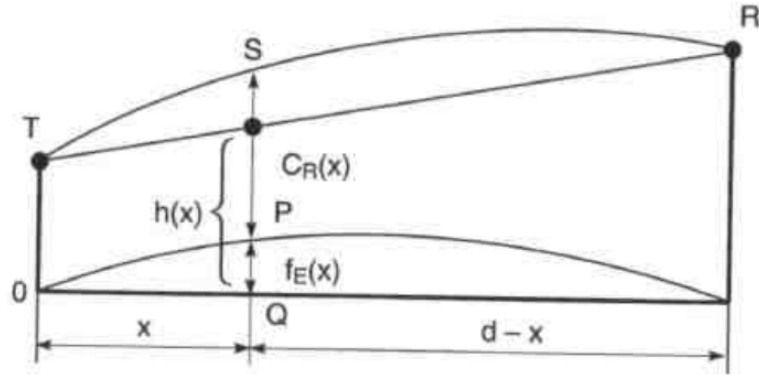


Figura 7: Trayecto curvado por la refractividad N .

- f_e : elevación de la superficie terrestre sobre la recta que une los pies de T y R
- R_o : radio terrestre (a)
- R : radio de curvatura del trayecto
- C_R : despejamiento

Sean (x_o, y_o) las coordenadas del centro de la tierra y R_o el radio de ésta, la ecuación de la circunferencia representativa de la Tierra sería:

$$(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 = R_o^2 \quad (7)$$

Que debe pasar por los puntos $(0,0)$ y $(d,0)$ resulta que:

$$x_o = d/2 \quad (8)$$

$$y_o = -\sqrt{(R_o^2 - d^2/4)} \quad (9)$$

$$R_o \gg d^2/4 \quad (10)$$

$$y_o \approx -R_o \quad (11)$$

Dado que $R_o \gg d$ y que las ordenadas son muy pequeñas en comparación con las abscisas x se puede simplificar la ecuación 7 a la ecuación de una parábola

$$x^2 - dx + 2R_o y = 0 \quad (12)$$

y la elevación $f_e = y$ es

$$f_E(x) = x \frac{d-x}{2R_o} = 0,07849x(d-x) \quad (13)$$

La curvatura del rayo $f_R(x)$ es la diferencia entre la protuberancia del rayo y la recta que une T con R. Si llamamos R_k el radio de la curvatura del rayo desde el

centro de la tierra hasta un punto sobre su trayectoria, el mismo razonamiento se puede hacer con la ecuación 7 para tener que

$$f_R(x) = x \frac{d-x}{2R_k} \quad (14)$$

Sea el despejamiento para un punto S del trayecto, a la distancia PS entre ese punto y la superficie terrestre, llamamos $c_R(x)$ al despejamiento tenemos

$$c_R(x) = f_R(x) + h(x) - f_E(x) = h(x) + x \frac{d-x}{2} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_o} \right) \quad (15)$$

El cálculo del despejamiento puede también efectuarse considerando que el rayo es rectilíneo y que la superficie de la tierra tiene una curvatura modificada, caracterizada por un radio kR_o . Con este nuevo parámetro y volviendo a tratar el desarrollo matemático anterior, la protuberancia terrestre es ahora:

$$f_E(x) = x \frac{d-x}{2kR_o} \quad (16)$$

y el despejamiento

$$c_R(x) = h(x) - f_E(x) = h(x) - x \frac{d-x}{2kR_o} \quad (17)$$

La tierra de radio kR_o se denomina «Tierra ficticia», si la curvatura de un arco es la inversa de su radio, la curvatura del rayo, igualando las ecuaciones 15 con 17 es la diferencia entre la curvatura de la tierra y la de la tierra ficticia

$$\frac{1}{kR_o} = \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R} \quad (18)$$

De la ecuación 2 sabemos que esta curvatura depende de la variación del índice de refracción con la altura y que

$$k = \frac{1}{1 + R_o \Delta N \cdot 10^{-6}} = \frac{157}{157 + \Delta N} \quad (19)$$

En climas templados como el de la Argentina $\Delta N = -39$ por lo que $k = 4/3$, lo que significa que la tierra resulta un poco mas plana para la propagación troposférica y que el radio modificado es de unos 8500 Km (esto ocurre siempre que $k > 1$). Según el valor de k se considera la troposfera en:

- Conductiva: $k < 0$
- Sub-refractiva: $0 \leq k < 1$
- Normal: $1 \leq k \leq 4/3$
- Súper-refractiva: $k \geq 4/3$

Este convenio es aceptado dentro del kilómetro mas bajo de la tierra, en que la recomendación UIT-R P.6175 se tienen los valores anuales medios de ΔN , figura 8. Cada valor de k modifica la curvatura de la tierra obligando a cambiar las alturas de las torres de antenas, teniendo que hacerlas mas altas para valores de k menores a la unidad ya que ello dice que la curvatura efectiva es mucho mayor.

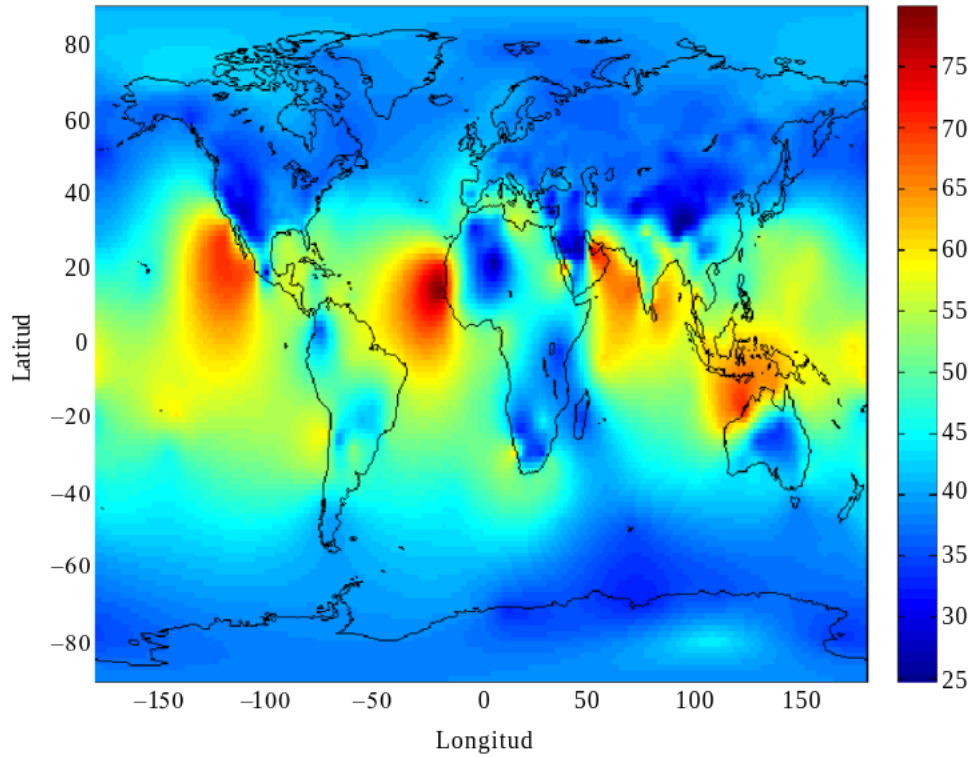


Figura 8: Tasa media anual de variación de la refractividad radioeléctrica en el km más bajo de la atmósfera, ΔN

Partiendo del modelo que se tiene en la figura 9, la distancia de visión entre ambas antenas, que están a unas alturas h_t y h_r , para este modelo de tierra ficticia es

$$d(Km) = 4,1(\sqrt{h_t(m)} + \sqrt{h_r(m)}) \tag{20}$$

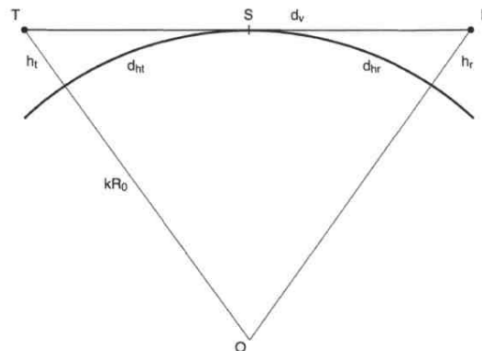


Figura 9: Distancia de visibilidad radioeléctrica.

1.4. Propagación por difracción

El efecto de la difracción suele definirse como la redistribución de energía dentro de un frente de onda cuando pasa cerca del extremo de un objeto opaco, es decir cuando una onda electromagnética encuentra un obstáculo, tras el obstáculo aparece intensidad de campo. Esto es muy notable en el caso de un cuarto oscuro en el cual al abrir la puerta entra la luz, los rayos se desvían por la orilla de la puerta e iluminan el área correspondiente detrás de ella. La difracción es una ventaja ya que hace posible obtener comunicación en valles detrás de montañas.

El principio de Huygens [7] dice:

”Todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden”

Este principio indica que cada punto de un frente de onda esférico se puede considerar como una fuente secundaria de ondas electromagnéticas, desde donde se irradian hacia afuera ondas pequeñas, es decir otras ondas secundarias. Si bien es cierto que cada punto en análisis genera ondas secundarias en todas direcciones, el rayo principal continúa en su dirección principal, no extendiéndose hacia afuera, porque las ondas secundarias se cancelan en todas direcciones, excepto de frente. Esto hace que este frente continúe plano.

Cuando se considera un frente de onda plano y finito la cancelación en las direcciones aleatorias es incompleta. Esto implica que el frente de la onda se extiende hacia fuera o dicho de otra manera se dispersa. Es a este efecto al que se lo denomina difracción.

Debido a que la cancelación ocurre parcialmente en los extremos de los obstáculos las ondas secundarias pasarán desapercibidas por las esquinas y a esto se lo llama zona de sombras, lo que ocurre en el ejemplo de la habitación oscura.

1.4.1. Zona de Fresnel

Las Zonas de Fresnel son elipsoides concéntricos formados por las contribuciones de campo que se originan en las antenas, ya que la onda siempre tiene varios caminos expresados en longitudes de onda (λ) por los cuales llegar al receptor (expresión 21) insertándose en el modelo como las distancias co-focales de un elipsoide de revolución. Los focos son las antenas T y R, como se muestra en la figura 10.

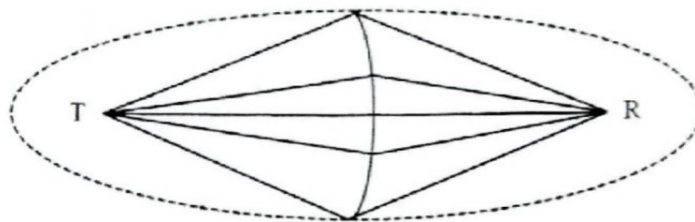


Figura 10: Elipse de la zona de Fresnel.

$$TO + OR = TR + n\lambda/2 \quad (21)$$

En estos caminos se pueden formar círculos concéntricos de radios correspondientes a $n=1, 2, 3\dots$ según el camino que se tome y son denominados radios de Fresnel. Podemos expresar que la primera zona de Fresnel es la región comprendida por la superficie que es el lugar geométrico de los puntos cuya suma de distancias al transmisor y receptor es igual a la distancia directa más media longitud de onda ($n=1$). Igualmente se define la zona de orden n como la región comprendida por la superficie que es lugar geométrico de los puntos cuya suma de distancias al transmisor y receptor es igual a la distancia directa más n media longitud de onda [2]. En la práctica los obstáculos para difracción pertenecen a la topografía del terreno, el resultado es que no se afecta la recepción hasta que la obstrucción no supera el 30 % de la primera zona de Fresnel con la particularidad de que el valor de campo recibido esta siempre cerca del valor normalizado hasta que desaparece totalmente, esto en la práctica permite que las alturas de las torres de antena no sean tan altas ya que sólo se libera la primera zona como norma para los enlaces digitales y sólo el 70 % de la primera zona para los analógicos.

1.4.2. Cálculo de los radios de Fresnel

Es totalmente posible describir las trayectorias dentro de una elipse que cumplen con las condición de la ecuación 21, lo que permitirá calcular el radio de Fresnel en cualquier punto de la trayectoria, a partir de la figura 11 la distancia T_1 se tiene a partir de la mencionada ecuación 21, siendo que para el trayecto directo:

$$T_1 + T_2 = d_1 + d_2 + n\lambda/2 \tag{22}$$

Para el triangulo TOO' podemos expresar

$$T_1^2 = d_1^2 + R_F^2 \tag{23}$$

Que recordando la resolución del binomio de Newton y tomando sólo los términos más significativos resulta

$$T_1 = d_1 + \frac{R_F^2}{2d_1} \tag{24}$$

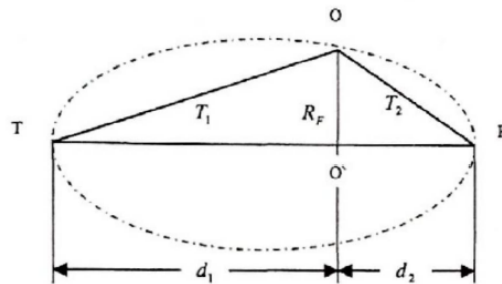


Figura 11: Radios de Fresnel.

Aplicando el mismo razonamiento para el otro triángulo para obtener T_2 :

$$T_2 = d_2 + \frac{R_F^2}{2d_2} \tag{25}$$

Y el radio de estos círculos de Fresnel a lo largo de la elipse de revolución es

$$R_F = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d}} \quad (26)$$

En metros y en función de la frecuencia

$$R_F(m) = 548 \sqrt{n \frac{d_1 d_2}{d}} \quad (27)$$

El valor de estos radios es diferente en cualquier parte de la trayectoria y debe tenerse en cuenta que de acuerdo al camino recorrido el haz llegara en fase o en contra fase con la onda directa. Entonces es importante tener en cuenta cuantas de esas zonas deben estar libres en el momento de la transmisión, es decir cuanta altura de antena se deberá agregar para liberar estas zonas más allá de la que resulten de la curvatura de la tierra [2] (esto se retomará luego en las consideraciones de diseño del radioenlace).

1.4.3. Difracción en obstáculos

Depende del tipo de terreno interpuesto entre el transmisor y el receptor, que se analiza a partir del perfil topográfico y que hoy gracias a las tecnologías en constante avance se cuenta con herramientas gráficas que mapean el relieve en todo el globo terráqueo. Una de las primeras aproximaciones es la rugosidad que se define como la diferencias entre las cotas superadas entre el 10% y el 90% del terreno. La UIT-R P.526 diferencia los terrenos como *poco ondulado, con obstáculos aislados y terreno ondulado*. En la sección de consideraciones de diseño se abarcará el caso del *obstáculo aislado* y puntualmente el caso del *obstáculo redondeado* que es lo más parecido a lo que se tendría al hacer un radio enlace en la provincia de Misiones. En la figura 14 se tiene un ejemplo de la geometría de este obstáculo.

En las consideraciones de diseño se tendrán en cuenta las demás cuestiones inherentes al cálculo de un radioenlace fuera del horizonte de vista y, posteriormente serán nombradas algunas aplicaciones comerciales en las que interviene esta ciencia así como también un análisis del estado del arte de los radioenlaces de este tipo.

1.5. Dispersión de Rayleigh (*scattering*)

Si bien el término dispersión está muy extendido en la literatura científica (junto con el anglicismo *scattering*), la dispersión de Rayleigh es la dispersión de la luz visible o cualquier otra radiación electromagnética por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones dispersados. Ocurre cuando la luz viaja por sólidos y fluidos transparentes, pero se ve con mayor frecuencia en los gases. La dispersión de Rayleigh de la luz solar en la atmósfera es la principal razón de que el cielo se vea azul durante el día y rojizo durante el atardecer.

Si el tamaño de las partículas es mayor que la longitud de onda, la luz no se separa, no se dispersa en todas las longitudes de onda que la componen, como cuando al atravesar una nube, esta se ve blanca, lo mismo pasa cuando atraviesa los granos de sal y de azúcar. Para que la luz se disperse, el tamaño de las partículas debe

ser similar o menor que la longitud de onda. El *coeficiente de dispersión* depende inversamente de la cuarta potencia de la longitud de onda, relación conocida como *ley de Rayleigh*.

1.6. Propagación por dispersión troposférica

La propagación por dispersión troposférica constituye una modalidad de transmisión en frecuencias superiores a unos 100 MHz que se produce como consecuencia de efectos dispersivos ocasionados por irregularidades troposféricas, los cuales provocan la vuelta a tierra de energía radioeléctrica lanzada hacia la troposfera, cubriéndose una distancia superior a la del horizonte radioeléctrico. Se ha comprobado que, para distancias grandes, los mecanismos de propagación son la difracción y la dispersión. Sin embargo la atenuación por difracción aumenta muy rápidamente con la distancia, por lo que mucho más allá sólo queda como posible mecanismo la dispersión[1].

No existe una explicación muy clara sobre como se produce este mecanismo pero se cree que la dispersión se lleva a cabo en un «volumen común» formado por las intersecciones de los haces de las antenas T y R.

La realización de estos llamados enlaces transhorizonte surgieron de la necesidad de salvar grandes distancias que imponen los terrenos boscosos, cuerpos de agua muy extensos a lo ancho y también regiones carentes de infraestructuras que hagan posible la transmisión por línea. Entonces estos radioenlaces presentan la ventaja de interconectar estas grandes distancias, pero tienen el inconveniente de que requieren una potencia de transmisión muy alta, a causa de la elevada pérdida de propagación asociada a este mecanismo, y además experimentan intensos desvanecimientos por propagación multitrayecto por lo que se hace necesario la recepción por diversidad.

1.6.1. Recepción con diversidad

El profundo desvanecimiento que aparece en la propagación por dispersión troposférica reduce notablemente la calidad de funcionamiento de los sistemas que utilizan este modo de propagación. El efecto del desvanecimiento puede limitarse mediante la recepción con diversidad, utilizando dos o más señales sometidas a desvanecimientos independientes en mayor o menor grado según la diferencias del trayecto de dispersión o la frecuencia. Es sabido que empleando técnicas de diversidad en el espacio, en ángulo o en frecuencia disminuyen los porcentajes de tiempo durante los cuales se superan pérdidas de transmisión elevadas. Sin embargo, la diversidad en ángulo puede tener el mismo efecto que la diversidad en el espacio en dirección vertical y resulta más económica[9].

1.7. Fading

El fading, desvanecimiento temporal de la onda, se produce cuando las variaciones más o menos rápidas de las condiciones meteorológicas, hacen variar los valores del índice de refracción. Estas variaciones actúan de dos maneras diferentes:

a) Alterando la dirección del lóbulo de radiación de la antena transmisora, sacando a la energía de su dirección correcta a la antena receptora. El efecto es más intenso cuanto más directiva sea la antena.

b) Variando las fases relativas de las distintas componentes que forman el campo resultante en la antena receptora. Esta variación de fases se debe a las variaciones de distancia también debida a las variaciones del índice de refracción.

Debe tenerse en cuenta que si se produce un duelo en una recepción normal la señal para el receptor desaparece instantáneamente y eso es fading, mientras tanto la señal puede llenar a cualquier otro lugar por el efecto del ducto[2].

1.8. Radiocomunicación transhorizonte

Los únicos mecanismos de propagación radioeléctrica más allá del horizonte que se producen permanentemente en frecuencias superiores a 30 MHz son los de difracción en la superficie de la Tierra y de dispersión causada por irregularidades atmosféricas. Además, puede producirse ocasionalmente propagación debida a propagación por conductos o reflexión en capas. En el caso de las señales difractadas, la atenuación aumenta muy rápidamente con la distancia y con la frecuencia y la probabilidad de propagación anómala es relativamente pequeña, en definitiva, el mecanismo principal a largo plazo es la dispersión troposférica. Esos mecanismos pueden utilizarse para establecer sistemas de radiocomunicación «transhorizonte»[9].

1.8.1. Influencia de la ubicación de las estaciones

La ubicación de los enlaces que utilizan la transmisión transhorizonte requiere cierto cuidado. Los haces de antena no deben quedar dificultados por obstáculos próximos y las antenas deben estar apuntadas ligeramente por encima del horizonte. La elevación óptima precisa es función del trayecto y de las condiciones atmosféricas, pero está comprendida dentro de 0,2 a 0,6 veces el ancho del haz de la antena por encima del horizonte.

Las mediciones efectuadas alejando el haz de una antena con una ganancia de 53 dB de la dirección del horizonte del círculo máximo de dos transmisores de 2 GHz, distantes entre sí 300 km, demostraron un coeficiente de reducción aparente de la potencia recibida de 9 dB por grado. Esto se produjo con aumentos del ángulo de dispersión sobre los tres primeros grados, tanto en acimut como en elevación, para cada trayecto y para una amplia gama de porcentajes de tiempo[9].

2. Consideraciones de diseño

Radio enlaces terrestres Es una interconexión entre terminales fijos o móviles efectuada por ondas de radio, si todos los terminales están en Tierra, es un radioenlace terrestre. Se reserva el término satelital para cuando uno de los terminales esta en un satélite. Generalmente los radioenlaces se explotan entre 2 y 50 GHz, por eso se les llama radioenlaces de microondas y se asume que el trayecto que sigue una onda de radio se encuentra lleno de obstáculos, como accidentes geográficos o construcciones, además de estar afectado por la curvatura de la Tierra.

2.1. Primera Zona de Fresnel

El radio F_1 en cualquier punto del elipsoide de la primera zona de Fresnel se calcula con la ecuación 27, así para un radioenlace de WLAN de 2,4 GHz y 9.6 km de longitud requerirá una zona longitud, libre de obstáculos en un radio de $F_1 = 17,32$ m bajo la línea de vista, en el punto medio de la trayectoria.

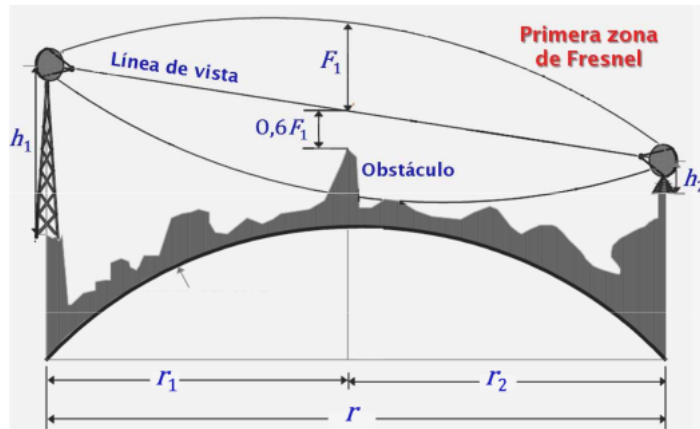


Figura 12: Radio enlace: primera zona de Fresnel.

Por tanto, en el caso de la WLAN de 9,6 km de longitud, es suficiente despejar una zona de 10,4 m en el punto medio de la trayectoria, y menos aún en los extremos.

2.2. Atenuación de espacio libre

En la práctica el área con que captura la señal la antena receptora es menor al área del frente de onda y por eso no recibe toda la señal. Esta incapacidad de recibir toda la señal o esta diferencia entre lo que se transmite y lo que se recepta es lo que denominamos la atenuación del espacio libre. En la figura 13 se muestra un frente de onda que sale de una antena transmisora que va creciendo en área y disminuyendo en densidad de potencia, y se marca de manera genérica la porción de densidad de potencia que captura la antena receptora, esto depende del área efectiva de la misma que no siempre coincide con el área geométrica.

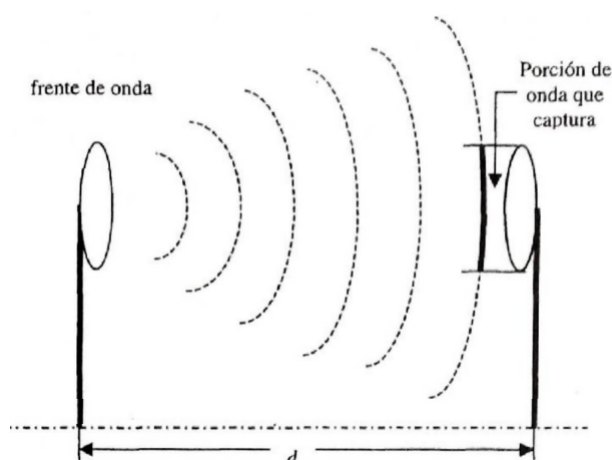


Figura 13: Propagación en espacio libre.

La potencia recibida se obtiene como el producto de la densidad de potencia transmitida por el área de captura o efectiva de la antena receptora

$$P_R = \rho \cdot A_R \quad (28)$$

Considerando las ganancias unitarias ya que pueden ser tenidas en cuenta en cualquier momento y realizando el cociente entre la potencia recibida y la transmitida encontramos la atenuación del espacio libre en dB:

$$A_o = 92,44 + 20 \cdot \log(d_{[km]}) + 20 \cdot \log(f_{[GHz]}) \quad (29)$$

Para el caso de una distancia de 15,44 km y una frecuencia de 5,8 GHz la atenuación es de 131,48 dB.

2.3. Atenuación por difracción

Los parámetros geométricos que intervienen en el cálculo de la atenuación por difracción en este caso, son los siguientes:

- Longitud del enlace: $d(\text{km})$
- Distancia del transmisor y receptor a sus horizontes respectivos: $d_{ht}(km)$ y $d_{hr}(km)$
- Alturas de los puntos de horizonte: $z_{ht}(m)$ y $z_{hr}(m)$
- Ángulo de difracción: θ en rad.
- Radio de curvatura del obstáculo: $r(\text{km})$
- Altura h del punto P de intersección de las visuales trazadas desde T y R a sus respectivos horizontes, con respecto a la línea TR.

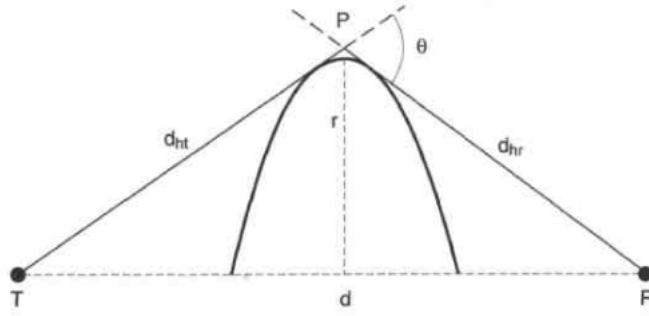


Figura 14: Geometría del obstáculo redondeado.

Suponiendo conocidas las alturas de las antenas transmisora y receptora sobre el nivel del mar, $z(0)$ y $z(d)$. Sea, además, $R = kR_o$, el radio de curvatura del obstáculo se estima mediante la expresión:

$$r(km) = \frac{d - d_{ht} - d_{hr}}{\theta} \cdot 10^3 \quad (30)$$

Donde θ es el ángulo de difracción

$$\theta(mrad) = \frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} + \frac{z_{ht} - z(0)}{d} \quad (31)$$

La altura $h(m)$ se calcula como

$$h = x_p \left(\frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} - \frac{z(d) - z(0)}{d} \right) \quad (32)$$

El parámetro x_p es la abscisa del punto P:

$$x_p = d \cdot \beta / \theta \quad (33)$$

y el ángulo $\beta(mrad)$ es:

$$\beta(mrad) = \frac{z(d) - z(0)}{d} - \frac{z(d) - z_{hr}}{d_{hr}} \quad (34)$$

Con todos estos parámetros se obtienen los parámetros radioeléctricos para el cálculo de la atenuación por la curvatura del obstáculo

$$m = 0,457 \frac{d_{ht} + d_{hr}}{d_{ht} \cdot d_{hr}} r^{2/3} \cdot f^{-1/3} \quad (35)$$

$$n = 4,787 \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot f^{2/3} \cdot r^{-1/3} \quad (36)$$

Donde las distancias y el radio están en kilómetros, la altura h en metros y la frecuencia f en MHz, a demás los parámetros m y n son de interés para el cálculo de la atenuación por difracción

$$A = L_D(v) + T(m, n) \quad (37)$$

Donde $L_D(v)$ es la pérdida de Fresnel-Kirchoff debida a un obstáculo agudo equivalente y v es un parámetro adimensional definido por las condiciones de propagación, y $T(m, n)$ es la atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo.

$$T(m, n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6^{3/2} - 0,8m^2 \text{ (dB, } mn \leq 4) \quad (38)$$

$$T(m, n) = -6 - 20\log(mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \text{ (dB, } mn > 4) \quad (39)$$

el parámetro v

$$v = 0,0316h \cdot \left[\frac{2(d_{ht} + d_{hr})}{\lambda d_{ht} d_{hr}} \right]^{1/2} \quad (40)$$

que si es superior a -0,78 puede tenerse un valor aproximado de $L_D(v)$

$$L_D(v) = 6,9 + 20\log(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v + 0,1) \quad (41)$$

Como la atenuación por difracción empeora con la distancia, se debe tratar de evitar este mecanismo para establecer enlaces entre antenas.

2.4. Atenuación por vegetación

Se da cuando el receptor está en medio de un terreno boscoso, donde hay una perdida por penetración de las ondas a través de la vegetación. La recomendación UIT-R P.833 facilita curvas que proporcionan la atenuación específica en frecuencia y profundidad del bosque (dB/m), que además informa que la polarización vertical es mas atenuada y plantea que es por los troncos de los arboles.

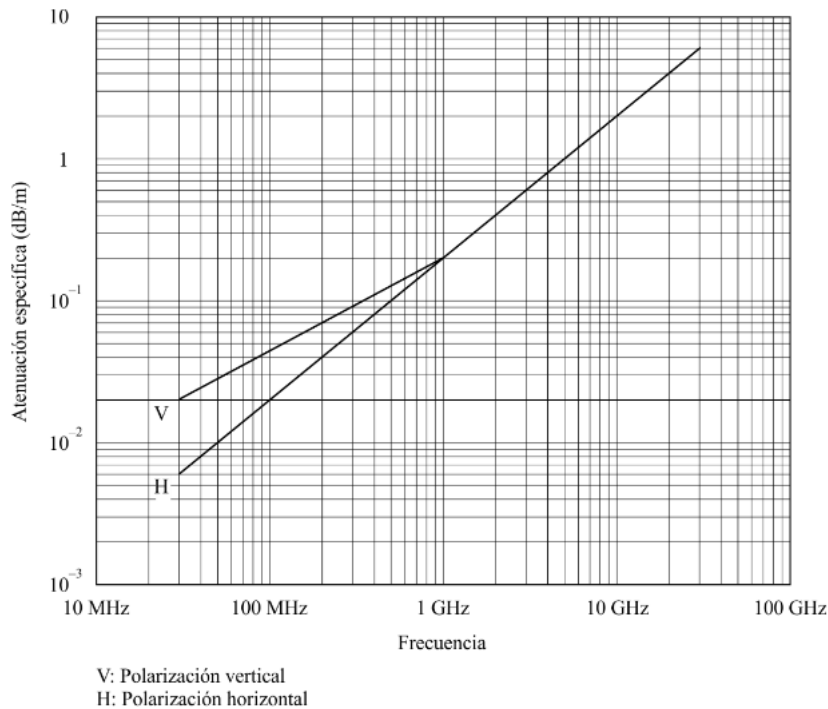


Figura 15: Atenuación específica en zona boscosa.

En este caso el cálculo de atenuación se da como sigue:

$$L_{veg} = L_m \cdot [1 - \exp -d \cdot \gamma / L_m] \quad (42)$$

Donde

- $d(m)$: longitud del trayecto dentro del bosque
- $\gamma(dB/m)$: atenuación específica
- $L_m(dB)$: atenuación máxima, supuesto que todo el trayecto está dentro del bosque

Pero si consideramos que la antena receptora no se está instalando casi a la altura del suelo, en la zona mas profunda de la selva misionera donde en principio no se permite la mano del hombre, o detrás de un arbol frondoso (por dar un ejemplo absurdo), sino que en un área libre de vegetación (o que regularmente se hacen podas ya que existe un operario o encargado del mantenimiento del lugar donde se instala la torre) y que no puede llegar a ser cubierta de arboles, la atenuación por vegetación queda fuera del diseño de este radioenlace.

2.5. Atenuación por gases y vapores atmosféricos

Las moléculas de O_2 y H_2O absorben energía electromagnética produciendo una atenuación que puede ser muy elevada, sobretodo a frecuencias a partir de los 10 GHz que son las frecuencias de resonancia de estas moléculas aunque existen bandas en las que si es posible propagar ya que están en regiones del espectro en las que la atenuación es baja y constante, así también es util usar estas frecuencias de resonancia si no se quiere que las ondas se propaguen muy lejos. La atenuación por gases y vapores son considerados solo a bajas alturas relativas a las antenas por lo que, al igual que el caso anterior, no intervienen en el enlace que intentamos diseñar pero aun así cabe mencionar y dar un lugar especial en esta sección

$$A_a = \gamma_a \cdot d \quad (43)$$

Donde γ_a es la atenuación específica (dB/km) y se desglosa en dos:

$$\gamma_a = \gamma_O + \gamma_w \quad (44)$$

- γ_O : atenuación específica del oxígeno
- γ_w : atenuación específica del vapor de agua

Los valores de las atenuaciones específicas vienen de cortesía en la UIT-R P.676 a 15 °C, presión atmosférica estándar y densidad del vapor de agua $\rho = 7,5g \cdot m^3$, en la figura 16.

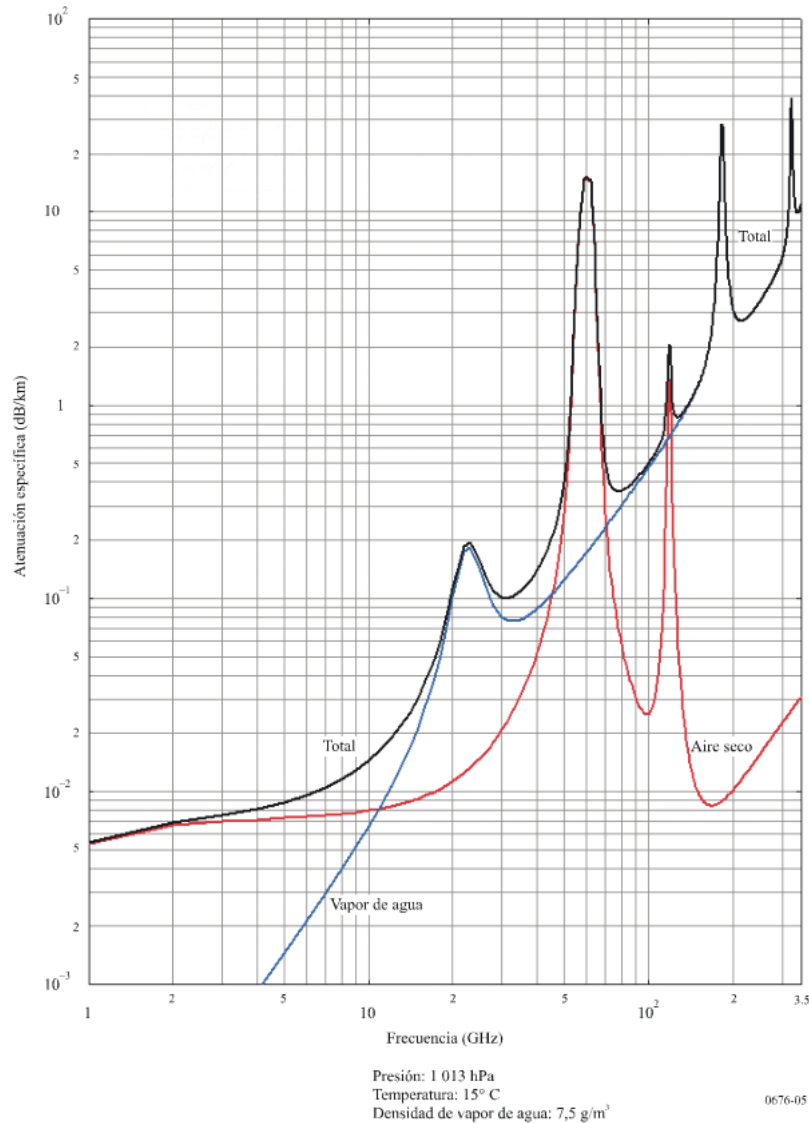


Figura 16: Atenuación específica debida a los gases UIT-R P.676.

Así, por ejemplo, para un enlace de 35 km a una frecuencia $f = 15GHz$ la atenuación específica es $\gamma_a = 0,0293(dB/km)$ y la atenuación adicional será $A_a = \gamma_a \cdot d = 0,0293 \cdot 35 \approx 1,03dB$.

2.6. Atenuación por lluvia

En los enlaces terrestres también existe atenuación debida a la absorción y dispersión provocado por los hidrometeoros (lluvia y granizo, en la provincia de Misiones), la UIT proporciona un método de predicción para este fenómeno para enlaces con horizonte de vista en [12] donde la atenuación total está en función al porcentaje del tiempo en que se estima que hay lluvia durante el año $p\%$, la intensidad de lluvia R (que está mapeado para todo el planeta) y la longitud efectiva del enlace L_{ef} (que no es lo mismo que la longitud real según esta recomendación) pero para el caso en que las antenas se encuentran fuera del horizonte óptico la UIT-R P.617 [9] no alcanza

a abordar ésta cuestión de manera directa sino que estima según mediciones de qué manera varían las atenuaciones estacionales, dando a entender que no se espera que un enlace que no está en línea directa de vista tenga muy buenas prestaciones o que no deje de funcionar durante las lluvias. Si se quisiera agregar este factor, la UIT-R P.838 [13] proporciona los métodos para calcular la atenuación específica mientras que la recomendación UIT-R P530 la manera de calcular la longitud efectiva. Aún así viene siendo una atenuación que no importa a frecuencias menores a los 6 GHz [1].

$$A(dB) = \gamma(dB/km) \cdot L_{ef}(km) \tag{45}$$

2.7. Atenuación por Fading

Se puede analizar como una pérdida instantánea por efectos de la atmósfera, el haz se curva de manera que se tendría que hacer cambios en la posición de las antenas cada vez que se sale de ruta, siendo esto muy dificultoso e impracticable. Sin embargo como la onda aún ataca como frente con el primer radio de Fresnel libre, como se ve en la figura 17, es posible sobredimensionar en potencia para solucionar este problema.

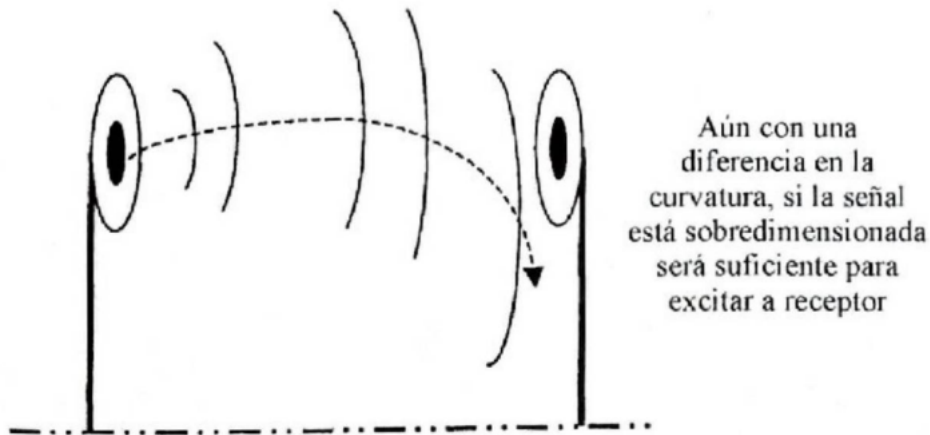


Figura 17: Fading.

La ecuación de Barnett-Vignant se transforma en un factor de pérdida adicional que se tiene como reserva en estos casos, en una ruta de hasta 400 km:

$$M_f = -30\log(d) - 10\log(6\sigma \cdot b \cdot f) + 10\log(1 - Q) + 70 \tag{46}$$

donde

- M_f : factor de pérdida adicional en dB .
- d : distancia del enlace en km .
- σ : factor de rugosidad
 - $\sigma = 4$ en agua o tierras muy llanas.

- $\sigma = 1$ en tierras intermedias.
- $\sigma = 0,25$ en tierras muy rugosas o montañosas.
- b: factor de conversión
 - $b = 1$ conversión básica.
 - $b = 0,5$ áreas calientes y húmedas.
 - $b = 0,25$ tierras mediterráneas.
 - $b = 0,125$ para zonas secas o montañosas.
- f: frecuencia en GHz .
- Q: objetivo de calidad, expresado en forma decimal ($99,99\% = 0,9999$) que tiene que ver con el tiempo de continuidad del servicio.

Ésta ecuación es muy útil ya que tiene en cuenta la rugosidad del terreno, los efectos de trayectorias múltiples, y los objetivos de confiabilidad que se plantean para el enlace. Esta ecuación fue propuesta y aceptada en una conferencia de Kyoto del CCIR (hoy UIT-T).[2].

Por ejemplo, en un enlace de 60 km para una frecuencia de 1 GHz, considerando una tierra "intermedia" como la de Misiones que además es húmeda y con un factor de confiabilidad del 99%, el factor de pérdida adicional:

$$M_f(dB) = -30\log(60) - 10\log(6 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 1) + 10\log(1 - 0,99) + 70 = -3,82dB \quad (47)$$

También sucede que a mayor Q mayor M_f , este resultado será de sumo interés para el cálculo del enlace.

2.8. Ecuación del enlace

2.8.1. Sensibilidad en el receptor

Este es el nivel mínimo a colocar en la entrada que venciendo el umbral, hace funcionar al receptor, simplemente de la relación señal a ruido de la entrada, el denominador es el umbral de ruido y el numerador es la sensibilidad del receptor, figura 18.

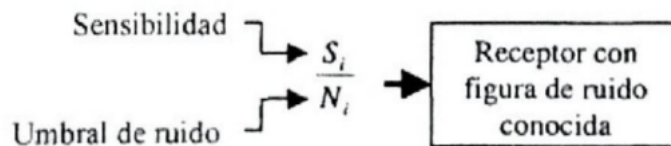


Figura 18: Sensibilidad- SNR_R

El umbral de ruido N_i es función de la figura de ruido F de la antena receptora, que a su vez es el cociente de la $SNR_{entrada}$ y la SNR_{salida} y es:

$$F = \frac{N_o}{kTBG} \quad (48)$$

donde

- N_o es el ruido de salida de la antena.
- k es la constante de Boltzmann ($k = 1,380649 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$).
- T es la temperatura en Kelvin (temperatura estándar: $T_s = 290K$ y se obtiene la figura de ruido estándar F_s).
- B es el ancho de banda del sistema (Hz).
- G es la ganancia de la antena.
- Si el sistema es ideal $F=1$ (N'_o).
- El ruido general del sistema es $N_R = N_o - N'_o = (F - 1)kTBG$.

Si se divide por la ganancia G se tiene el ruido a la entrada

$$N_i = (F_s - 1)kT_s B \tag{49}$$

(a temperatura estándar) donde el factor $(F_s - 1)T_s$ se conoce como temperatura efectiva T_e .

Este valor, S_i (sensibilidad del receptor), puede venir especificado en unidades típicas tales como mV/Ω , mW y dBm , y sino se debe calcular a partir de $SNR_{entrada}$.

2.8.2. La ecuación

Habiendo analizado los aspectos de la atenuación del espacio libre, el margen de fading y la sensibilidad de recepción podemos expresar la ecuación de equilibrio desde el punto de vista de la potencia que rige un enlace. En la figura 19 representamos de manera genérica los elementos intervinientes, analizado en un sentido.

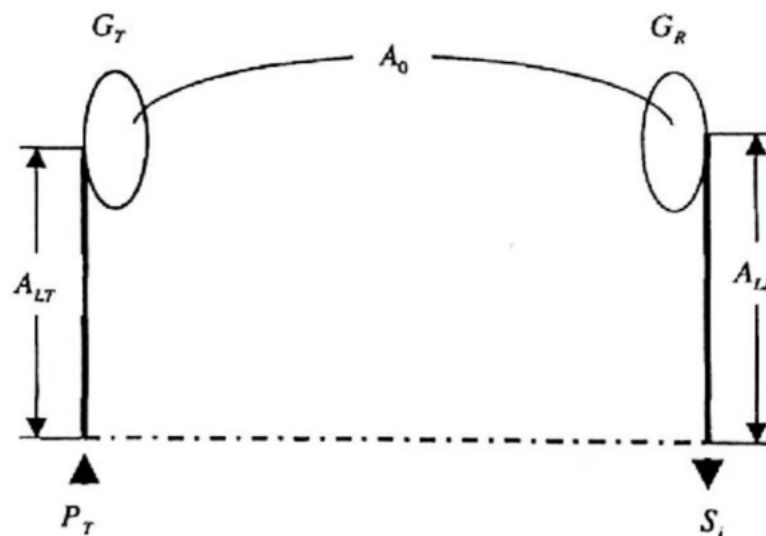


Figura 19: Enlace punto a punto unidireccional.

Podemos expresar que la señal que debe llegar (S_i) es la resultante de la potencia de transmisión (P_t) más las ganancias menos las pérdidas. Las pérdidas están representadas por las de las líneas de transmisión y recepción (A_{LT} y A_{LR} los conectores (A_{CT} y A_{CR}), el espacio libre (A_o) y el margen de fading (M_f). Las ganancias se obtienen de las antenas transmisora y receptora. Se puede expresar la ecuación, en dB, de la siguiente manera:

$$S_i = P_T - A_{CT} + G_T - A_o + G_R - A_{CR} - M_f \quad (50)$$

Donde la Sensibilidad y la potencia de transmisión están en dBm. las pérdidas en dB y las ganancias de las antenas en dBi.

Las atenuaciones de los conectores vienen especificadas de acuerdo a los fabricantes y es típico usar -0,2 dB, las atenuaciones de las guías de ondas y las de los coaxiales vienen especificadas por $-dB/m$ los fabricantes en y se debe tener cuidado porque las antenas aparte de venir en luciros dB_i también suelen venir especificadas en dB_d .

Es muy común partir de conocer los datos de equipamiento Tx y Rx, debiendo calcular las ganancias de las antenas que equilibran el enlace[2].

2.9. De las alturas de las antenas

La recomendación UIT-R P.530 propone métodos de cálculo de las alturas de las antenas.

2.10. Del método en síntesis

1. Se elige el radial por donde se realizará el enlace.
2. Se releva el perfil de la cartografía con todos los datos necesarios.
3. Se curva el terreno.
4. Se suma el perfil
5. Se libera el primer radio de Fresnel.
6. Se obtiene las alturas de las antenas.
7. Se completan las planillas.
8. Se realiza el cálculo de potencias con la ecuación del enlace.
9. Se realiza la visita al sitio.
10. Se hacen los reajustes necesarios y posibles para garantizar el enlace.

2.11. Recomendación UIT-R P.617-5 (vigente): Datos de propagación y técnicas de predicción necesarios para el diseño de sistemas de radioenlaces transhorizonte

En la presente Recomendación figura un método de predicción de la propagación de sistemas de radioenlaces transhorizonte, considerando que se han elaborado métodos que permiten la predicción de la mayoría de los parámetros de propagación importantes que afectan a la planificación de los sistemas de radioenlaces transhorizonte y que, en la medida de lo posible, se han probado estos métodos comparándolos con los datos medidos disponibles y se ha demostrado que con ellos se obtiene una precisión compatible con la variabilidad natural de los fenómenos de propagación y que es adecuada para la mayoría de las aplicaciones actuales en la planificación de los sistemas.

2.11.1. Distribución de la pérdida de transmisión debida a la dispersión troposférica

Las señales recibidas mediante dispersión troposférica presentan variaciones lentas y rápidas. Las variaciones lentas son causadas por los cambios globales en las condiciones de refracción de la atmósfera, son variaciones de entre $4dB$ y $10dB$, y el desvanecimiento rápido se debe al movimiento de las pequeñas irregularidades, que se estiman mediante la aproximación de Rayleigh. Esta recomendación propone un método de estimación del valor medio de la pérdida de transmisión mediana anual, $L(p)$, no rebasada en porcentajes de tiempo p que podrán ser tanto una herramienta de prevención de desvanecimientos como de detección y corrección de esas interrupciones en el servicio.

3. Análisis de aplicaciones comerciales

Para esta sección se pretende exhibir dos aplicaciones comerciales a los fines de contrastar las consideraciones de diseño y demás cuestiones teóricas, puntualmente se analizará el uso del producto ISP Design Center de la empresa tecnológica Ubiquiti Inc. que es un software de simulación para realizar enlaces PtP y PtMP (punto a punto y punto a multipunto), y la herramienta LinkCalc de LigoWave que permite simular el desempeño de un enlace tomando en consideración la información del sitio, distancia, altura de instalación, ganancias de antena, potencia de transmisión y otros factores adicionales para elegir el producto adecuado de LigoWave. En síntesis, ambos productos son ofrecidos por estas empresas, respectivamente, para el cálculo de radioenlaces y su reproducibilidad en función a los equipos de transmisión-recepción que estas ofrecen al mercado.

3.1. ISP Design Center de la empresa tecnológica Ubiquiti Inc.

La herramienta de UBIQUITI ISP Design es un software de simulación para realizar enlaces PtP (Punto a Punto) y PtMP. Como observamos en la imagen, los

primeros dos iconos nos servirán para seleccionar si queremos realizar un enlace PtP o un PtMP. En esta ocasión vamos a dar clic en el segundo icono y al volver a dar clic en el mapa nos aparecerá un enlace punto a punto, el punto de color azul lo tomara como AP (Access Point) y el segundo y tercer punto lo marcara como Estación (CPE).

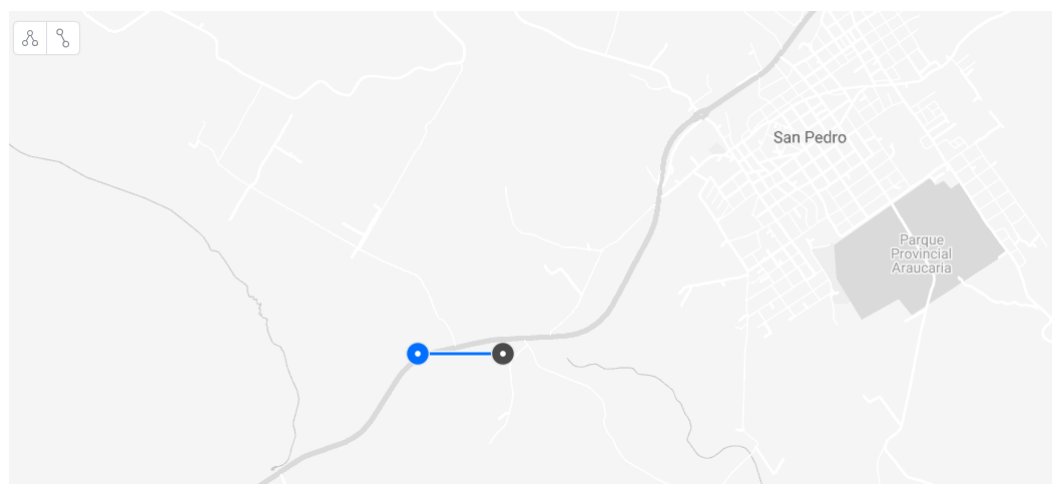


Figura 20: AP ubicado en las cercanías de San Pedro (Misiones)

En la parte inferior de la ventana nos aparece una barra que nos indica la distancia aproximada del enlace y la capacidad en Mbps. Al dar clic en el icono «+» se nos desplegara una ventana donde podremos observar distintos parámetros como: el nombre de los puntos marcados en el mapa, el modelo seleccionado para el enlace, la antena sectorial y su grado de apertura, su locación, la potencia y el canal de transmisión, la altura de colocación y la expectativa de la señal. La herramienta también promete dar un mapa a color de las zonas de cobertura de la antena pero no es 100 % funcional y hay que considerar que la herramienta no toma en cuenta la vegetación que hay en su alrededor ni las estructuras que podrían interferir en la línea de vista. Podremos seleccionar distintos modelos de radios o antenas de acuerdo a la necesidad de nuestro enlace dando clic en el nombre del modelo o sobre la imagen del modelo.

Se analiza el caso de un enlace entre la zona urbana de San Pedro y un punto alto del Parque Nacional Cruce Caballero, el resultado para esta herramienta operando en modo automático es:

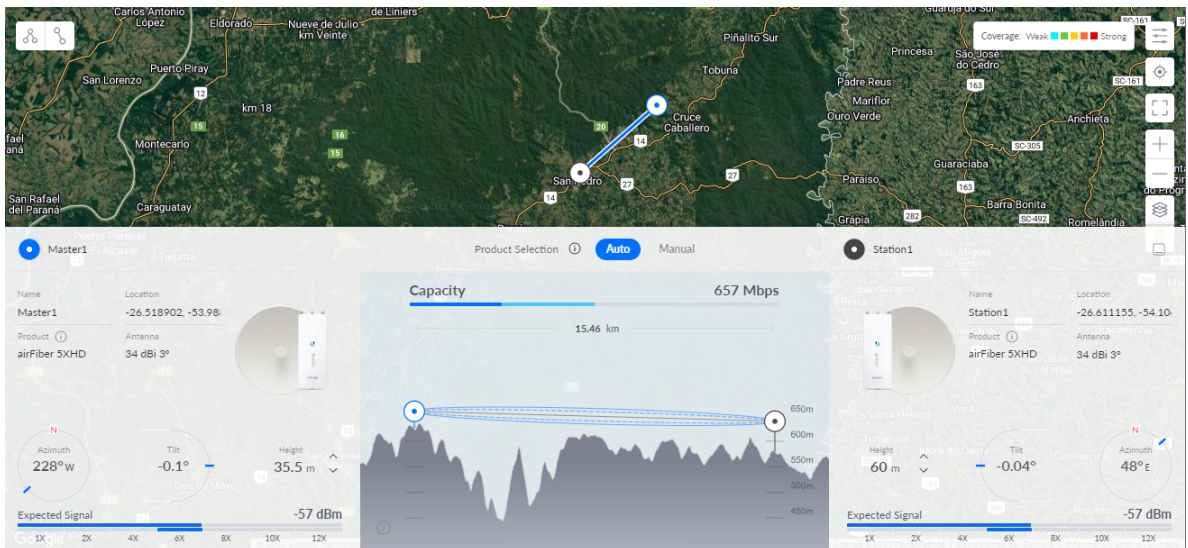


Figura 21: Enlace entre San Pedro y el PN Cruce Caballero.

En este caso tenemos una capacidad del enlace de 657 Mbps, que aunque la herramienta establece también en automático las alturas de las antenas se probó que la antena de AP puede reducirse hasta los 20 m y la CPE hasta los 37 m teniendo la primera zona de Fresnel totalmente despejada haciendo así un enlace exitoso.

3.2. LinkCalc de LigoWave

En la página oficial de LigoWave[15] se ofrece una guía de uso de su herramienta on-line. La herramienta es libre de costo y únicamente se requiere registrarse para obtener acceso. Cada usuario puede crear una base de datos de sus enlaces, descargar un reporte en formato PDF y crear enlaces en línea para compartir sus estudios durante la fase de evaluación. Con una guía rápida de registro que le otorga al describe posteriormente cuales son los pasos para darle los datos de ubicación de los enlaces:

1. Nombre de cada sitio.
2. Seleccione el tipo de radio para cada sitio. Automáticamente se obtendrán los parámetros de frecuencia, potencia de transmisión y ganancia de antena. Si usted lo desea puede utilizar la opción Custom, usted tendrá que proveer la información del equipo a instalar (frecuencia, potencia de transmisión y ganancia de antena).
3. Introduzca la latitud y longitud de cada sitio.
4. Introduzca la altura de instalación (Del nivel de piso) para cada sitio.
5. Introduzca la ganancia de la antena (en caso de no ser automáticamente obtenida por el modelo del radio).

6. Introduzca la potencia de transmisión (en caso de no ser automáticamente obtenida por el modelo del radio).
7. Introduzca los valores de umbral de RX (el valor mínimo de señal para que el enlace trabaje).
8. Introduzca la frecuencia del radio (en caso de no ser automáticamente obtenida por el modelo del radio).
9. Elija la polaridad de la antena.
10. Introduzca cualquier pérdida adicional (pérdidas en el cable coaxial, conectores, etc.)
11. Elija el tipo de clima.
12. Seleccione las unidades de medición (Sistema métrico o inglés).
13. Introduzca la tasa de lluvia de la ITU o utilice el botón de búsqueda para obtenerla automáticamente.

Esta herramienta también cuenta con mas de un servicio de mapas web. Se dará un ejemplo usando la opción «custom» para prescindir de las características de la antena en este ejercicio y sólo tener en cuenta las perdidas en el trayecto. Una acotación que se hace es que la herramienta es inestable ya que una vez dada la orden de cálculo ya no se puede volver atrás para corregir algún parámetro sino que hay que recargar la página y volver a ingresar los datos desde el principio. Como ejemplo se analiza un enlace PtP de Radio-Aficionado (en Argentina se le asigna la banda 5.725-5.825 MHz) con las mismas ubicaciones que en el caso anterior. Para tener una mejor aproximación de la calidad del enlace es necesario una lectura de las características de las antenas que ofrece este fabricante pero para el ejemplo es suficiente mostrar la interfaz gráfica que tiene esta herramienta y su pantalla de resultados en la que analiza si el enlace sería posible o no teniendo en cuenta, principalmente, el despejamiento de la primera zona de Fresnel. Una vez realizado el análisis del emplazamiento permite compartir el proyecto con links, privados o públicos, o sino tambien descargar una planilla con los datos y resultados.

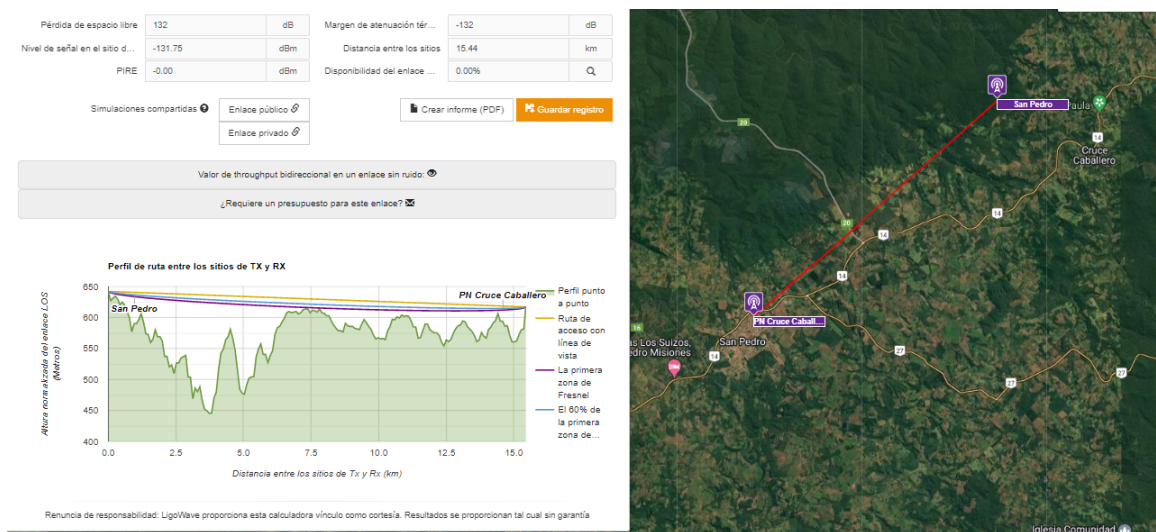


Figura 22: Enlace entre San Pedro y el PN Cruce Caballero.

Como dato, ver que la atenuación por espacio libre coincide con la que se calculó en la sección de consideraciones de diseño dando a entender que utiliza el mismo método.

En contraste, ambas aplicaciones son útiles aunque tengan enfoques distintos debido a que pretenden que se vendan sus productos con la recomendación de estas herramientas, pero se destaca que las dos priorizan el despejamiento del trayecto así como su distancia y las alturas de las antenas.

4. Estado del arte

En el estado actual del desarrollo de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas, es imprescindible reconocer la importancia de la transmisión de información por medio de enlaces de microondas terrestres, ya que por sus bondades reflejadas en sus características de operación -ancho de banda de enlace, capacidad de transmisión, propagación de señal a largas distancias, facilidad de mantenimiento-, entre otras, aportan grandes ventajas con respecto a otros medios de transmisión de enlaces de alta capacidad, tales como la fibra óptica, y aunque de igual manera cuenten con desventajas, tales como la susceptibilidad de interferencias, las afectaciones a la disponibilidad de enlace por factores climáticos, entre otros, este tipo de enlaces representan un método de transmisión óptimo para cubrir grandes distancias, buscando el máximo aprovechamiento del recurso escaso como lo es el espectro radioeléctrico[5].

Han habido recientes investigaciones que abordaron los tópicos explicados en este trabajo. Entre ellas, y para comenzar con este apartado, tenemos un artículo publicado en la revista digital **Telemática**[3] donde se estudia la variación de la refractividad y del radio ficticio de la tierra en Cuba, donde la UIT recomienda utilizar el valor de $k = 4/3$ (así como también en nuestro país) debido a que las características meteorológicas de esos climas son semejantes a las de la Atmósfera Normalizada Internacional. Sus investigaciones descubren que existen múltiples evidencias de que

ese valor no es el adecuado ya que se obtienen gradientes (dn/dh) muchos mayores del índice de refracción, medidos en el primer kilómetro o en los primeros cientos de metros de altura (generalmente 100 m), respecto a los que se obtienen regularmente en los países de clima templado. Este país se puede clasificar como marítimo subtropical, el que presenta un valor medio anual de: $N = 370$ unidades. Por tanto, se obtiene para este un valor medio anual de: $a = 9825$ km ($k = 1.54$) y una variación mensual de k desde 1.467 hasta 1.618, o sea, que el radio ficticio se encuentra entre: 9340 a 10306 km. Un autor al que se hace referencia en este artículo firma que se puede considerar en el Caribe un valor de: $k = 1,7$, en los trayectos sobre tierra, y de 2.4 sobre el mar y que este hecho da lugar a que las pérdidas de transmisión en los enlaces troposféricos en la región sean muy inferiores a las que se obtienen en los países templados, hasta, en promedio, 14 dB, con lo que se reducen los niveles necesarios de potencia de transmisión, y los investigadores afirman que esto ha sido comprobado con el enlace entre Guanabo (Cuba) y La Florida (municipio de la provincia de Camagüey), actualmente en desuso. Los autores afirman que para el país esto tiene una gran importancia práctica por su efecto en los RE (Radio Enlaces), las coberturas del SMT y el radar, a través de tierra y más aún sobre el mar ya que el valor práctico extiende el alcance de los radares (pudiendo mejorar la detección de pequeños objetivos), o los que se disponen a muy bajas alturas. Los alcances en ambos casos se incrementan significativamente, en más de un 21 %, respecto a la condición de refracción normal. Este mismo problema de incertidumbre entre las estimaciones fue abordado por otros investigadores en años recientes, los datos procesados abarcan un período de 38 años de mediciones en dos horarios que se corresponden a las 07:00 y 19:00 hora local y de Cuba y estos refuerzan la idea que se emplee para el mar, mientras no se obtengan nuevos resultados, el mismo valor ($a = 16639$ km) por defecto en los primeros 100 m de altura, lo que es muy significativo para la radio-localización de objetivos a muy bajas alturas o las posibilidades de las líneas de RE. Entre sus conclusiones afirman que el factor de radio ficticio, $k = 4/3$, en general, no es adecuado, a no ser en condiciones atmosféricas específicas obtenidas para cierta región en tiempo real. Los datos aportados aconsejan tomar sobre tierra los datos mostrados por regiones: en La Habana 10000 km; en la Costa Sur 9515 km y en el interior 9736 km, y aclaran que las diferencias notables entre los radios ficticios propuestos para el mar y la tierra, se deben a que en el primero ocurren mayores gradientes -sobre todo de humedad- en los primeros 100m de altura. Como conclusión personal de ésta lectura me queda que los datos proporcionados por la UIT pueden ser supeditados por nuevas mediciones que se hagan en el territorio argentino, y que estas podrían traer ventajas en la predicción en radio enlaces transhorizonte pero sólo si resultan valores de radios ficticios diferentes a los que se dan a TPE (cuadro 1), de lo contrario sería una mala inversión a menos que estas mediciones sean también para revalidar información crucial para el país.

Otra investigación, realizada en Perú, en una red de enlaces de microondas se analizaron los factores climáticos que degradaban la recepción de señales en la ciudad de Iquitos, ubicada en el Amazonía peruana [4]. Respecto de las redes de interconexión dorsal vía microondas, éstas siempre representan un reto de diseño en lo que se refiere a la ingeniería de radiofrecuencia, puesto que se debe proyectar correctamente el comportamiento que tendrán dichos enlaces al ser sometidos a condiciones climáti-

cas variantes, lo cual podría derivar en considerables desvanecimientos de señal y la consiguiente degradación y/o caída de los enlaces de radiocomunicación. En el caso de la ciudad de Iquitos, sus enlaces dorsales provenientes desde la ciudad de Yurimaguas, están basados en enlaces de radio microondas terrestres, presentando en ese entonces un comportamiento deficiente, con presencia de desvanecimientos de señal, y capacidades de transporte de datos por debajo de los valores esperados. En este sentido el presente trabajo de investigación propuso un estudio de ingeniería basado en las normativas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT-R P.453, a fin de poder identificar los fenómenos climáticos asociados a la degradación de señal recibida. El objetivo fue **identificar** en base a la recomendación UIT-R P.453 los factores climáticos asociados a la degradación de señal recibida en segmentos de una ruta de interconexión microondas hacia la ciudad de Iquitos y se justifica académicamente, al buscar relacionar una problemática existente con la base teórica para el diseño de enlaces microondas terrestres. Se indagó respecto al desvanecimiento de la señal recibida en función de la refractividad, a fin de poder identificar y explicar los factores climáticos que afectan una ruta de enlaces de interconexión microondas hacia la ciudad de Iquitos y además contrastando con simulaciones estos resultados. Se opera en banda de 6 GHz, a partir de 13 estaciones que generan un total de 12 enlaces de radiocomunicación, separados en distancias de entre 21km y 43 km midiéndose desvanecimientos de hasta 23 dB, La identificación de condiciones climáticas asociadas a la ocurrencia de desvanecimientos se realizó tomando en cuenta los valores de presión atmosférica, temperatura y presión de vapor de agua. Los seis enlaces que igualan o superan los 40 Km emplean diversidad espacial, lo cual indica un criterio de prevención de efectos permanentes de desvanecimiento. En tal sentido los resultados obtenidos por la presente investigación coinciden con los criterios de diseño señalados. En ese mismo orden de ideas existen otros seis enlaces de menor distancia que no cuentan con diversidad espacial. Conforme a los resultados obtenidos, los enlaces Santa Cruz – Lagunas, y Santa Rosa – Chapajilla son los que podrían estar sujetos a mayores condiciones de desvanecimiento, pudiendo ser los más vulnerables a generar indisponibilidad. Se identificó una condición climática conducente a desvanecimientos a temperaturas entre 18°C y 20 °C y humedad entre valores 68 % a 90 %. La segunda condición climática conducente a desvanecimientos se identificó al llegar a valores de temperaturas superiores a 25°C con valores de humedad superiores al 80 %. Estas condiciones guardan relación con la necesidad de proteger los enlaces de mayor longitud mediante técnicas de diversidad espacial. El análisis de refractividad empleado para la identificación de condiciones climáticas desfavorables se ha realizado a partir de la evaluación de 16 valores de refractividad en cada enlace, sin embargo, es posible aumentar este valor para mejorar la caracterización de los desvanecimientos, o identificar desvanecimientos selectivos. , pudiendo recomendarse en este sentido la revisión de la necesidad de emplear diversidad espacial. Se recuerda al lector que el anglicismo para «desvanecimiento» es *fading*, tratado en este trabajo.

Un muy reciente aporte ruso ha comparado tres maneras de hacer cálculos de enlaces transhorizontes: el propuesto por la UIT, el de V. V. Serov y el de V. I. Shloma [6] (también rusos, contemporáneos de la URSS). Actualmente, la predicción de la dispersión troposférica a lo largo de las trayectorias se basa en métodos empíricos o

semi-empíricos. Dos métodos se publicaron en 1965 y se han utilizado como material de referencia para la investigación del UIT-R durante más de 20 años. Uno de ellos corresponde a una versión simplificada del método de la Oficina Nacional de Normas de los Estados Unidos (NBS), publicado por primera vez en mayo de 1965. Un método es el conocido de la UIT y tratado ya en este trabajo. Otro es el que propone V. V. Serov que es similar al de la UIT pero se tiene en cuenta la atenuación por difracción (que es función de la frecuencia y del despejamiento relativo del camino, también se parece mucho al cálculo propuesto en este trabajo y se justifica esta adición teniendo en cuenta el radio real de la tierra), por dispersión troposférica, la debida a gases atmosféricos y lluvia con una intensidad de hasta 150 mm/h y las características climáticas del tiempo a temperaturas de -5° a 30°C , en distancias de hasta 700 km. En pocas palabras toma en cuenta las atenuaciones que se han dejado de lado en la sección de consideraciones de diseño a excepción de la atenuación por vegetación. La metodología de V.I. Shloma se basan en datos obtenidos del libro de Davydenko pero con algunas modificaciones: la atenuación causada por el fading es hecha teniendo en cuenta la dispersión atmosférica que se produce en las diferentes estaciones del año recomendando que para los meses de verano es necesario reducir los valores en 12 dB y 6 dB en los meses de otoño y primavera en, también analiza las pérdidas de ganancia de antena y las irregularidades del terreno. Los métodos permiten estimar las pérdidas sin conocer el valor de la potencia del transmisor, la temperatura del receptor, el ancho de banda del receptor, el ruido del receptor, Las estimaciones seguían Shloma son mas estrictas al tener en cuenta el desvanecimiento rápido y lento en las diferentes estaciones del año, que los métodos de Serov y la recomendación UIT no. En una ilustración se tiene el ejemplo de un caso de una potencia de transmisión de 600 W (no posible en Argentina) con una temperatura en la receptora de 17°C , una ganancia de antena de 44 dB y una figura de ruido de recepción de 3,5 dB; en horizontal se tiene una línea de "pérdida máxima admisible" que dice que esta distancia máxima que impone el método de Shloma, para las condiciones dadas, es de un poco menos de la mitad de lo que la UIT y Serov estimaron.

Por último otro trabajo que centra su atención en la dispersión troposférica (troposcatter)[8], dice que en comparación con la comunicación de línea de vista (LSS), el mérito más importante de la comunicación de dispersión troposférica es la distancia de propagación y es un medio de comunicación muy maniobrable y fiable. Es capaz de anti-interferencia y anti-intercepción, y debido a tantas ventajas, es uno de los pocos métodos de comunicación que quedan para uso militar.

Las comunicaciones por satélite (SATCOM) dominaron las aplicaciones de comunicación más allá de la línea de vista (b-LoS ó beyond line-of-sight) porque la comunicación de dispersión troposférica requiere grandes antenas reflectoras parabólicas y amplificadores de alta potencia debido a las altas pérdidas de trayectoria. Sin embargo, dado que las señales de los satélites se propagan en grandes áreas, los enlaces SATCOM pueden tener problemas de seguridad y los enlaces de comunicación pueden estar expuestos a interferencias hostiles. Además, SATCOM tiene altos retrasos de transmisión de más de 500 ms. Por otro lado, los enlaces de dispersión troposférica tienen diferenciales de retardo de solo unos pocos milisegundos, proporcionan un enlace de comunicación punto a punto y además, la utilización de antenas de haz

estrecho limita significativamente la dispersión Doppler que experimenta el canal en movimiento. Troposcatter se ha convertido en un candidato prometedor para las comunicaciones b-LoS, especialmente después del desarrollo de equipos avanzados. Los amplificadores de última generación pueden alcanzar una potencia de transmisión de hasta 2 kW, y los modernos módems de dispersión troposférica pueden funcionar a velocidades de datos de 22 Mb/s, dice el autor. La región de dispersión más fuerte del canal de dispersión troposférica no tiene un tamaño fijo o siempre tiene la misma forma, los ambientes marítimo-subtropicales y los ambientes marinos tienen pérdidas significativamente menores. Las pérdidas son significativamente mayores en climas desérticos y fríos, por lo que la comunicación por dispersión troposférica es menos prometedora en estos entornos. Por otro lado, los efectos de las nubes y los hidrometeoros más pequeños pueden ignorarse para los enlaces de dispersión troposférica porque los enlaces de dispersión troposférica modernos utilizan un rango de frecuencia de 4,4 GHz a 5 GHz (se mencionó en las consideraciones de diseño este mismo criterio) que es demasiado bajo para verse afectado por partículas tan pequeñas. Las aplicaciones b-LoS de última generación pueden requerir enlaces b-LoS móviles. Sin embargo, los estudios de dispersión troposférica disponibles solo consideran las comunicaciones de dispersión troposférica fijas. Los avances recientes en los equipos de dispersión troposférica hacen posible que los equipos de dispersión troposférica sean transportables. El uso de antenas de haz angosto limitará la dispersión Doppler y la dispersión troposférica se puede usar en aplicaciones móviles b-LoS. Por estas razones, proporcionan el análisis de coherencia distancia/tiempo para analizar los efectos de movilidad y el ancho de banda de coherencia para encontrar los niveles de ancho de banda en los que el canal tiene un desvanecimiento plano. La principal fuente de dispersión Doppler será la velocidad del vehículo pero dado que las comunicaciones por dispersión troposférica utilizan haces muy estrechos se espera que la dispersión Doppler debido a la movilidad sea baja y la orientación de la antena puede ajustarse de forma adaptativa mediante técnicas de antena adaptativa. Se charla sobre las áreas de aplicación de las comunicaciones b-LoS que pueden ser la militar que requieren baja latencia, altas velocidades de datos y alta seguridad, y aplicaciones civiles donde el candidato más importante son las plataformas de producción de petróleo y gas en alta mar porque los cables de fibra submarinos son demasiado caros a pesar de que proporcionan la mejor calidad de comunicación. SATCOM de alta capacidad tiene un costo operativo mucho más alto en comparación con la fibra submarina y la dispersión troposférica. Entonces, según el análisis del autor, el tiempo de coherencia del canal de dispersión troposférica es del orden de milisegundos. Por lo tanto, la movilidad en las comunicaciones por dispersión troposférica es prometedora y constituye un importante área de investigación abierta.

5. Conclusiones

Cuando un punto de acceso es colocado bajo un escritorio, la elección del lugar y la antena es esencial. Dependiendo del hardware, factor a considerar.

Cuando hay que diferenciar la propaganda comercial de la verdad una antena o transmisor no tiene una distancia específica o radio de alcance. La ganancia de

una antena o la potencia de transmisión de un dispositivo de radio son los datos relevantes, un buen presupuesto de enlace es un requerimiento básico para el buen funcionamiento del mismo ya que un presupuesto de enlace de una red inalámbrica es la cuenta de todas las ganancias y pérdidas desde el radio transmisor hacia el receptor.

Las pérdidas más grandes del enlace se producen en la propagación en espacio libre debido a la atenuación geométrica de la señal y la sensibilidad del receptor es un parámetro que indica el valor mínimo de potencia que se necesita para alcanzar una comunicación exitosa. Se mostró que hacer un relevamiento de los índices de refracción troposféricos puede ayudar a reducir los costos de instalación de las antenas, así como también una revisión de los datos de temperatura media, presión atmosférica, presión del vapor de agua y también el radio ficticio de la tierra. Y en la elección de los emplazamientos de las antenas es conveniente, en primer lugar, hacer un mapeo de cuales son los lugares estratégicos para ubicarlos, como esos en los que ya hay torres en las cuales se puedan montar nuevas antenas o relieves elevados que faciliten una línea de vista.

Referencias

- [1] Rábanos, J.M.H. (2008). Transmisión por Radio (6^a ed.). Madrid, España: Editorial universitaria Ramón Areces.
- [2] Danizio, P. E. (2004). Introducción al Cálculo de Radioenlaces (1^a ed.). Córdoba, Argentina: Universitas.
- [3] José Rafael Sandianes Gálvez, Lányer Pérez Garlobo y Rafael Galindo, 2021, *La refractividad de la tropósfera y el radio ficticio de la tierra en Cuba*.
- [4] Del Rosario Hidalgo Chirstopher Igor, 2019, *Identificación de factores climáticos asociados a la degradación de señal recibida, en un segmento de interconexión hacia la ciudad de Iquitos, en base a la recomendación IUT-R P.453*, link: [click aquí](#).
- [5] Jorge Alexander Llanos Albarracín, 2019, *Diseño de radioenlaces de Microondas terrestres entre las ciudades de Bogotá, Bucaramanga, Medellín y Cali*, link: [click aquí](#).
- [6] I. V. Golovkin y M. M. Tolkachev, 2020, *Review Methods for Calculating the Path Losses in a Closed Trans-Horizon Radio Link*, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia. Publicado en «2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications»(Moscú).
- [7] Chr. Huygens, *Traité de la Lumiere* (completed in 1678, published in Leyden in 1690).
- [8] Adani, Daud Hafidh, 2020, *A communication system based on tropospheric scattering*.
- [9] Recomendación UIT-R P.617-5 (08/2019), Datos de propagación y técnicas de predicción necesarios para el diseño de sistemas de radioenlaces transhorizonte.
- [10] Recomendación UIT-R P.526, Propagación por difracción (10/2019, en vigencia).
- [11] Recomendación UIT-R P.676-6, Atenuación debida a los gases atmosféricos.
- [12] Recomendación UIT-R P.530-18 (09/2021), Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa.
- [13] Recomendación UIT-R P.838-3, Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción.
- [14] Recomendación UIT-R P.453-14 (08/2019) Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad.
- [15] Página oficial de LigoWave: [click aquí](#).