

Uso de la banda de 2,4 GHz según la regulación colombiana

2,4 GHz band use according with colombian regulation

ROBERTO CÁRDENAS CASTIBLANCO

Ingeniero Electrónico, Magíster en Teleinformática. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. rcardenas@udistrital.edu.co

Clasificación del artículo: Reflexión (recreaciones)

Fecha de recepción: febrero 14 de 2010

Fecha de aceptación: agosto 3 de 2010

Palabras clave: Banda libre, Distancia, Frecuencia, Regulación.

Key words: Free band, Distance, Frequency, Regulation.

RESUMEN

En este artículo se proponen cálculos sobre la banda de frecuencia libre de 2.4 GHz, usando las especificaciones del comité IEEE 802.11, y enmarcándola en el cumplimiento de las normas colombianas vigentes para esta banda.

Las bandas de frecuencia no licenciadas para telecomunicaciones han sido objeto de regulación internacional y nacional por más de 30 años y actualmente suman 689,5 MHz del espectro radio eléctrico. Esta regulación ha permitido el surgimiento de sistemas de bajo costo y de consumo masivo. En este artículo se examina el cálculo de enlaces en estas bandas usando la actual regulación colombiana.

ABSTRACT

In this paper some calculus over 2, 4 GHz frequency band have been proposed, using the 802.11 standard and reviewing the fulfillment of current local official framework for this frequency band.

The unlicensed frequency bands for telecommunications have been regulated by international and national agencies for over 30 years and nowadays they are 689.5 MHz of the radio electric spectrum. This regulation has allowed the emergence of low cost systems for mass consumption. This paper examines the calculation of links in these bands using the current Colombian regulations.

1. Introducción

Los cálculos para enlaces radioeléctricos que son usados para tecnologías de línea vista han sido muy estudiados, especialmente para enlaces de microondas. Sin embargo, el surgimiento de tecnologías inalámbricas – funcionando en modalidades punto-a-punto, punto-a-multipunto, y multipunto-a-multipunto para ambientes urbanos y sub-urbanos, las cuales aplican sistemas de modulación adaptables – ha llevado a que se generen nuevos modelos para el cálculo de enlaces e inclusive a nuevas reglamentaciones. En este artículo se explora la formulación para enlaces en la banda libre de 2,4 GHz, cuyo uso ha sido reglamentado por el Ministerio de Comunicaciones de Colombia, el cual coincide con las características de funcionamiento de la popular tecnología IEEE 802.11.

2. Fundamentos teóricos del cálculo de un enlace

Conviene inicialmente definir los términos ganancia del sistema y margen de desvanecimiento. Se define como ganancia del sistema la diferencia entre la salida de potencia nominal de un transmisor y la sensibilidad del receptor, esto es:

$$Ganancia\ del\ sistema = P_{tx} - S_{rx} \quad (1)$$

Se entiende como margen de desvanecimiento (Md), la potencia extra de la señal adicionada al enlace de radio para asegurar que este continuará funcionando aun si sufre efectos anómalos de propagación de señal (condiciones atmosféricas, multitrayectoria). Se puede calcular así:

$$Md\ (db) = Ganancias\ (db) - Pérdidas\ (db) \quad (2)$$

Donde

$$Ganancias(db) = Ganancias\ del\ sistema(db) + Ganancia\ de\ antenas(dBi) \quad (3)$$

y,

$$Pérdidas\ (dB) = Pérdidas\ cables/conectores\ (dB) + Pérdidas\ espacio\ libre\ (PEL). \quad (4)$$

El parámetro PEL (pérdida en espacio libre) suele definirse como una pérdida sufrida por una onda electromagnética al propagarse en línea recta por un vacío, sin absorción ni reflexión de energía en objetos cercanos. Como se anota en [1], hay que tener cuidado con la interpretación de esta definición. La pérdida en trayectoria por el espacio libre es una cantidad técnica artificial para expresar que la energía se reparte alejándose de la fuente, y se produce una menor densidad de potencia en determinado punto a determinada distancia de la fuente. Al definirse PEL de esta forma, se está considerando que el enlace debe tener línea de vista, condición que se ajusta para los equipos IEEE 802.11.

Es conveniente definir la variable parámetros antena-radio (PAR) así:

$$PAR\ (dB) = Ganancia\ sistema\ (dB) + Ganancias\ antenas\ (dBi) - Pérdidas\ cables/conect.\ (dB) \quad (5)$$

Reemplazando las ecuaciones (3), (4) y (5) en la Ec. (2) llegamos a:

$$Md\ (db) = PAR\ (db) - PEL\ (db) \quad (6)$$

Ahora bien, PEL lo podemos calcular como:

$$\begin{aligned}
 PEL(db) &= 10 \log \left(\frac{P_{tx}}{P_{rx}} \right) \\
 PEL(db) &= 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \\
 PEL(db) &= 20 \log(4\pi) + 20 \log \left(\frac{d}{\lambda} \right)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Donde λ es la longitud de onda, P_{rx} la potencia recibida por el receptor, P_{tx} la potencia del transmisor y d la distancia de separación entre las antenas del transmisor y el receptor.

Ahora se introduce el parámetro pérdida en la primera longitud de onda (pplo) así:

$$\begin{aligned}
 pplo (dB) &= [20 \log(4\pi) + 20 \log(d/\lambda)]_{d=1} \\
 pplo (dB) &= 20 \log(4\pi) \text{ dB} = 22 \text{ dB}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Reemplazando la definición (8) en el cálculo enunciado en (7) se tiene:

$$PEL (dB) = pplo (dB) + 20 \log(d/\lambda) \tag{9}$$

Usando las expresiones (9) y (6), aplicando las propiedades de los logaritmos y definiendo:

$$k = 1 / (20 \log e) \tag{10}$$

Se puede encontrar la ecuación para el cálculo de la distancia:

$$\begin{aligned}
 d(m) &= \lambda(m) \exp \{k [PAR (dB) - \\
 &\quad pplo (dB) - Md (dB)]\}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Equivalentemente, al usar las ecuaciones (6) y (7) se podría calcular la distancia de la siguiente forma:

$$d(m) = \left[\frac{\lambda(m)}{4\pi} \right] * \sqrt{10^{[PAR(db) - Md(db)]/10}} \tag{12}$$

Para expresar d en millas, se hace la siguiente conversión:

$$d (\text{millas}) = 1609 d (m) \tag{13}$$

3. Encontrando la longitud de onda

Al usar las expresiones (11) o (12) es necesario calcular la longitud de onda. Para ello se puede proceder de la siguiente forma:

$$\lambda(m) = v (m/s) / \text{frecuencia (MHz)} \tag{14}$$

Siendo v la velocidad de la luz en condiciones de propagación, la cual se calcula como:

$$v = c / n \tag{15}$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción de la troposfera.

El índice de refracción en la troposfera depende de la temperatura, la presión y la presión parcial del vapor de agua y está usualmente caracterizado por una cantidad llamada refractividad, la cual se define como:

$$N = (n-1) \times 10^6 \quad (16)$$

En [2] se encuentra que:

$$N = 315 e^{-h/7,35} \quad (17)$$

Donde h (en Km) es la altura sobre el nivel del mar y varía de 0 a 7,35.

Aunque se puede hacer un cálculo exacto para un sitio específico, si se quiere formular un cálculo promedio se tienen que hacer consideraciones acerca de una altura promedio en una zona. El dominio aprobado para la zona colombiana en 2,4 GHz es llamado N/A – FCC (Norte/Américas). En una herramienta de cálculo de carácter general como la descrita en [3] está implícito el valor $h = 2,442$ Km para este dominio. En tal caso, usando las expresiones (16) y (17), se tiene que:

$$n = 1,000225954$$

Por tanto, usando (15), se obtiene:

$$v = 299932,2291 \text{ Km/s} \quad (18)$$

La expresión (18) habilita para hacer el cálculo descrito en (14).

4. Sensitividad

En la Ec. (1) se había mencionado el término sensitividad para el cálculo de ganancia del sistema; por tanto, es pertinente aclarar el término. La sensitividad de un receptor indica qué tan débil puede ser una señal RF para ser recibida con éxito por el receptor. Entre más baja sea la potencia que el receptor pueda procesar exitosamente, mejor es su sensitividad.

En un receptor 802.11, la sensitividad es aquella potencia necesaria para garantizar que no habrá un

BER (*Bit Error Rate*) mayor a 10^{-5} . Las sensitividades no están especificadas en el estándar, pero entre más bajos sean estos valores mejor será la calidad del equipo. Ahora se trata de encontrar la forma de calcularla.

En [4] se encuentra la ecuación para sensitividad de un receptor de espectro ensanchado, aplicable para 802.11 (espectro ensanchado usando secuencia directa):

$$S \text{ (dBm)} = NF \text{ (dB)} + kTB_{RF} \text{ (dBm)} + E_b/N_o \text{ (dB)} - PG \text{ (dB)} \quad (19)$$

Siendo,

S_{in} = potencia de señal disponible en la entrada (W).

N_{in} = potencia del ruido térmico disponible en la entrada (W).

S_{out} = potencia de señal disponible en la salida (W).

N_{out} = potencia del ruido disponible en la salida (W).

El factor de ruido se calcula igual para un receptor de una etapa, múltiples etapas, o para el receptor completo. Un dispositivo que cumpla con 802.11 tiene una figura de ruido de 10 dB y un margen de implementación de 5 dB según [5], sección 17.3.10.1. Sin embargo, los fabricantes se esfuerzan cada vez más por obtener una figura de ruido menor, lo que potencialmente podría diferenciarlos de la competencia. Por ello se encuentra en [6], el anuncio de un receptor 802.11 con una figura de ruido de 8,3 dB, mientras que en [7] se reporta un receptor con una figura de ruido típica de 4 dB. En [8] se menciona una sensitividad de -98 dBm. Para tener una idea de la importancia práctica de este parámetro, se ha observado que si se tiene una red Wi-Fi en malla y se logra una mejora de 3 dB

en la sensibilidad del receptor, esto se ve reflejado en una reducción de costos y de densidad de nodos de hasta 30%, dependiendo del terreno; mientras tanto, una mejora de 6 dB podría significar una reducción de hasta 50%.

kTB_{RF} : Ruido térmico esperado en la entrada de un receptor 802.11, siendo,

k: cte. de Boltzmann = 1.38×10^{-23} J/°K/Hz

T: temperatura ambiente = 20 °C = 293 °K

B_{RF} : ancho de banda del receptor = 18 MHz [9]

Para un receptor 802.11 se obtiene que kTB_{RF} (dBm) = $10 \log (1.38 \times 10^{-23} \times 293 \times 18 \times 10^6 \times 1 \times 10^3)$ = -101.4 dBm

E_b/N_0 (energía de la señal por bit a densidad de potencia de ruido por Hertz) es un factor que depende la modulación que se esté usando y del BER (*Bit Error Rate*). Por ejemplo, en 802.11 a una tasa de 1 Mbps @ BER = 10^{-5} se usa la modulación DBPSK. De acuerdo con [10], la probabilidad de error de bit para esta modulación es:

$$P_{b_DBPSK} = \frac{1}{2} \cdot \exp(-E_b/N_0)$$

Si se hace $P_{b_DBPSK} = \text{BER}$, tendremos que $E_b/N_0 = 10,82$ o E_b/N_0 (dB) = 10,34 dB.

PG = Ganancia de procesamiento. Este es un factor que está íntimamente relacionado con la tecnología usada de espectro ensanchado. Si se toma como ejemplo lo especificado en [11], para velocidades de 1 y 2 Mbps, se observará el siguiente comentario: “De acuerdo con las regulaciones de la FCC, el sistema DSSS (espectro ensanchado por secuencia directa) debe proporcionar una ganancia de procesamiento de al menos 10 dB. Esto se puede lograr con una señal banda base de chips (chip = símbolo de la secuencia de ensanchamiento) de 11 MHz, con un código PN (seudoaleatorio) de 11 chips”[11].

Teóricamente la ganancia de procesamiento es de $10 \log_{10} n$, donde n es el número de chips de la secuencia [12]. El código pseudoaleatorio en este caso es la secuencia Barker de 11 chips [13], y luego la ganancia de procesamiento es $10 \log(11)$ = 10,41 dB.

Finalmente se puede calcular la sensibilidad a 1 Mbps para un receptor 802.11 reemplazando adecuadamente los anteriores cálculos en la Ec.(19), y considerando NF = 8,3 dB:

$$S \text{ (dBm) @ 1 Mbps} = 8,3 \text{ (dB)} + (-101,4 \text{ dBm}) + 10,34 \text{ dB} - 10,41 \text{ dB} = -93,17 \text{ dBm}$$

Los fabricantes usualmente especifican la sensibilidad del receptor a diferentes tasas. Para un receptor, entre más alta sea la tasa de datos, menor será su sensibilidad, porque para ello se requiere más potencia en receptor. Como ejemplo, en la Tabla 1 se muestran las sensibilidades incluidas en la herramienta descrita en [3].

Tabla 1. Sensibilidad para receptores 802.11b/g.

SENSITIVIDAD PARA RADIOS 802.11g	
Rata de datos (Mbps)	Umbral (-dBm)
54,0	72
48,0	73
36,0	77
24,0	81
18,0	84
12,0	86
11,0	85
9,0	89
6,0	90
5,5	89
2,0	91
1,0	94

SENSITIVIDAD PARA RADIOS 802.11b	
Rata de datos (Mbps)	Umbral (-dBm)
11,0	85
5,5	89
2,0	91
1,0	94

5. Cálculos de la distancia

En [14], el Ministerio de Comunicaciones de Colombia fija los siguientes rangos de frecuencias radioeléctricas, para su libre utilización por sistemas de acceso inalámbrico y redes inalámbricas de área local:

- Banda de 902 a 928 MHz;
- Banda de 2 400 a 2 483,5 MHz;
- Banda de 5 150 a 5 250 MHz;
- Banda de 5 250 a 5 350 MHz;
- Banda de 5 470 a 5 725 MHz;
- Banda de 5 725 a 5 850 MHz.

Teniendo en cuenta que la banda de frecuencia en la que estamos interesados es 2 400 a 2 483,5 MHz, se puede escoger para hacer cálculos de distancia las ecuaciones (11) o (12), y la frecuencia de 2 442 MHz, la cual se encuentra en la mitad de esta banda. Además se asume un valor de $M_d = 10$ dB, el cual se ajusta para muchas situaciones reales.

Al efectuar cálculos de distancia, es necesario conocer algunos datos para hallar PAR (ver Ec. (5)). Como ejemplo, se especifican los siguientes parámetros aplicables a enlaces hipotéticos de 11 Mbps y 2 Mbps:

- Antenas para cada extremo: Yagi (13,5 dBi)
- $P_{tx} = 100$ mW (20 dBm)
- $S_{rx @ 11 Mbps} = -80$ dBm
- $S_{rx @ 2 Mbps} = -90$ dBm
- Pérdidas en los cables y conectores en cada extremo = 1,34 dB.

Inicialmente se calcula PAR @ 11 Mbps usando la expresión (5):

$$PAR@11Mbps = (20 \text{ dBm} - (-80 \text{ dBm})) + (13,5 \text{ dBi} + 13,5 \text{ dBi}) - (1,34 \text{ dB} + 1,34 \text{ dB}) = 124,32 \text{ dB} \quad (20)$$

De forma similar PAR @ 2 Mbps sería:

$$PAR@2Mbps = (20 \text{ dBm} - (-90 \text{ dBm})) + (13,5 \text{ dBi} + 13,5 \text{ dBi}) - (1,34 \text{ dB} + 1,34 \text{ dB}) = 134,32 \text{ dB} \quad (21)$$

Reemplazando el resultado (20) en la Ec. (12), haciendo la conversión (13) e incluyendo todos los valores especificados, se tiene que:

$$\text{Distancia @ 11 Mbps (millas)} = 3,24 \text{ millas} \quad (22)$$

De forma análoga, reemplazando el resultado (21) en la Ec. (12), haciendo la conversión (13) e incluyendo los parámetros se llega a:

$$\text{Distancia @ 2 Mbps (millas)} = 10,28 \text{ millas} \quad (23)$$

6. Comprobando el cumplimiento de la normatividad

La normatividad para el uso del espectro en la banda de 2,4 GHz [14] define un parámetro llamado PIRE (potencia radiada isotrópica efectiva). La PIRE (EIRP en inglés) es la potencia equivalente que tendría que radiar una antena isotrópica para alcanzar la misma densidad de potencia en la dirección elegida y en determinado punto, donde puede existir

otra antena. En esencia este es un parámetro que nos permite interrelacionar la potencia total radiada (Watts) de un transmisor, también conocida como potencia nominal, con la ganancia de la antena en dBi y las pérdidas por cables y conectores. La PIRE no puede sobrepasar a un valor máximo y da flexibilidad en el diseño, ya que permite combinar diferentes potencias de transmisión con diferentes tipos de antenas, y se define como:

$$\text{PIRE (dBm)} = \text{Prad (dBm)} + \text{Gant (dBi)} - \text{Pérdidas en cables/conectores (dB)} \quad [3] \quad (24)$$

En la Tabla 2 se resume el uso de la banda de 2,4 GHz según [14] y se muestra el valor de la PIRE máxima.

Tabla 2. Uso de la banda de 2,4 GHz según el Ministerio de Comunicaciones.

Banda (Ghz)	Potencia Maxima de Transmision (dBm)	PIRE Maxima (dBm)	Potencia Maxima de Transmision (dBm) @ G >	Potencia Maxima de Transmision (dBm) @ G >6 dBi punto
2,4-2,835	30	36	$30 - [(G-6)/3]$	$30 - (G-6)$

Se podría interpretar esta información así: la potencia máxima de transmisión para un enlace es 1 Watt (30 dBm) y la PIRE máxima es de 36 dBm. Para enlaces punto a punto, si la ganancia de antena es mayor a 6 dBi, se disminuye la potencia del transmisor en un 1 dBm por cada 3 dBi que sobrepase la ganancia de antena a 6 dBi. Si el enlace es punto-multipunto y si la ganancia de antena es mayor a 6dBi, se disminuye la potencia del transmisor en 1 dBm por cada dBi que sobrepase la ganancia de antena a 6 dBi.

Ahora se verifica si el ejemplo desarrollado cumple con esta reglamentación:

$$\text{PIRE (dBm)} = 20 \text{ dBm} + 13,5\text{dBi} - 1,34 \text{ dB} = 32,16 \text{ dBm} \quad (25)$$

Se observa que el resultado (25) está por debajo de la PIRE máxima de 36 dBm.

Ahora se halla por la potencia máxima de transmisión según [14]:

$$\text{Potencia máxima de transmisor (dBm)} = 30 - ((13,5-6)/3) \text{ dBm} = 27,5 \text{ dBm.} \quad (26)$$

Como se está transmitiendo con 20 dBm, también se cumple con esta norma, ya que la potencia máxima de transmisión es 30 dBm.

7. Ajuste de la ecuación de distancia

Existe un fenómeno llamado *receiver variation* (Rv) que influye en la formulación de distancia [15].

La Figura 1 muestra dos ejemplos de cómo la probabilidad de entrega varía con el sitio desde donde se produce la transmisión. Cada mapacorresponde a un transmisor diferente (S), aunque están muy cercanos entre sí (adyacentes); los nodos receptores se representan con discos cuyos tamaños indican la fracción de paquetes que el nodo recibe desde el transmisor.

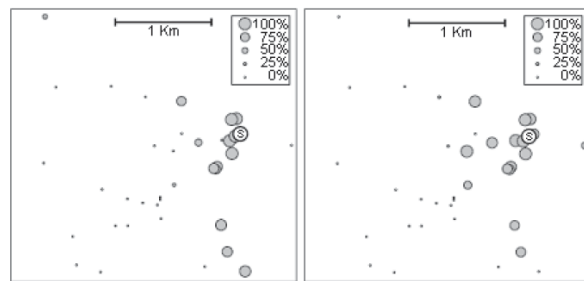


Figura 1. Probabilidad de entrega desde dos sitios adyacentes.

Como los dos transmisores están muy cerca el uno del otro, se esperaría que los patrones de recepción en ambos casos sean similares. Sin embargo, como

se muestra, los patrones son bastante diferentes. Las diferencias están estrechamente relacionadas con los obstáculos en el ambiente, con las diferentes alturas de las antenas y el desvanecimiento multitrayectoria, e implican la existencia de ciertos puntos donde la recepción es gobernada por los obstáculos y la geometría, en vez de la pérdida en espacio libre (PEL). En [15] se encontró que en un número significativo de enlaces no hay una relación discernible entre distancia y probabilidad de entrega.

Este fenómeno se puede considerar en las ecuaciones mediante la introducción de un factor llamado *receiver variation*, R_v , anotándolo como una pérdida adicional en el cálculo de PAR. Esto lleva a redefinir PAR, expresado con anterioridad en la Ec. (5), así:

$$\text{PAR(dB)} = \text{Ganancia del sistema (dB)} + \text{Ganancias de antenas (dBi)} - [\text{Pérdidas cables/ conectores(dB)} + R_v \text{ (dB)}]$$

(27)

En [3] se puede observar que un valor práctico de R_v es 1,7 dB. Si el ejemplo desarrollado se recalcula con este valor, se tendrá:

$$\text{Distancia @ 11 Mbps (millas)} = 2,6 \text{ millas}$$

(28)

$$\text{Distancia @ 2 Mbps (millas)} = 8,22 \text{ millas.}$$

(29)

La inclusión de esa corrección se traduce en una disminución de la distancia.

8. Introducción de otros factores en el cálculo de la distancia

W.TBarnett, de *Bell Telephone Laboratories*, describió en abril de 1969 formas de calcular el tiempo de interrupción debido al desvanecimiento en una trayectoria sin diversidad, en función del terreno, el clima, la longitud de la trayectoria y el margen de desvanecimiento.

ArvidsVignant, también de *Bell Laboratories*, dedujo en junio de 1970 fórmulas para calcular el mejoramiento efectivo alcanzable mediante diversidad espacial vertical, en función de la distancia de separación, longitud de la trayectoria y frecuencia.

Al resolver las ecuaciones de Barnett-Vignant para determinada disponibilidad anual de un sistema no protegido (sin respaldo) y sin diversidad, se puede obtener una expresión para margen de desvanecimiento.

La ecuación de margen de desvanecimiento se puede encontrar en [16]:

$$M_d = 30 \log D_{BV} + 10 \log (6 abf) - 10 \log (1-R) - 7$$

(30)

Dónde:

- M_d = margen de desvanecimiento (dB)
- D_{BV} = distancia en Km
- f = frecuencia en GHz
- R = disponibilidad anual en decimales (p.e. 0.9999)
- a = factor de aspereza (factor de terreno)
- $a = 4$ para terreno muy suave sobre agua, desierto plano

- $a = 1$ para terreno promedio con algunas desigualdades
- $a = 0.25$ para montañas con muchas desigualdades
- $b =$ factor para convertir la probabilidad del peor de los meses en probabilidad anual (factor climático)
- $b = 0.5$ para áreas calientes, humedad costera
- $b = 0.25$ para áreas normales, temperatura interior o áreas subárticas
- $b = 0.125$ para áreas montañosas o muy secas y no reflectivas

Combinando las ecuaciones (30), (6) y (7), y con PEL en dB, se puede encontrar que:

$$D_{BVmillas}^3 = \left\{ \frac{[(1-R) \times 106 \times 10PAR/10]}{(2,5 \times a \times b \times f)} \right\} \times [\lambda(\text{millas}) / (4 \times \pi)]^2 \quad (31)$$

La Ec. (31) muestra la no dependencia del cuadrado de la distancia, sino más bien una dependencia del cubo de la distancia. Este es el resultado de considerar el efecto de propagación multitrajectoria en las redes inalámbricas.

Cuando se observan cálculos modernos de la distancia se encuentra que los diseñadores asumen valores del exponente de DBV hasta de 5, como en [3], lo que daría un cálculo más conservador que el obtenido con valor de exponente 3. Si se siguen los criterios de [3], se tiene:

$$d_{BVmillas} = \left(\frac{[(1-R) \times 106 \times 10PAR/10]}{(2,5 \times a \times b \times f)} \right)^{1/3} \times [\lambda(\text{millas}) / (4 \times \pi)]^{2/3} \quad (32)$$

Considérense de nuevo los parámetros de enlace con los que se han hecho los cálculos para una velocidad de 11 Mbps; además, se incluyen los factores de terreno (a) y climático (b) y la disponibilidad (R) de Barnett-Vignant y también se usa (32) con los siguientes datos, como ejemplo:

- $a = 1$ (para terreno promedio con algunas desigualdades)
- $b = 0.25$ (para áreas normales, temperatura interior o áreas subárticas)
- $R = 0,9998$.

Se obtiene finalmente:

$$dBV_{millas} @ 11 \text{ Mbps (millas)} = 6,44 \text{ millas} \quad (33)$$

Como lo más aconsejable sería escoger el dato más conservador, en este caso se escoge el resultado (28).

Para contrastar los resultados (28) y (33), se puede realizar ahora el cálculo para 1 Mbps con los siguientes parámetros:

- $a = 0.25$ (para área de montañas con muchas desigualdades)
- $b = 0.125$ (para áreas montañosas o muy secas y no reflectivas)

$$S_{rx} @ 1 \text{ Mbps} = -94 \text{ dBm.}$$

Aplicando de nuevo la Ec. (12) y la conversión (13) se encuentra que:

$$d(\text{millas}) = 13,03 \text{ millas} \quad (34)$$

Aplicando la expresión (32) se llega a que:

$$\text{dBVmillas} = 10,68 \text{ millas} \quad (35)$$

En este caso se escogería el resultado (35).

Como conclusión, se puede expresar la distancia de enlace como:

$$\text{Denlace(millas)} = \text{MIN}(d(\text{millas}), \text{dBVmillas}) \quad (36)$$

9. Interpretando la normatividad

Inicialmente se puede observar cuáles son los tipos de antenas y ganancias de antena disponibles en el mercado. Esto se ha consultado básicamente en [17] y [18], ya que en dichas fuentes se hace un resumen adecuado de estos aspectos:

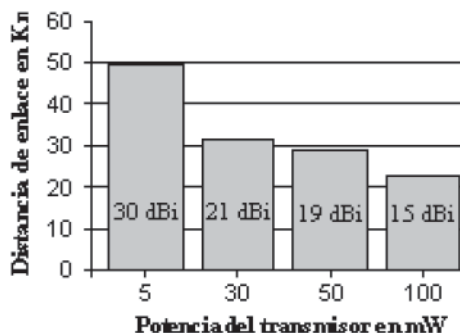
Antenas omnidireccionales: 4, 5.2, 6, 8, 8.5, 10.5, 11, 12, 15 dBi

Antenas direccionales:

- Antenas tipo rejilla (grid): 14, 15, 19, 30 dBi
- Antenas parabólicas macizas (solidish): 17.5, 20.5, 21 dBi
- Antenas Yagi: 9, 12, 14 dBi
- Antenas Patch: 8, 11, 12, 14, 18 dBi
- Antena panel de arreglo plano: 15.5 dBi
- Antena sector: 14, 15, 17, 20 dBi

Ahora se pueden considerar algunas potencias comunes que se encuentran en equipos 802.11. Estas

potencias son 100 mW, 50 mW, 30 mW, 20 mW, 10 mW, 5 mW y 1 mW. Usando estos valores de potencia en la Ec. (36), expresando el resultado en Km y combinando los parámetros especificados, se puede hallar la Figura 2 y la Tabla 3.



Condiciones: 1,34 dB de pérdidas en cada extremo, terreno promedio, atmósfera interior, 1 Mbps, Margen de Desvanecimiento 10 dB, antenas iguales en cada extremo.

Figura 2. Cálculo de Denlace máximo para el ejemplo según la normatividad.

Tabla 3. Potencia máxima permitida para el ejemplo, según la normatividad.

Potencia Máxima Permitida en TX (dBm), Punto a Punto	Potencia Máxima Permitida en TX (dBm), Punto a Multipunto
30 @ 6 dBi	30 @ 6 dBi
27 @ 15 dBi	21 @ 15 dBi
25,7 @ 19 dBi	No práctico
25 @ 21 dBi	No práctico

Cabe destacar que las configuraciones punto a multipunto con antenas de alta ganancia no serán frecuentes, y lo serán más bien con antenas omnidireccionales, Yagi o Patch.

Un caso particular de punto a multipunto es una estación base (router o punto de acceso) con clientes 802.11 en sus alrededores. Supongamos antenas

con ganancias de 15 dBi (omnidireccional) en la estación base y 0 dBi en las tarjetas cliente (valor razonable para casos prácticos [19]). Supóngase una potencia de transmisión de 50 mW (17 dBm) en la estación base y 20 mW (13 dBm) en la tarjeta cliente, con el enlace trabajando a 1 Mbps y aplicando las condiciones asumidas, junto con la Ec. (36); entonces, se obtendrá $D_{\text{enlace}} = 2,35 \text{ Km}$.

10. Normatividad para el uso de la banda de 2,4 GHz

En [20], entre muchas otras bandas, se declaran libres las bandas de frecuencia de 915 a 924 MHz, 2400,0 a 2483,5 MHz, 5150 a 5250 MHz para aparatos de telecomunicaciones inalámbricas.

Posteriormente en [21] se atribuyen unas bandas de frecuencias para el acceso fijo inalámbrico. Una de estas bandas es 2300,0-2500,0 MHz. Estas bandas quedan atribuidas al servicio radioeléctrico fijo y al acceso fijo inalámbrico a título primario y compartido a título secundario, con los servicios previstos en el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias [22]. Con esta resolución se incorpora entonces la banda de 2300,0-2500,0 MHz a la operación de los sistemas de acceso fijo inalámbrico como elemento de la red telefónica pública básica conmutada (RTPBC) para la prestación del servicio de telefonía pública básica conmutada (RTPBC) local y/o local extendida.

En este punto se debe tener claro lo que es acceso fijo inalámbrico. Según [21]:

Es la conexión, mediante el uso del espectro radioeléctrico, en configuración punto multipunto, entre elementos de la RTPBC (Red Telefónica Pública Básica Conmutada) y los terminales fijos de usuarios del servicio de TPBC (Telefonía Pública Básica Conmutada) Local y/o Local extendida. A través de la red terrenal que haga uso del espectro radioeléctrico asignado, se podrán prestar adicionalmente otros servicios fijos de telecomunicaciones, para lo cual el operador que cuente con

el correspondiente permiso deberá tener los respectivos títulos habilitantes y en la prestación de dichos servicios deberá cumplir con la normatividad aplicable.

En la práctica esto habilitaría a un operador a usar esta banda, no solamente para telefonía. Más aun, como es una asignación a título primario, el operador podría estar protegido por la ley ante cualquier interferencia originada por un equipo que opere en esta banda, ya que un servicio primario tiene prioridad absoluta. Como ejemplo de un operador que en Colombia ha hecho uso de estas bandas se nombra más adelante a Telebucaramanga.

Esto lleva a una reflexión. La tecnología Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) (basada en IEEE 802.11) se ha convertido en una tecnología inalámbrica masiva, dado sus bajos costos. Realmente sería muy difícil invocar la protección del Ministerio de Comunicaciones para anular posibles interferencias. En tal caso, el concepto del interés público podría estar invertido. ¿Se debe priorizar el interés de un operador sobre el interés de una comunidad que puede utilizar el espectro de una forma no licenciada sin que medie un operador?

11. Ejemplo colombiano de proyecto metropolitano

En virtud de la reglamentación existente, comentada en el apartado anterior, el operador colombiano Telebucaramangase encuentra a la fecha implantando una red inalámbrica de acceso a Internet en banda ancha, basada en tecnologías Wi-Fi & Pre-WiMAX[23]. En este caso, la red Wi-Fi tiene una frecuencia de operación de 2.4 GHz (IEEE 802.11 b y g) y la red Pre-WiMAX tiene una frecuencia de operación de 5.8 GHz (802.16e), con una cobertura de 7 Km aproximadamente.

Se tienen 106 nodos Wi-Fi con radio de cobertura de 1 Km para acceso hasta el usuario final. Cada nodo Wi-Fi radiará la zona Wi-Fi definida en el

mapa (Figura 3). Cada zona Wi-Fi cubrirá principalmente sitios de interés predefinidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB).



Figura 3. Zonas de cubrimiento Wi-Fi en Bucaramanga. Tomado de [23].

12. Conclusiones

A pesar de que el cálculo de enlaces en el rango de las microondas ha sido muy estudiado, con el advenimiento de tecnologías punto-a-punto y punto-a-multipunto, trabajando con espectro ensanchado y que aplican modulación adaptable, se hace necesaria la revisión del cálculo de la distancia permisible de enlace según la normatividad vigente. Esta normatividad hace que se puedan escoger diferentes niveles de potencia de transmisión en combinación con gran diversidad de antenas para lograr una distancia específica de enlace. Por ejemplo, se ha encontrado que si quiere transmitir

a distancias de 50 Km, lo recomendable es usar una baja potencia disponible (p.e. 5 mW) en combinación con antenas de alta directividad (p.e. 30 dBi). En este cálculo de distancia del enlace se ha introducido una corrección debida a la desviación de receptor, fenómeno de reciente hallazgo. Se ha hecho énfasis en cómo la sensibilidad afecta la distancia del enlace, lo cual es una consecuencia directa de la modulación adaptable que usa tecnologías como IEEE 802.11. Como se mencionó, la variación en la sensibilidad tiene un impacto importante en el caso de la densidad de nodos (y desde luego en costos) en el caso de las redes inalámbricas en malla. Entre más alta sea la velocidad del enlace menor será la sensibilidad y menor será la distancia obtenida. Adicionalmente, se comenta cómo se ha modificado el cálculo clásico de distancia, basado en los factores de terreno y climático, para que esté de acuerdo con el modo de funcionamiento ambiental (espacios urbanos y suburbanos) de las nuevas tecnologías inalámbricas. Al hacer un análisis de la normatividad vigente, se prevé un posible inconveniente en la regulación de la banda de 2,4 GHz, la cual es explotada hoy en día tanto por operadores como por la ciudadanía en general. Esto hace que sea difícil invocar la protección contra interferencias que se contemplan en el uso normal de las bandas de frecuencias.

13. Agradecimiento

El autor desea expresar su agradecimiento al profesor Mauro Flórez Calderón. Ph.D, por la revisión de este documento y por su continuo apoyo.

Referencias bibliográficas

- [1] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Cuarta Edición. Prentice-Hall: México, pp. 366, 2003.
- [2] ITU, "The Radio Refractive Index: its formula and Refractivity Data", Recommendation ITU-R. pp. 453-8. [En línea]. Disponible: <http://electronics.ihs.com/document/abstract/BOCFEBAAAAAAAAAA>.

- [3] Cisco, "Outdoor Bridge Range Calculation, Utility". CISCO. [En línea]. Disponible: http://www.cisco.com/en/US/products/hw/wireless/ps458/products_tech_note09186a008009459b.shtml
- [4] MAXIM, "Receiver Sensitivity Equation for Spread Spectrum Systems, AN1140". 2002. [En línea]. Disponible: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1140.pdf>
- [5] IEEE-SA, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Computer Society IEEE Std 802.11™. [En línea]. Disponible: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2007.pdf>
- [6] B. Razavi, "2.4-GHz CMOS Receiver for IEEE 802.11 Wireless LAN", *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 10, pp. 1382, Oct. 1999.
- [7] J. Trachewsky, *Broadcom WLAN Chipset for 802.11a/b/g*. Irvine: Broadcom Corporation, 2003.
- [8] MAXIM, "Receiver Sensitivity Equation for Spread Spectrum Systems, AN1140". [En línea]. Disponible: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN1140.pdf>
- [9] M. Lynch, "Estimate of Potential Interference from a Single UWB LAN /PAN", *IEEE 802.11*, 2003.
- [10] L. Gavrilovska, V. Atanasovski, "Influence of Packet Length on IEEE 802.11b Throughput Performance in Noisy Channels", IST-FP6-IP MAGNET, Shanghai, China, pp. 11-12, Nov. 2004.
- [11] ANSI/IEEE Std 802.11, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", New Jersey: Copyright © 1999 IEEE. All rights reserved. [En línea]. Disponible: <http://www.cs.uiuc.edu/homes/haiyun/cs598hl/papers/802.11-1999.pdf>
- [12] T. Cooley, *IEEE Wireless Communication Standards*. New York: Standards Information Network, IEEE Press, 2004.
- [13] W. Stallings, *Wireless Communications and Networks*, New Jersey: Prentice-Hall, 2002.
- [14] Ministerio de Comunicaciones de Colombia, *Bandas de frecuencias para su libre utilización dentro del territorio nacional*, Resolución 689 21. Abril. [En línea]. Disponible: <http://www.mintic.gov.co/mincom/documents/portal/documents/root/Normatividad/Legislacion/R00689d2004.pdf>
- [15] D. Aguayo, *Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network*. Portland: ACM SIGCOMM, Aug. 2004.
- [16] SCTE, "Broad band Communications Engineer (BCE) Category I: Signal Processing Centers Certification Course," Society of Cable Telecommunications Engineers. [En línea]. Disponible: <http://www.scte.org/training/index.cfm?PID=129>
- [17] Hyperlink Technologies. (2007). "HyperGain® 2.4 GHz High Performance 802.11b and 802.11g Wireless LAN WiFi Antennas". L-com. [En línea]. Disponible: http://www.hyperlinktech.com/web/antennas_2400.php
- [18] Cisco Systems, Inc., *Antenas y accesorios Cisco Aironet*, 2001.
- [19] Cisco Systems Inc, *Cisco Aironet 802.11a/b/g Wireless LAN Client Adapters (CB21AG and PI21AG) Installation and Configuration Guide*, 2005.

- [20] Ministerio de Comunicaciones de Colombia, “*Atribución de unas bandas de frecuencias radioeléctricas para su libre utilización dentro del territorio nacional,*” resolución 797 8 de Junio de 2001. [En línea]. Disponible: <http://www.mintic.gov.co/mincom/documents/portal/documents/root/Normatividad/Legislacion/R00797d2001.pdf>
- [21] Ministerio de Comunicaciones de Colombia, “*Bandas para el acceso fijo inalámbrico como elemento de la red telefónica pública básica conmutada (RTPBC) para la prestación del servicio de Telefonía Pública Básica Conmutada Local y/o Local Extendida*” resolución 526del 2002. [En línea]. Disponible: <http://www.mintic.gov.co/mincom/documents/portal/documents/root/Normatividad/Legislacion/R00526d2002.pdf>
- [22] Ministerio de Comunicaciones, “Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias”, Resolución 689 21 abril de 2004. [En línea]. Disponible: <http://www.mintic.gov.co/mincom/documents/portal/documents/root/Normatividad/Legislacion/R00689d2004.pdf>
- [23] Telebucaramanga. (2006). “Red Wi-fi & Pre-WiMAX”. [En línea]. Disponible: http://www.telebucaramanga.com.co/code/tb_serv_inalambrico.htm