

Implementación de enlaces punto a punto

Germán Eduardo Castro Burgos
Ingeniería de RF
Universidad de Nariño
Pasto, Colombia
german_castrob@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de acceso a recursos informáticos ha traído consigo durante las últimas décadas, un incipiente auge en el desarrollo de tecnologías que faciliten la implementación de sistemas de comunicaciones en diversos escenarios rurales y urbanos. Las barreras topográficas existentes en algunas regiones, han determinado en ocasiones la imposibilidad de brindar una solución factible para garantizar la conectividad de la región considerada, generando efectos adversos sobre la economía, educación y en general la calidad de vida de quienes habitan estas zonas. Para mitigar los efectos descritos, diferentes alternativas tecnológicas se han propuesto considerando diversas metodologías y medios de transmisión. Inicialmente los sistemas de comunicaciones basados en un medio físico (cable) contaban con capacidades operativas significativamente superiores cuando su desempeño se contrastaba con el de sistemas inalámbricos, que se veían limitados por la cantidad de información que podía ser transferida luego de su despliegue.

Con el incremento en la capacidad de procesamiento de sistemas embebidos y el surgimiento de nuevas técnicas de modulación de señales, la brecha entre sistemas inalámbricos y cableados se ha visto disminuida. Como resultado, la implementación de sistemas inalámbricos en áreas rurales o de difícil acceso es cada día mas frecuente. Los radioenlaces se presentan en dicho panorama, como una solución costo-efectiva para garantizar el acceso de comunidades aisladas a servicios de internet, y para establecer redes de comunicaciones multi propósito que contribuyen a garantizar la seguridad de la comunidad. El éxito de la solución propuesta estará relacionado con las consideraciones efectuadas durante la fase de diseño del enlace a emplear, siendo fundamentales la selección de los dispositivos que harán parte del sistema y la caracterización del enlace inalámbrico a partir de cálculos teóricos que requieren del uso de modelos de propagación y del reconocimiento de las regiones de Fresnel asociadas al escenario de trabajo. Este documento resume el procedimiento llevado a cabo para la implementación de un enlace inalámbrico punto a punto, señalando las principales características de los elementos empleados, las consideraciones previas a la implementación del enlace y un análisis comparativo de los resultados obtenidos frente a los pronósticos efectuados mediante la aplicación de las relaciones teóricas existentes para diferentes modelos de propagación.

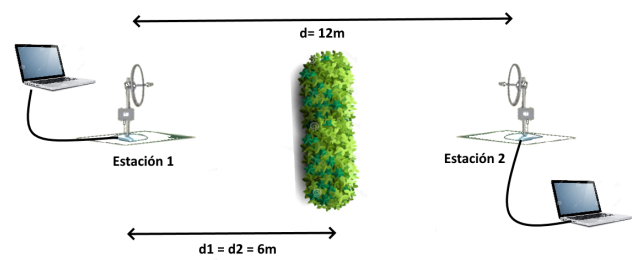


Figura 1. Escenario descriptivo para el experimento efectuado.

II. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO EFECTUADO

El ejercicio efectuado en busca de identificar las etapas que deben recorrerse para implementar de forma exitosa un radioenlace, tuvo como punto de partida la selección de los dispositivos a emplear para establecer la comunicación bidireccional entre dos equipos terminales. Dado que el enlace propuesto corresponde en su configuración a un esquema punto a punto, en el que las comunicaciones se entablan exclusivamente entre dos únicos nodos, es necesario implementar dos estaciones idénticas que permitan la transmisión de paquetes entre dos equipos de cómputo conectados a cada extremo del enlace. Para identificar los efectos ocasionados sobre la potencia recibida en uno de los extremos del enlace, cuando se delimita la primera zona de Fresnel, un obstáculo ha sido posicionado en el punto medio de la distancia que separa las estaciones transmisoras en busca de que la señal reflejada sobre el mismo incremente el nivel de la potencia recibida. El escenario descrito puede apreciarse en la Figura 1.

II-A. Instrumentación empleada

Cada una de las estaciones transmisoras está constituida por un conjunto antena-radio encargado de entablar comunicaciones con el nodo ubicado al otro extremo del enlace. El dispositivo principal de cada estación corresponde a un radio de referencia *RocketM5* del fabricante *Ubiquiti*. Según la información proporcionada por el fabricante, el equipo corresponde a una estación base empleada en la construcción de radioenlaces punto a punto y punto a multi-punto. Puede alcanzar velocidades de hasta 150Mbps y ha sido diseñado en busca de facilitar la interacción con antenas de múltiple polarización.

La antena de referencia *AF - 5G30 - S45* del fabricante *L - Com* fue seleccionada para hacer parte de cada nodo

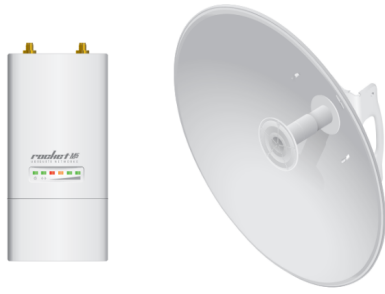


Figura 2. Equipo empleados por cada estación del radioenlace.

del enlace. En su hoja de datos, el fabricante describe al dispositivo como un equipo de alto desempeño empleado con frecuencia en conjunto con estaciones base de altas prestaciones, para establecer radioenlaces a largas distancias, cuando se requieren tasas de transferencia considerables, dadas su alta ganancia y patrón de radiación altamente directivo. La Figura 2 muestra una imagen de los equipos empleados mientras en el Cuadro I han sido consignados los valores correspondiente a sus principales parámetros operativos. Entre los accesorios adicionales empleados durante a ejecución de la práctica pueden citarse un par de trípodes para topografía, cables de red de diversas longitudes, fuentes de poder tipo *Power over ethernet (PoE)*, adaptadores para conexión de las antenas y dos computadores portátiles que hicieron las veces de estaciones terminales.

Estación Base Rocket M5	
Parámetro	Valor
Modos de Operación	Punto de acceso, Estación
Interfaz de Red	10/100Mbps
Puertos de Conexión RF	2 X RP-SMA
Frecuencia de Operación	5150MHz-5875MHz
Potencia Máxima Tx	27dBm
Protocolos soportados	802.11a, 802.11n/airMax
Antena AF-5G30-S45	
Parámetro	Valor
Frecuencias de Operación	4900MHz-5900MHz
Polarización	Dual (+45°, -45°)
Ganancia	4.9GHz: 26dBi 5GHz-5.9GHz: 30dBi
Diámetro	650 mm
Ángulo Radiación +45°	5,8°
Ángulo Radiación -45°	5,8°

Cuadro I
PARÁMETROS OPERATIVOS PARA EL RADIO Y LA ANTENA
SELECCIONADOS

II-B. Configuración de las Estaciones Base

Para implementar el radioenlace propuesto, cada una de las estaciones base ubicadas en los nodos extremos del mismo debe ser configurada siguiendo la arquitectura correspondiente

a una conexión punto a punto. Para alcanzar tal fin, uno de los *RocketM5* debe ser configurado en modo punto de acceso en busca de que su similar, ubicado en el nodo remoto opere en modo estación a fin de fijar la señal transmitida por el punto de acceso. Dicha señal debe estar identificada por una etiqueta que la diferencie de otras transmisiones efectuadas sobre la misma banda de frecuencias seleccionada. La configuración descrita es llevada a cabo empleando la interfaz web disponible en cada uno de los equipos, a partir de la dirección IP que les ha sido asignada. Estaciones base y computadores portátiles emplean la dirección de red clase C *192.168.1.0* de forma tal que el punto de acceso corresponde a la dirección *192.168.1.20*, la estación remota a la dirección *192.168.1.21* y los equipos terminales de estación base y remota a las direcciones *192.168.1.24* y *192.168.1.25* respectivamente. Puesto que la ganancia de las antenas seleccionadas para la implementación del enlace corresponde a valores considerablemente altos (30dBi), la potencia transmitida por la estación base se limitó a -4dBm considerando la corta distancia (12m) que la señal emitida debe recorrer para alcanzar a la estación remota. Finalmente, el canal seleccionado para la ejecución de la transmisión corresponde al constituido por las frecuencias comprendidas entre los 5175MHz y los 5215MHz, siendo la frecuencia central del mismo igual a 5195MHz.

III. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

Una vez realizada la configuración requerida por cada uno de los componentes del radioenlace, las antenas correspondientes a estación base y estación remota fueron orientadas de forma tal que la potencia recibida en cada nodo alcanzara su valor máximo. El procedimiento fue repetido para variaciones en la altura de montaje de las antenas en busca del valor máximo de potencia recibida. Establecida la disposición óptima para la operación, se realizaron variaciones paulatinas sobre la altura de la antena del punto de acceso registrando los valores de potencia recibida suministrados por el radio configurado como punto de acceso, que corresponden a las polarizaciones vertical y horizontal y al valor promedio generado a partir de las mismas. La altura de la antena correspondiente a la estación remota permaneció constante en 1.40m en tanto que para el obstáculo ubicado en el punto medio de la distancia de separación entre estaciones la altura registrada correspondió a los 1.17m.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

IV-A. Valores obtenidos para potencia recibida

Concluido el plan de mediciones propuesto se establecieron tres conjuntos de 15 parejas de datos altura-potencia recibida derivados de la información suministrada por la estación base. Los valores de potencia recibida analizados corresponden a las polarizaciones vertical y horizontal y a la potencia promedio calculada por el radio que hace parte de la estación base. A partir de dichos conjuntos, pueden construirse gráficas de la potencia recibida en función de la altura de la antena transmisora para cada caso, según se aprecia en la Figura 3. Los resultados observados serán empleados para contrastar los

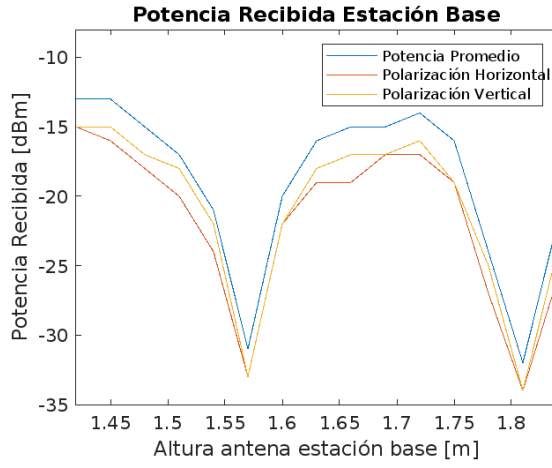


Figura 3. Potencias recibidas para cada polarización y su valor promedio.

valores de potencia recibida generados a partir de cálculos teóricos que emplean el modelo de propagación en espacio libre y el modelo de propagación de Barnett-Vigants. Aunque es posible apreciar un incremento de la potencia cuando la altura de la torre de transmisión supera el valor establecido durante la caracterización de la primera zona de Fresnel, es posible apreciar que existe cierto comportamiento no esperado para dicho valor cuando el obstáculo analizado se encuentra al interior de la zona. Una hipótesis para explicar dicho fenómeno radica en que la altura de la antena receptora permaneció constante durante la ejecución del experimento, es decir que, si se quiere incrementar la precisión de los resultados obtenidos, es recomendable variar las alturas de las dos antenas empleadas de forma tal que el ángulo requerido para la orientación de las mismas no se modifique y se conserve la orientación para alcanzar la potencia máxima.

IV-B. Análisis de la zona de Fresnel

Considerando las condiciones operativas del radioenlace implementado, es posible efectuar la caracterización teórica de la zona de Fresnel existente como resultado de dicho despliegue. La zona de Fresnel puede ser definida como una región cercana a la línea de vista apreciable entre los nodos de un radioenlace que debe encontrarse libre de obstáculos en busca de prevenir los efectos negativos generados sobre la señal en el receptor como consecuencia de fenómenos de multi trayectoria. Su geometría está definida por una serie de elipses posicionadas al rededor de la línea de vista del enlace que establecen la distancia adicional recorrida por los componentes de la señal que se han difractado en su recorrido. Existen por lo tanto diversas zonas de Fresnel aunque en la mayoría de circunstancias el análisis sobre el comportamiento de la señal se centra sobre las tres primeras. En la primera zona de Fresnel las componentes difractadas de la señal original contribuyen a incrementar la potencia recibida en los extremos del enlace.

La caracterización de la zona de Fresnel corresponde al proceso mediante el cual se determina la altura adicional r_1 que debe tener la línea de vista frente a la altura de

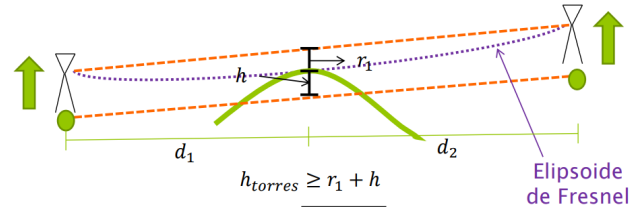


Figura 4. Zona de Fresnel para un radioenlace punto a punto.

un obstáculo determinado h para un radioenlace establecido, según puede apreciarse en la Figura 4. Para determinar el valor de r_1 la relación expresada en 1 es aplicada, siendo λ la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de operación y d_1 y d_2 las distancias existentes entre los extremos del enlace y el obstáculo analizado.

$$r_1 = \sqrt[2]{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

$$r_1 = \text{Radio primera zona de Fresnel}$$

$$d_1 = \text{Distancia estación 1 a obstáculo}$$

$$d_2 = \text{Distancia estación 2 a obstáculo}$$

$$\lambda = \text{Longitud de onda para la frecuencia de operación}$$
(1)

Aplicando los valores correspondientes al enlace constituido, es posible determinar el valor de r_1 siguiendo el procedimiento señalado en 2.

$$d_1 = d_2 = 6[m]$$

$$f_0 = 5195[MHz]$$

$$c = 2,998 * 10^8[m/s]$$

$$\lambda = \frac{c}{f_0} = 0,0577[m]$$

$$r_1 = \sqrt[2]{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

$$r_1 = \sqrt[2]{0,0577[m] \frac{6[m] * 6[m]}{6[m] + 6[m]}}$$

$$r_1 = 0,4161[m]$$
(2)

Considerando que la altura del obstáculo existente en el punto medio del trayecto cubierto por el radioenlace se estableció en $1,17[m]$, siguiendo los planteamientos establecidos durante la descripción de la zona de Fresnel es posible afirmar que la altura de las torres de transmisión y recepción puede ser determinada siguiendo las indicaciones especificadas en 3. Las antenas empleadas para la implementación del enlace propuesto deben ubicarse entonces a una altura igual a $1,5861[m]$ para cumplir con la restricción impuesta por la primera zona de Fresnel.

$$h = 1,17[m]$$

$$r_1 = 0,4161[m]$$

$$h_{torre} = h + r_1 = 1,5861[m]$$
(3)

Haciendo uso de los procedimientos descritos es posible establecer el radio de la primera zona de Fresnel a lo largo de la distancia correspondiente al enlace, de forma tal que el

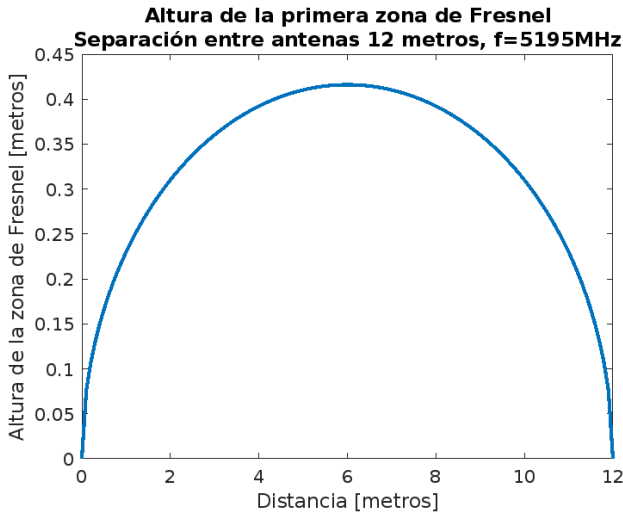


Figura 5. Altura de la primera zona de Fresnel para el radioenlace propuesto.

valor del mismo sea establecido en función de la distancia a la que un obstáculo de prueba pueda ser ubicado. La Figura 5 muestra el resultado alcanzado para tal función sobre un enlace que abarca 12m de separación y opera a una frecuencia de 5195MHz.

V. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN CONSIDERADOS

Para determinar el nivel de ajuste de los datos recolectados frente a las estimaciones efectuadas a partir de los conceptos teóricos, se han seleccionado los modelos de propagación en el espacio libre y de Barnett-Vigants para determinar los niveles de potencia recibida que se espera observar una vez el enlace implementado entre en operación. El modelo de propagación en espacio libre determina el nivel de potencia recibida en función de la distancia y la frecuencia de operación considerando a la vez los valores correspondientes a la potencia transmitida y a las ganancias de transmisión y recepción [2], según se muestra en 4.

$$\begin{aligned}
 P_{rx}[dBm] &= P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{fs} \\
 L_{fs}[dB] &= 32,45 + 20\log d[Km] + 20\log f[MHz] \\
 P_{rx} &= \text{Potencia recibida} \\
 P_{tx} &= \text{Potencia transmitida} \\
 G_{tx} &= \text{Ganancia de transmisión} \\
 G_{rx} &= \text{Ganancia de recepción} \\
 L_{fs} &= \text{Pérdidas en el espacio libre} \\
 d &= \text{Distancia hasta el punto de transmisión} \\
 f &= \text{Frecuencia de operación}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Empleando los datos correspondientes al enlace establecido, es posible determinar el valor ideal para la potencia recibida a partir del procedimiento indicado en 5. Empleando la información descrita se establece un valor para la pérdidas

de espacio libre igual a $68,3453[dB]$ y un estimado para la potencia recibida ideal igual a $-12,3453[dBm]$.

$$\begin{aligned}
 d &= 12[m] = 0,012[Km] \\
 f &= 5195[MHz] \\
 P_{tx} &= -4[dBm] \\
 G_{tx} &= G_{rx} = 30[dBi] \\
 L_{fs} &= 32,45 + 20\log(0,012[Km]) + 20\log(5195[MHz]) \\
 L_{fs} &= 68,3453[dB] \\
 P_{rx} &= -4[dBm] + 30[dBi] + 30[dBi] - 68,3453[dB] \\
 P_{rx} &= -12,3453[dBm]
 \end{aligned} \tag{5}$$

El modelo de Barnett-Vigants por su parte, agrega un margen de desvanecimiento sobre el valor ideal de la potencia recibida considerando las características del terreno y las condiciones meteorológicas de lugar de montaje, mediante un coeficiente denominado C [3]. El margen depende también del grado de disponibilidad deseado para el enlace establecido, parámetro que se representa con la letra R en la relación indicada en 6, de forma tal que $(1 - R)$ representa el grado objetivo de confiabilidad que se desea para el radioenlace.

$$\begin{aligned}
 M_f[dB] &= 30\log d[Km] + 10\log 6Cf[GHz] \\
 &\quad - 10\log(1 - R) - 70 \\
 P_{rx}[dBm] &= P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{fs} - M_f \\
 d &= \text{Distancia hasta el punto de transmisión} \\
 f &= \text{Frecuencia de operación} \\
 C &= \text{Factor condiciones ambientales} \\
 R &= \text{Disponibilidad del enlace} \\
 M_f &= \text{Margen de desvanecimiento} \\
 P_{rx} &= \text{Potencia recibida} \\
 P_{tx} &= \text{Potencia transmitida} \\
 G_{tx} &= \text{Ganancia de transmisión} \\
 G_{rx} &= \text{Ganancia de recepción} \\
 L_{fs} &= \text{Pérdidas en el espacio libre}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Una vez más, empleando los valores correspondientes a cada parámetro requerido es posible determinar el valor para el margen de desvanecimiento que permite establecer el valor final para la potencia recibida estimada. Considerando que el lugar seleccionado para el despliegue del montaje cuenta con características meteorológicas del entorno urbano y que el terreno no describe pendientes pronunciadas ni vegetación significativa, el coeficiente C puede tomar el valor 1. Considerando que el modelo de Barnett-Vigants fue desarrollado empleando datos de radioenlaces con distancias superiores a los 25Km de separación, en enlaces que cubren cortas distancias el valor de la disponibilidad R establecida debe aproximarse a 1 en busca de señalar que la comunicación debe efectuarse de forma permanente. Establecidos los valores necesarios, el procedimiento llevado a cabo para determinar el

margen del desvanecimiento y estimar el valor de la potencia recibida se muestra en 7.

$$\begin{aligned}
C &= 1 \\
R &= 0,999999999999 \\
d &= 12[m] = 0,012[Km] \\
f &= 5195[MHz] \\
P_{tx} &= -4[dBm] \\
G_{tx} &= G_{rx} = 30[dBi] \\
L_{fs} &= 32,45 + 20\log(0,012[Km]) + 20\log(5195[MHz]) \\
L_{fs} &= 68,3453[dB] \\
M_f &= 30\log(0,012[Km]) + 10\log(6 * 1 * 5,195[GHz]) \\
&\quad - 10\log(1 - 0,999) - 70 \\
M_f &= 7,3128[dB] \\
P_{rx} &= -4[dBm] + 30[dBi] + 30[dBi] - 68,3453[dB] \\
&\quad - 7,3128[dB] \\
P_{rx} &= -19,6581[dBm]
\end{aligned}
\tag{7}$$

Concluida la caracterización del enlace, los resultados derivados de la misma empleando los modelos de propagación en el espacio libre y de Barnett-Vigants pueden resumirse según se indica en el Cuadro II. Finalmente, los modelos

Parámetro	Valor
Potencia transmitida	-4 dBm
Ganancia de las antenas	+30 dBi
Pérdidas de espacio Libre	-68.3453 dB
Potencia recibida ideal	-12.3453 dBm
Margen de desvanecimiento	-7.3128 dB
Potencia recibida estimada	-19.6581 dBm

Cuadro II
POTENCIA RECIBIDA ESTIMADA SEGÚN MODELO DE PROPAGACIÓN EN
ESPACIO LIBRE Y DE BARNETT-VIGANTS

descritos pueden ser empleados para establecer teóricamente el comportamiento de la potencia recibida a lo largo del enlace implementado. Las funciones que describen dicho comportamiento en función de la distancia de medición pueden apreciarse en la Figura 6.

VI. CONCLUSIONES

Luego de analizar los resultados observados durante la planeación e implementación del radioenlace punto a punto propuesto, es posible afirmar que buena parte del éxito de la solución propuesta depende de las consideraciones efectuadas durante la fase de diseño. Dichas consideraciones corresponden a la determinación de la arquitectura del enlace a constituir, la selección de equipos a emplear, la caracterización de la zona de Fresnel asociada al radioenlace y la aplicación de modelos de propagación que permitan estimar los valores de potencia recibida bajo las condiciones del escenario de trabajo. Aunque el modelo de Barnett-Vigants empleado para establecer el margen de desvanecimiento en radioenlaces de largas distancias puede aplicarse cuando la separación entre las

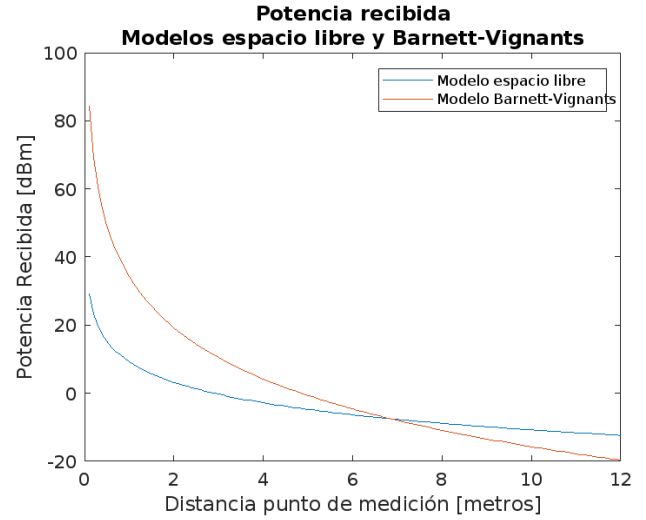


Figura 6. Comportamiento de la potencia recibida en función de la distancia según modelos evaluados.

estaciones es pequeña, su aplicación requiere de la selección de un nivel de disponibilidad del enlace bastante elevado, de forma tal que los periodos de tiempo en los que la potencia recibida se ve afectada por los fenómenos de desvanecimiento correspondan al orden de los micro segundos. Se requiere entonces de la construcción de modelos adicionales que permitan identificar los efectos del desvanecimiento para enlaces de corta distancia, en busca de caracterizar escenarios de diseño e investigación.

El análisis del comportamiento de la señal al interior de la zona de Fresnel permite establecer que si bien el valor de la potencia recibida podría verse incrementada en dicho sector, existen a la vez diversos efectos negativos derivados de los fenómenos multi trayectoria que pueden afectar el desempeño del enlace establecido. Si adicionalmente los modelos teóricos de propagación correspondientes al espacio libre y al margen de desvanecimiento son empleados durante la fase de planificación del enlace, los resultados alcanzados una vez desplegada la solución coinciden con los presupuestos derivados de la aplicación de las relaciones teóricas.

REFERENCIAS

- [1] S. Sun, T. S. Rappaport, S. Rangan, T. A. Thomas, A. Ghosh, I. Z. Kovacs, I. Rodriguez, O. Koymen, A. Partyka, and J. Jarvelainen, "Propagation path loss models for 5G urban micro- and macro-cellular scenarios, in 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016
- [2] Jianhan Liu, et al, (2016) IEEE 802.11ax Channel Model Document [Online]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0882-04-00ax-tgax-channel-model-document.docx>.
- [3] C. Viteri (2022). "Diseño de radioenlaces y celdas"[PowerPoint slides].
- [4] W. Barnett, "Multipath propagation at 4, 6, and 11 GHz, in The Bell System Technical Journal, vol. 51, no. 2, pp. 321-361, Feb. 1972.
- [5] A. Vigants, "Space-diversity engineering, in The Bell System Technical Journal, vol. 54, no. 1, pp. 103-142, Jan. 1975.