

Análisis y Simulación de la Propagación de Ondas Milimétricas en un Ambiente Indoor

Vaca Jorge¹; Llugsí Ricardo²

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la Información Electrónica, Quito, Ecuador.

Abstract— This paper conducts an analysis of the variations of power levels in an indoor environment for a radiofrequency signal in the extremely high frequency range, what correspond to millimeter waves. The design of two microstrip antennas is done for two unused frequency bands within the EHF spectrum, for (37-40.5) GHz and (71-76) GHz, the antennas are designed mathematically and are simulated on CST Studio from where the basic parameters are obtained. The antennas are implemented on two AutoCAD designed environments and modelled on WinProp WallMan for later be simulated on WinProp ProMan.

Index Terms—: antenna, millimeter, power, propagation, waves.

Resumen— En el presente trabajo se lleva a cabo un análisis del comportamiento de los niveles de potencia en un ambiente indoor para una señal de radiofrecuencia en el rango de frecuencias extremadamente altas, que corresponde a ondas milimétricas. Se realiza el diseño de dos antenas microstrip para dos bandas de frecuencia libres dentro del espectro EHF, (37-40.5) GHz y (71-76) GHz, dichas antenas se diseñan matemáticamente y se simulan en CST Studio de donde se obtiene sus parámetros fundamentales. Se simula las antenas en dos ambientes de propagación diseñados en AutoCAD y modelados en WinProp WallMan para posteriormente ser simulados en WinProp ProMan.

Palabras clave: antena; propagación; ondas; milimétricas; potencia.

I. INTRODUCCIÓN

UNO de los principales problemas de los sistemas de comunicaciones móviles, es la saturación de recursos debido al alto crecimiento de la demanda de usuarios, esto ha obligado a buscar alternativas tecnológicas que permitan satisfacer el alto requerimiento de recursos.

Entre las soluciones propuestas para solucionar dichos problemas, se habla de uso de nuevas arquitecturas [1], nuevas formas de acceso al medio [2], cambios en sistemas radiantes [3] y el uso de una parte más alta del espectro electromagnético

[1]. La parte del espectro que se busca optimizar para telecomunicaciones es el rango de las frecuencias extremadamente altas, que abarca lo comprendido entre 30 GHz a 300 GHz correspondiente a longitudes de onda de 1 mm hasta 10 mm.

Dentro de este rango de frecuencias, la longitud de onda y la dimensión de los elementos radiantes es muy pequeña por lo que el uso de tecnología microstrip se vuelve ideal para el diseño y simulación de antenas, donde se toma como punto de partida un parche rectangular como elemento individual y posteriormente un arreglo de 8 parches para dar mayor ganancia a la antena. El diseño de las antenas será comprobado usando un programa de simulación que permite verificar la funcionalidad teórica del diseño, así como corregir detalles de los parámetros fundamentales, como pérdidas por retorno, acoplamiento, y el valor de la frecuencia de resonancia en función de las características diseñadas. Finalmente se implementan las antenas en un programa de simulación que permita observar los niveles de potencia en un ambiente indoor usando el modelo de propagación de trazado de haces.

II. DISEÑO DE LA ANTENA

Se busca inicialmente desarrollar una antena microstrip usando un parche rectangular, debido a su facilidad de diseño y e implementación, sin embargo, no se logra ganancias muy altas en la experiencia de los autores, por lo que se decide realizar un arreglo de antenas que permitan sumar los lóbulos de radiación y obtener una ganancia mayor. Dicho esto, se decide ubicar los parches uno junto a otro a lo largo del plano horizontal, con el objetivo de que, en el campo lejano, se tenga el producto del campo por el factor del arreglo, es decir un aumento en la directividad y ganancia del arreglo final. [6].

Se escogen dos frecuencias para el diseño de la antena, 38.75 GHz y 73.5 GHz, considerando que sean parte del espectro de EHF y no se encuentren utilizadas por ninguna aplicación licenciada, conjuntamente se seleccionan los sustratos RO5880 ($\epsilon = 2.2$, $h = 127\mu$) [4] y RO3003 ($\epsilon = 3$, $h = 127\mu$) [5] respectivamente para los dos valores de frecuencia y se diseña a continuación la red de alimentación para los parches

considerando que las ramas de la red serán iguales para todos los parches como se describe en la Figura 1.

A. Diseño del element radiante

Se parte del diseño del elemento rectangular aplicando fórmulas matemáticas [6], el parche rectangular se muestra en la Figura 2.

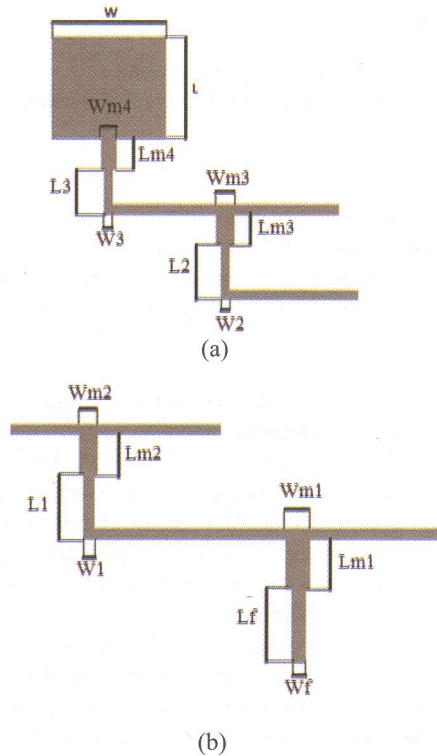


Fig. 1 (a) y (b) Red de Alimentación; se especifican los nombres de las variables que serán calculadas a continuación.

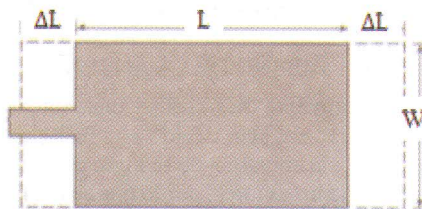


Fig. 2 Diseño del parche rectangular [6]

Se enlista las ecuaciones para el cálculo de las dimensiones del parche rectangular, el ancho del mismo está dado por:

$$W \approx \frac{c}{2f_o \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \tag{1}$$

Donde:

W = Ancho del elemento radiante

f_o = Frecuencia de diseño

ε_r = Constante dieléctrica del sustrato

El valor de la constante dieléctrica efectiva se calcula mediante (2).

$$\epsilon_{reff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \tag{2}$$

Donde:

ε_{reff} = Constante dieléctrica efectiva del sustrato

h = Altura del sustrato

Por la variación en el tiempo de los campos eléctricos emitidos por el elemento radiante, se crea un margen de error entre la longitud teórica y práctica del elemento radiante, por lo que se introduce el factor de corrección [6] y se calcula una longitud efectiva expresada en la tabla 1.

TABLA I
DIMENSIONES DEL PARCHES PARA LOS DOS VALORES DE FRECUENCIA

Frecuencia	W	L
38.75 GHz	3.06 mm	2.544 mm
73.5 GHz	1.417 mm	1.093 mm

B. Diseño de la red de alimentación

Una rama de la red de alimentación se muestra en la Figura 1 (a) y (b), como paso siguiente se calcula las dimensiones de los elementos, considerando que la función principal de ésta red será acoplar la impedancia del parche con la impedancia de la fuente para que exista una máxima transferencia de potencia. Se determina la impedancia característica del parche con la ecuación (3):

$$Z_a = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)^2 \tag{3}$$

Se calcula la impedancia de la línea de transmisión con la ecuación (4), cabe recalcar que se introduce un recuadro con nomenclatura LmX en la Figura 1, para ayudar al acoplamiento de impedancias que reemplaza las inserciones que usualmente se hacen dentro del parche para compensar el valor de conductancia en el borde del elemento conductor [6].

En el punto denominado como Wf en la Figura 1 (b) se debe llegar a tener 50 ohmios, se realiza un cálculo para cada sección horizontal, por ejemplo la primera corresponde a la distancia vertical entre los puntos W3 y Wm4 de la Figura 1 (a), el siguiente nivel corresponde a la distancia comprendida entre W2 y Wm3, y así sucesivamente, considerando que se quiere llegar a 50 ohmios, se parte con 50, este valor cambiará para el nivel inferior pues la nueva impedancia vista será el paralelo de dos ramas de 50 ohmios y de la misma manera para los niveles inferiores.

$$Z_T = \sqrt{50 \times Z_a} \tag{4}$$

Las fórmulas para el cálculo del ancho de la línea de transmisión (5) y para el recuadro de acople (6) son las siguientes:

$$Z_T = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8h}{W_T} + \frac{W_T}{4h} \right) \tag{5}$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} \left(1.393 + \frac{W_0 + 2}{h} + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W_0 + 1.444}{h} \right) \right)} \tag{6}$$

Hay que considerar que las distancias verticales no deben superar la longitud de $\lambda/4$, debido a que a pesar de incluir un recuadro de acople sigue siendo un transformador de $\lambda/4$.

Al aplicar las fórmulas previamente enlistadas, se obtiene valores para la red de alimentación de acuerdo a la nomenclatura mostrada en la Figura 1 (a) y (b) que se exponen en la Tabla 2 para 38.75 GHz y en la Tabla 3 para 73.5 GHz.

TABLA II

DIMENSIONES DE LA RED DE ALIMENTACIÓN PARA 38.75 GHz

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Wm4	20.27 mm	Wm2	82.38 μ m
W3	39.512 μ m	W1	82.38 μ m
Lm4	1.305 mm	Lm2	215.835 μ m
L3	383.59 μ m	L1	215.835 μ m
Wm3	62.934 μ m	Wm1	376.068 μ m
W2	31.95 μ m	Wf	347.56 μ m
Lm3	1.368 mm	Lm1	652.45 μ m
L2	320.488 μ m	Lf	652.45 μ m

TABLA III

DIMENSIONES DE LA RED DE ALIMENTACIÓN PARA 73.5 GHz

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Wm4	9.69 μ m	Wm2	50.24 μ m
W3	6.95 μ m	W1	43.66 μ m
Lm4	579.94 mm	Lm2	129.28 μ m
L3	167.21 μ m	L1	129.76 μ m
Wm3	36.73 μ m	Wm1	262.38 μ m
W2	3.99 μ m	Wf	257.28 μ m
Lm3	611.75 μ m	Lm1	287.46 μ m
L2	135.4 μ m	Lf	287.46 μ m

La directividad de la antena, dependerá de la separación entre parches en el plano horizontal, pues de esto dependerá la suma de los lóbulos de radiación en el plano Z perpendicular a la superficie de la antena, se realiza el cálculo utilizando la ecuación (10) y se muestra los resultados en la tabla 4, considerando que para obtener una antena direccional, se debe tener el haz direccional en el rango menor a 10 grados en el plano vertical, o 0.174 radianes.

$$\Delta\theta_V = 2 \text{Sin}^{-1} \left(0.44 \frac{\lambda}{NdH} \right) \quad (7)$$

Donde:

$\Delta\theta_V$ = Ancho del haz de radiación a -3 dB

dH = distancia horizontal entre parches

N = número de parches del arreglo

TABLA IV

DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE PARCHES DEL ARREGLO

Frecuencia	dH
38.75 GHz	4.894 mm
73.5 GHz	2.58 mm

Una vez obtenidos todos los valores necesarios referentes a las dimensiones de la antena se presenta el diagrama del arreglo

en la Figura 3, el cual será llevado al software de simulación CST.

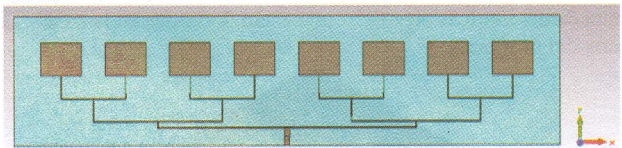


Fig. 3 Arreglo de parches

C. Diseño de los ambientes indoor

Para el diseño, se consideran recomendaciones de la norma de construcción vigente en Ecuador NEC [7] [8], y regulada por el municipio de Quito a través de ordenanzas disponibles en línea en la página web oficial de la entidad [9]. Se presentan dos diseños junto con sus dimensiones en las Figuras 4 y 6 respectivamente.

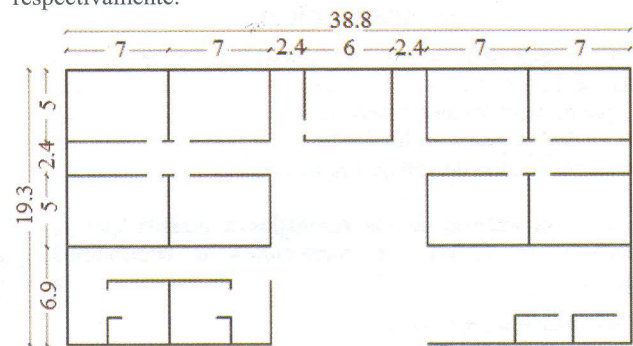


Fig. 4 Ambiente de aulas, planta

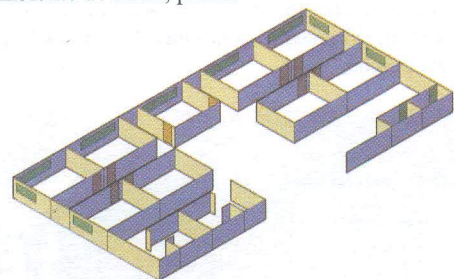


Fig. 5 Ambiente de aulas, elevación en tres dimensiones

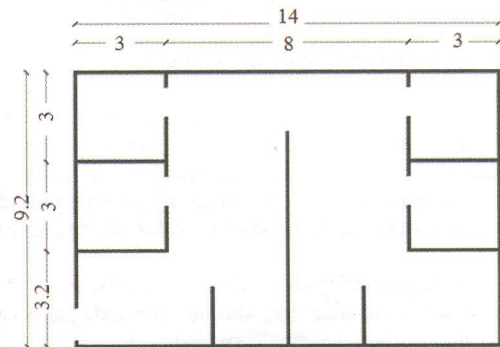


Fig. 6 Ambiente de oficinas, planta

WallMan es el programa que permitirá integrar el plano con la simulación de radiofrecuencia, además de incluir los materiales para las paredes, que son concreto de 30 cm de

espesor, las ventanas de vidrio y mueblería de oficina como sillas, escritorios y pizarrones, cada uno de éstos materiales presenta características eléctricas que están definidas en la base de datos del programa.

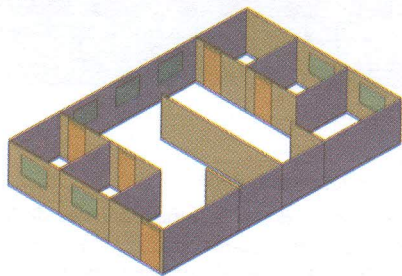


Fig. 7 Ambiente de oficinas, elevación en tres dimensiones

III. SIMULACIÓN

Una vez que se tiene las dimensiones requeridas para la antena, se llevan dichos valores al programa computacional CST, que permite obtener parámetros elementales de la antena, de los cuales se muestran las pérdidas por retorno, la relación de onda estacionaria de voltaje y la ganancia.

Se realizan análisis de los resultados a medida que se obtienen y se realiza las correcciones o comentarios respectivos.

A. Simulación a 38.75 GHz

La Figura 8 muestra el patrón de radiación del parche individual, se observa un valor de directividad de 8.3 dBi, por concepto se sabe que el arreglo tendrá una directividad mucho más alta a la del parche.

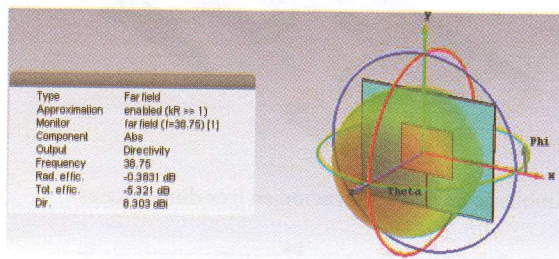


Fig. 8 Patrón de radiación del parche rectangular

Se simula la red de alimentación por separado y se observa que hay un corrimiento de frecuencia en la Figura 9, se observa que al conectar los parches persiste el corrimiento, sin embargo es menor, por lo que se hace un último ajuste empírico de dimensiones del parche hasta obtener el valor de resonancia adecuado.

El valor de potencia reflejada es de aproximadamente -2.2 dB, lo que representa un valor muy alto que se puede justificar considerando que no hay parches conectados, lo que implica que el paralelo entre dos líneas terminadas en impedancia que tiende al infinito sería de 0 ohmios, que a su vez equivale a un corto circuito y toda la potencia que se envía a la línea microstrip se reflejaría a la entrada.

Se espera además que la red de alimentación resuene a una frecuencia cercana a la del parche, puesto que las dimensiones de la misma dependen directamente de los valores de W y L.

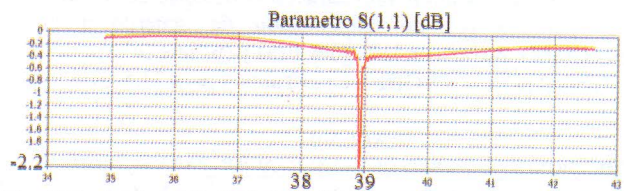


Fig. 9 Parámetro S(1,1) de la red de alimentación

El ajuste de valores se muestra en la Tabla 5, a continuación, se muestran los patrones de radiación y el VSWR del arreglo.

TABLA V
AJUSTE DE DIMENSIONES PARA EL ARREGLO

	W	L	dH
Valor	3.06 mm	2.544 mm	4.894 mm
Ajuste	3.14 %	3.62 %	4.72 %
Valor	2.964 mm	2.452 mm	4.663 mm

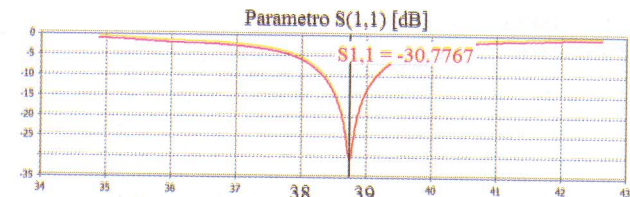


Fig. 10 Parámetro S(1,1) del arreglo

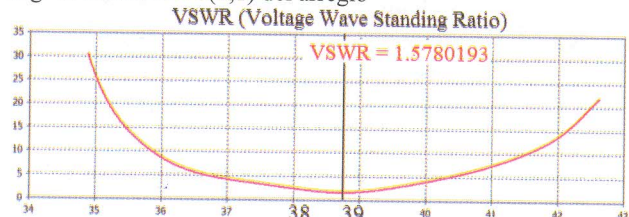


Fig. 11 VSWR del arreglo

La ganancia del arreglo es de 15.78 dB y la directividad tiene un valor de 15.83 dBi, son valores muy buenos y considerando que las pérdidas por retorno tienen valores de aproximadamente -30 dB de acuerdo a la figura 10, se considera que el diseño es correcto, se tiene además un VSWR de 1.5 de acuerdo a la figura 11, que indica un buen acoplamiento de impedancias entre la entrada y la red de alimentación.

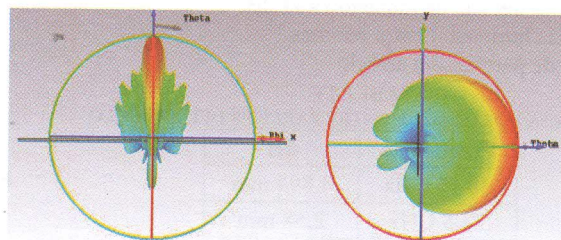


Fig. 12 Patrón de radiación del arreglo

La Figura 12 muestra el patrón de radiación en el plano E y el plano H respectivamente.

B. Simulación a 73.5 GHz

La Figura 13 muestra el patrón de radiación del parche individual, se observa un valor de directividad de 8.19 dBi.

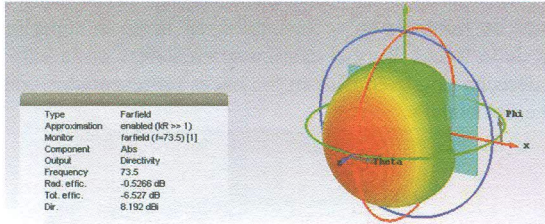


Fig. 13 Patrón de radiación del parche rectangular

Se realizan las mismas consideraciones que para la red de alimentación del arreglo a 38.75 GHz. Se hace ajustes empiricos en las dimensiones el parche y se muestra las correcciones en la Tabla 6.

Las Figuras 14 y 15 muestran el parámetro S(1,1) del arreglo de antenas y el VSWR que tienen valores de -23 dB y 1.13, que son valores muy buenos para un arreglo, indican bajas pérdidas por retorno y un buen nivel de acoplamiento de impedancia de entrada.

TABLA VI
AJUSTE DE DIMENSIONES PARA EL ARREGLO

Nombre	Valor	% ajuste	Valor
W	1.417 mm	2.54 %	1.381 mm
L	1.093 mm	3.2 %	1.058 mm
dH	2.58 mm	6.2 %	2.42 mm

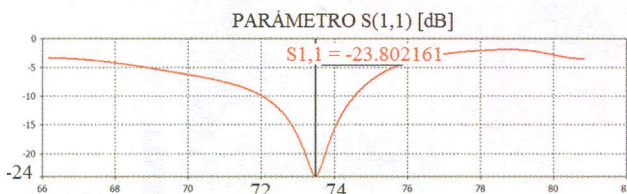


Fig. 14 Parámetro S(1,1) del arreglo

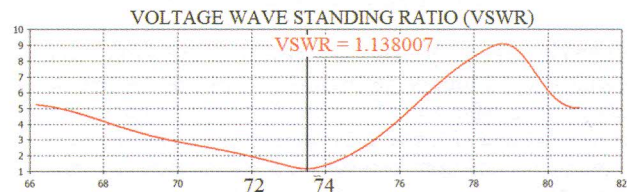


Fig. 15 VSWR del arreglo

La Figura 16 muestra el patrón de radiación del arreglo en los planos E y H, la directividad del mismo es de 15.39 dBi y tiene una ganancia de 15.22 dB lo que lo hace un buen arreglo en cuanto a los parámetros mencionados.

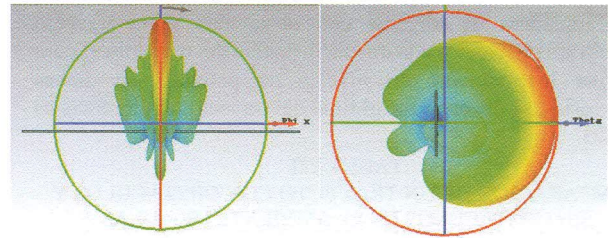


Fig. 16 Patrón de radiación del arreglo

A. Simulación dentro del ambiente Indoor

Se exporta los patrones de radiación en ASCII desde CST hasta ProMan, donde también se incluyen los ambientes diseñados en WallMan mostrados en las Figuras 5 y 7, se ubica las antenas simuladas en CST dentro del plano a una altura de 2.3 metros, con un azimut de 90 grados y una inclinación vertical hacia el suelo de 15 grados con respecto a la horizontal y se observa los niveles de potencia distribuidos a lo largo de los ambientes. Las simulaciones se realizan por dos métodos, el COST 231 y Trazado de Haces.

Simulación de Aulas a 38.75 GHz

Las distribuciones de potencia se muestran en las Figura 17 y 18, y a continuación se presenta la tabla 7 con los niveles de potencia obtenidos en diferentes puntos y a través de diferentes obstáculos. El transmisor está ubicado como se indica en la Figura 18, en la misma se pueden ver los puntos donde la potencia se degrada y donde las contribuciones de los haces reflejados y difractados hacen que el nivel aumente constructivamente.

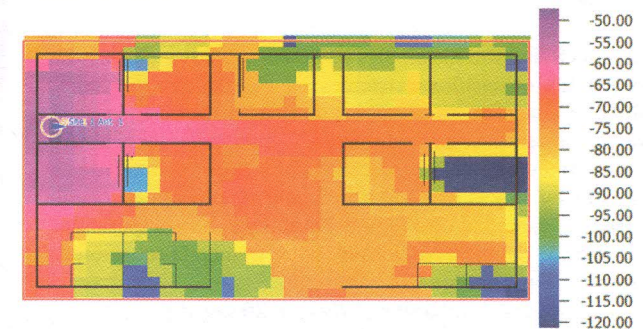


Fig. 17 Distribución de potencia en el ambiente de aulas para 38.75 GHz usando COST 231

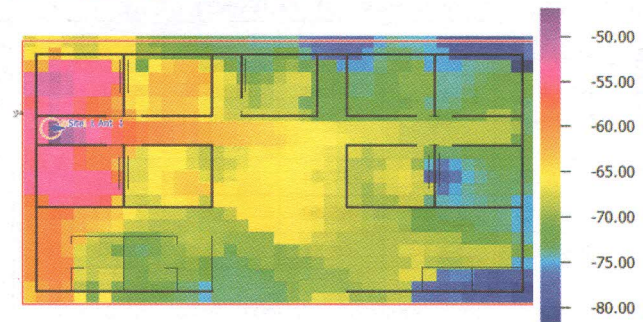


Fig. 18 Distribución de potencia en el ambiente de aulas para 38.75 GHz usando Trazado de Haces

Se considera un trayecto con obstáculos y un trayecto paralelo sin obstáculos a la misma distancia del transmisor, para observar los cambios en niveles de potencia en dichas trayectorias, se observa que al final del trayecto la diferencia es de 5 dB.

TABLA VII

COMPARACIÓN DE UN TRAYECTO CON OBSTÁCULOS Y SIN OBSTÁCULOS EN EL AMBIENTE DE AULAS

Distancia (m)	Potencia (dBm)					
	10	15	20	25	30	35
Con obstáculos	-62.5	-70	-68	-73	-70	-73
Sin obstáculos	-60	-64	-65	-67	-68	-68

Se presenta un histograma de potencia en la Figura 19 que indica que el valor de potencia mayormente distribuido a lo largo del ambiente de aulas es -68 dBm, esto es de mucha utilidad pues permitirá determinar el nivel de sensibilidad requerido por los receptores para diferentes aplicaciones.

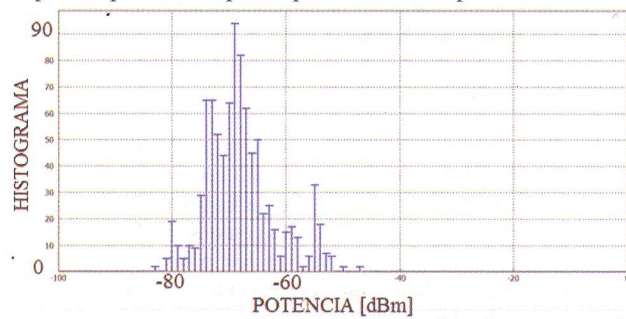


Fig. 19 Histograma de potencia en el ambiente de aulas para 38.75 GHz

La tabla 8 muestra los niveles de potencia antes y después de atravesar los obstáculos existentes en el ambiente de aulas, también se considera en las tablas un transmisor ubicado en el extremo opuesto de ambiente, que no funcionará simultáneamente con el primero, siendo el sitio 1 el marcado en la Figura 17 y 18 y el llamado sitio 2 un transmisor posicionado en forma de espejo al otro lado del ambiente. Se comparan los dos niveles de potencia con los obtenidos usando la ecuación de pérdidas en espacio libre (8).

$$L_{fs} = 32.4 + 20 \log(f \{GHz\}) + 20 \log(d \{kms\}) \quad (8)$$

TABLA VIII

NIVELES DE POTENCIA PARA EL AMBIENTE DE AULAS

Distancia (m)	Obstáculos		Espacio Libre (dBm)	Trazado de Haces desde el Sitio 1 (dBm)	Trazado de Haces desde el Sitio 2 (dBm)
	Pared de Concreto	Pizarrón dB			
10	1 x 6 dB	2 x 20	-57.44	-73	-62
25	5 x 6 dB	3 x 20	-65.40	-63	-73
37	6 x 6 dB	3 x 20	-68.81	-76	-77

Para ilustrar el comportamiento de la señal, se ha considerado penetraciones a los materiales de los cuales están hechas las paredes que permiten que existan contribuciones positivas a la

señal en distintos puntos de la trayectoria, la Figura 20 muestra como existen haces que se propagan a través de diferentes medios, los mismos que ilustran la necesidad de realizar una simulación pues es difícil predecir el comportamiento de una señal a éstas frecuencias.

El punto de transmisión se encuentra en la parte superior izquierda de la figura 20, y el destino se encuentra en la parte superior derecha donde confluyen los haces representados con líneas de color blanco.

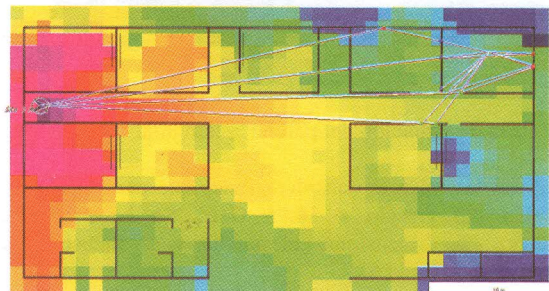


Fig. 20 Haces que contribuyen a la trayectoria en el ambiente de aulas para 38.75 GHz

Simulación de Oficinas a 38.75 GHz

Se procede de igual manera que en el caso del ambiente de aulas, se muestra a continuación los resultados en la Figura 21.

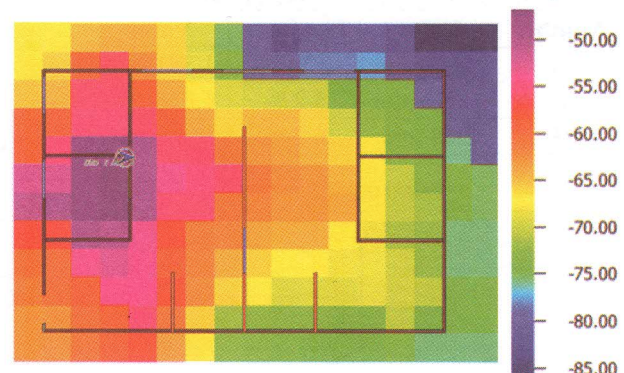


Fig. 21 Distribución de potencia en el ambiente de oficinas para 38.75 GHz usando Trazado de Haces

De igual manera que para el caso anterior, se expone la Tabla 9 que indica los valores de potencia al atravesar obstáculos, se representa en la tabla con el nombre de sitio 1 al transmisor ubicado en la Figura 21, y sitio 2 a un transmisor ubicado en el lado opuesto del ambiente, equivalente a posicionarlo en forma de espejo del primero en el lado derecho del plano.

TABLA IX

NIVELES DE POTENCIA PARA EL AMBIENTE DE OFICINAS

Distancia (m)	Obstáculos		Espacio Libre (dBm)	Trazado de Haces desde el Sitio 1 (dBm)	Trazado de Haces desde el Sitio 2 (dBm)
	Pared de Concreto	Pared de Madera			
-2	1 x 6 dB	0 x 3 dB	-43.47	-50	-55

4.2	0 x 6 dB	1 x 3 dB	-49.91	-56	-72
9.7	1 x 6 dB	1 x 3 dB	-57.18	-72	-79

De igual manera, para la distribución de potencia en el ambiente se suponen reflexiones que en parte se ilustran en la Figura 22 indicando el trayecto de un haz hacia su destino, desde el punto marcado en la izquierda superior, donde se encuentra el transmisor, hacia el punto inferior derecho donde confluyen los haces de color blanco.

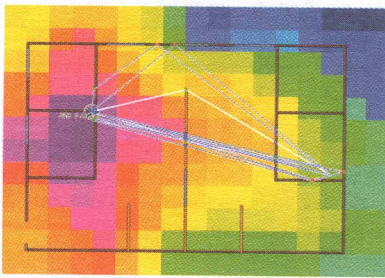


Fig. 22. Haces que contribuyen a la trayectoria el ambiente de oficinas para 38.75 GHz

Simulación de Aulas a 73.5 GHz

La Figura 23 muestra la distribución de potencia usando el modelo COST 231 y la Figura 24 mediante el método de trazado de haces para la propagación a 73.5 GHz, el transmisor se ubica donde indica la figura 23, en la parte superior izquierda, con un azimut de 90 grados y ubicado a una altura de 2.3 metros, con una inclinación hacia el suelo de 15 grados respecto al plano horizontal. Se observa una disminución mucho mayor en los niveles de potencia que para los mismos escenarios a 38.75 GHz y que a su vez existe una penetración mucho menor a las paredes de concreto.

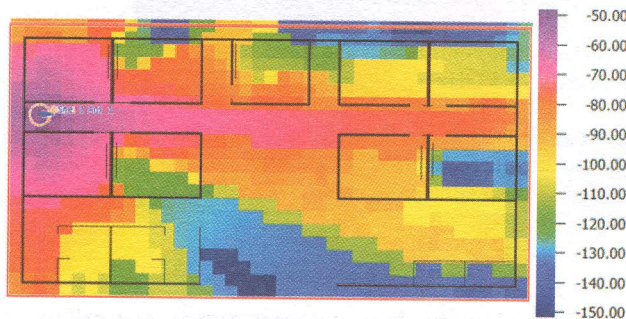


Fig. 23 Distribución de potencia en el ambiente de aulas para 73.5 GHz usando COST 231

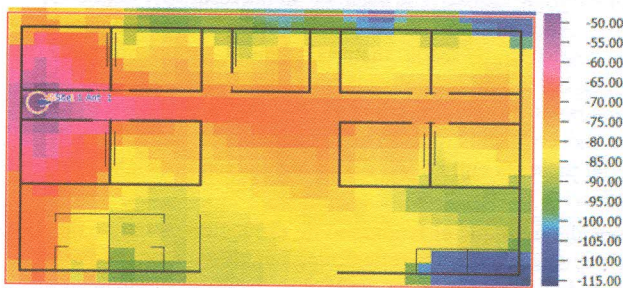


Fig. 24 Distribución de potencia en el ambiente de aulas para 73.5 GHz usando Trazado de Haces

Se supone una trayectoria con obstáculos y sin obstáculos a la misma distancia del transmisor en el ambiente de aulas para observar los niveles de potencia, la diferencia al final del trayecto es de 1 dB lo que permite interpretar que el trayecto con obstáculos tiene una gran contribución de haces por reflexión [11], se muestra un resumen en la Tabla 10.

TABLA X
COMPARACIÓN DE UN TRAYECTO CON OBSTÁCULOS Y SIN OBSTÁCULOS EN EL AMBIENTE DE AULAS

Distancia (m)	Potencia (dBm)					
	10	15	20	25	30	35
Con obstáculos	-80	-86	-81	-86	-84	-83
Sin obstáculos	-75	-75	-80	-82	-83	-82

Se obtiene un histograma de potencia en la Figura 25 para el ambiente de aulas que muestra que la potencia mayormente distribuida es -82.5 dBm, que es un valor muy bajo pero puede servir para determinar la sensibilidad de los receptores para trabajar a ésta frecuencia.

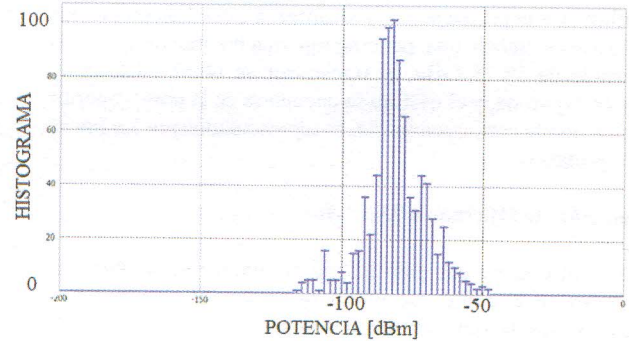


Fig. 25 Histograma de potencia en el ambiente de aulas para 73.5 GHz

En la Tabla 11 se muestra los niveles de potencia al atravesar obstáculos comparando el modelo de propagación de trazado de haces usado para la simulación con el modelo de pérdidas en espacio libre calculado usando la ecuación (8). La última columna de la tabla muestra un transmisor ubicado en el extremo opuesto de los ambientes que no funcionará simultáneamente con el primer transmisor, al igual que los casos anteriores, ubicado en el extremo opuesto del ambiente a manera de espejo.

TABLA XI
POTENCIA EN UN TRAYECTO EN EL AMBIENTE DE AULAS

Distancia (m)	Obstáculos		Espacio Libre (dBm)	Trazado de Haces desde el Sitio 1 (dBm)	Trazado de Haces desde el Sitio 2 (dBm)
	Pared de Concreto	Pizarrón			
10	1 x 6 dB	2 x 20dB	-63.01	-79	-69
25	5 x 6 dB	3 x 20dB	-70.96	-84	-88
37	6 x 6 dB	3 x 20dB	-74.37	-85	-94

Se observa una menor penetración y una atenuación mucho mayor a la frecuencia de 73.5 GHz, teniendo niveles muy bajos de potencia a distancias lejanas del transmisor, para lo cual se requerirá ajustar los niveles de sensibilidad en receptores para futuras aplicaciones y considerar éstos niveles de frecuencia para redes personales pues pueden ser limitados por el espacio físico de un aula u oficina.

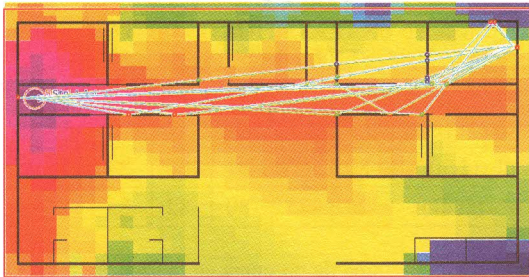


Fig. 26 Haces que contribuyen a la trayectoria el ambiente de aulas para 73.5 GHz

La Figura 26 ilustra las trayectorias de algunos haces que contribuyen a la propagación, y se observa inmediatamente que dichos haces tienen una penetración mucho menor que a la frecuencia de 38.75 GHz, el transmisor se ubica en la parte superior izquierda, y el destino se encuentra en la parte superior derecha, donde confluyen los haces representados por las líneas de color blanco.

Simulación de Oficinas a 73.5 GHz

De igual manera que para los casos anteriores, se ubica un transmisor en el punto que indica la Figura 27, se procede a realizar la simulación y los niveles de potencia se observan de acuerdo a la escala de colores.

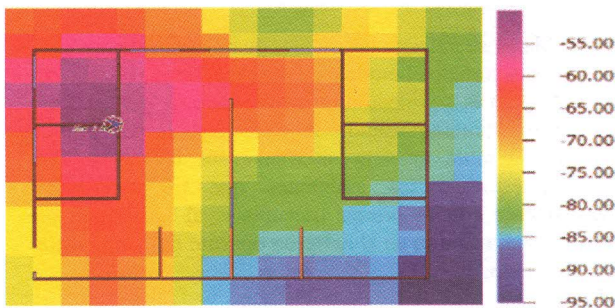


Fig. 27 Distribución de potencia en el ambiente de oficinas para 73.5 GHz usando Trazado de Haces

La Tabla 12 muestra un resumen de los niveles de potencia al atravesar obstáculos considerando también un transmisor ubicado en el lado opuesto del ambiente que no funcionará simultáneamente con el primero.

· TABLA XII ·
POTENCIA EN DOS TRAYECTOS EN EL AMBIENTE DE OFICINAS

Distancia (m)	Obstáculos		Espacio Libre (dBm)	Trazado de Haces desde el Sitio 1 (dBm)	Trazado de Haces desde el Sitio 2 (dBm)
	Pared de Concreto	Pared de Madera			
-2	1 x 6 dB	0 x 3 dB	-49.02	-60	-62
4.2	0 x 6 dB	1 x 3 dB	-55.47	-75	-67
9.7	1 x 6 dB	1 x 3 dB	-62.74	-84	-77

Se observa como las pérdidas por los obstáculos son similares a las que se podría esperar considerando atenuación por espacio libre y la suma de las atenuaciones individuales por cada obstáculo, de esa forma en un ambiente con pocos obstáculos se puede utilizar diferentes modelos de propagación con resultados similares.

La Figura 28 ilustra algunos de los haces que contribuyen a la propagación en un ambiente de aulas.

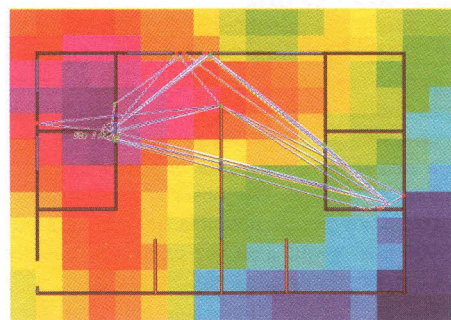


Fig. 28 Haces que contribuyen a la trayectoria el ambiente de oficinas para 73.5 GHz

Se puede observar como la señal experimenta reflexiones por lo que si se quiere analizar el problema con algún punto específico se debe simular su camino y analizar los niveles de potencia.

IV. CONCLUSION

De acuerdo a lo realizado en el presente trabajo, se concluye que la penetración en concreto no es un limitante a 38.75 GHz, sin embargo, a 73.5 GHz la señal en su mayoría se refleja en la superficie del mismo, no se puede predecir exactamente el comportamiento de cada material dentro de un ambiente, depende del nivel de potencia que tiene la señal antes de enfrentarse al obstáculo, como regla general el material con mayor uso en la construcción de Ecuador es el concreto y dicho material presenta entre 5 y 8 dB de atenuación por cada 30 cm de grosor.

Considerando que el fenómeno de difracción es muy bajo a éstas frecuencias, que las reflexiones son altas a medida que se aumenta la frecuencia, y que en el caso de una implementación no se puede modificar de manera fácil los ambientes físicos, la solución es ubicar diferentes puntos de transmisión para cubrir

áreas con niveles bajos de potencia, analizando los efectos de interferencia que se podrían tener al trabajar con una misma banda de frecuencia.

REFERENCES

- [1] IEEE, 3. Federico Boccardi, Robert W. Heath Jr., Angel Lozano, Thomas L. Marzetta, Bell Labs, Petar Popovski, «Five Disruptive Technology Directions for 5G».
- [2] IEEE, Smulders, P., «Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: Prospects and future directions».
- [3] IEEE, Hammoudeh, A. K., «Millimetric wavelengths radiowave propagation for line of sight indoor microcellular mobile communications».
- [4] Rogers Corporation, «RO5880C Laminates,» 2015. [En línea]. Extraído de: <http://www.rogerscorp.com/acs/products/32/rt-duroid-5880-laminates.aspx>. [Último acceso: 17 04 2017].
- [5] Rogers Corporation, «RO3003C Laminates,» 2015. [En línea]. Extraído de: <https://www.rogerscorp.com/documents/722/acs/RO3000-Laminate-Data-Sheet-RO3003-RO3006-RO3010.pdf>. [Último acceso: 17 04 2017]
- [6] Constantine. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, Second Edition, John Wiley & Sons, New York.
- [7] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2017, «Presentación Norma Ecuatoriana de la Construcción», [En línea], Extraído de: <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/presentacion-norma-ecuatoriana-de-la-construccion>, [Último acceso: 16/02/2017].
- [8] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2017, «Preguntas y Respuestas NEC», [En línea], Extraído de: http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/01/Preguntas-y-Respuestas_NEC.pdf, [Último acceso: 16/02/2017].
- [9] Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2011, «Ordenanzas Municipales», [En línea], Extraído de: http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Ordenanzas/ORDENANZAS%20MUNICIPALES%202011/, [Último acceso: 16/02/2017].
- [10] Y. Huang y K. Boyle, Antennas from theory to practice, Reino Unido: Wiley, 2008.
- [11] T. S. Rappaport, R. Heath, R. Daniels, J. Murdock, Millimeter Wave Wireless Communications, Prentice Hall, New Jersey, 2015

Profesional dedicado actualmente a la docencia, con áreas de experticia e interés en comunicaciones inalámbricas, radiofrecuencia y diseño de antenas.



Ricardo Llugsí Cañar. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional (2008). Master of Science Communication Engineering, The University of Manchester (2013). Maestría en Conectividad y Redes de Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional (2017).

Profesional a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son el diseño de antenas, el procesamiento de señales e imágenes y la generación de prototipos para IoT

BIOGRAFÍA



Jorge E. Vaca, nació en Quito el 12 de diciembre de 1989, Estudio la secundaria en el Colegio Municipal Sebastián de Benalcázar, donde obtuvo el título de Bachiller Físico Matemático. En el año 2009 ingresó a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.