

ANTENAS EN SISTEMAS INALÁMBRICOS DE COMUNICACIONES DIGITALES

Valdez, Alberto D.; Miranda, Carlos A.; Schlesinger, Paola L.; Chiozza, Juan A.; Miranda, Carlos V. (*)

RESUMEN: Las antenas utilizadas en los sistemas inalámbricos de comunicaciones se rigen por la teoría electromagnética de propagación de ondas. Los sistemas de comunicaciones que utilizan señales digitales se han desarrollado rápidamente de la mano de la tecnología dando un impulso exponencial al crecimiento de dispositivos móviles y portables. En el presente trabajo se abordarán conceptos básicos de antenas para luego desarrollar tres tipos de antenas utilizadas frecuentemente en el campo de las comunicaciones inalámbricas digitales: las antenas MIMO, las antenas fractales y un breve análisis conceptual de las antenas basadas en algoritmos genéticos.

Palabras claves: Radiación, diversidad, eficiencia, fractales, algoritmos genéticos.

I. INTRODUCCIÓN

Las antenas utilizadas en los sistemas inalámbricos de comunicaciones se rigen por la teoría electromagnética de propagación de ondas [1] [2]. Los fenómenos electromagnéticos no cuánticos se pueden describir utilizando las ecuaciones de Maxwell, particularmente, las expresiones válidas para el espacio libre, es decir un medio homogéneo y sin cargas. Las leyes de Faraday y de Maxwell-Ampere describen la interrelación

existente entre el campo eléctrico y magnético en función del tiempo y describen el fenómeno de propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio. Coligado con el campo eléctrico y magnético está el vector de Poynting que indica la dirección de propagación. La densidad de potencia da la energía electromagnética en cualquier punto del espacio y permitirá definir muchos de los parámetros que comúnmente utilizamos para caracterizar una antena (directividad, ancho de haz y abertura efectiva).

La distribución espacial de la energía radiada por una antena está caracterizada por el diagrama de radiación de la antena. La representación gráfica del diagrama de antena se realiza utilizando coordenadas esféricas, siendo sus variables la distancia al punto considerado, el ángulo de elevación y el ángulo azimutal [1]. En la actualidad los sistemas de comunicaciones que utilizan señales digitales se han desarrollado rápidamente de la mano de la tecnología la que permitió la aplicación práctica de conceptos teóricos consolidados hace muchos años. En particular una de las líneas de desarrollo apunta hacia sistemas de comunicaciones inalámbricos que utilizan pequeños equipos electrónicos, móviles, portables, con una gran capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos,

(*) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Departamento de Ingeniería, UNNE, Corrientes CP3400, Argentina. dvaldez@exa.unne.edu.ar

bajo variados protocolos. Especialmente se desarrollaron aquellos que permiten una conectividad bajo el estándar IEEE 802.11x a través de la conocida WiFi (*Wireless Fidelity*) o a través de redes celulares en sus diferentes generaciones 3G, 4G, xG y diferentes estándares: UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*, Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles), LTE (Long Term Evolution, Evolución a largo plazo), LTEA (*Long Term Evolution Advance*, Evolución Avanzada a Largo Plazo), etc. Estos equipos requieren minimizar el consumo de energía y maximizar la eficiencia del sistema de antena a fin de lograr mayores distancias de cobertura, mínimo consumo de energía y tamaños reducidos. Aquí es cuando adquiere importancia el diseño de antenas a utilizar en los sistemas inalámbricos de comunicaciones de datos.

En el presente trabajo se abordarán de manera somera conceptos básicos de antenas, una clasificación, métodos de análisis, ejemplos de antenas clásicas para luego abordar específicamente tres tipos de antenas utilizadas frecuentemente en este campo: las antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*, Múltiple Entrada Múltiple Salida), las antenas fractales y un breve análisis conceptual de las antenas basadas en algoritmos genéticos (AG). Se finalizará con una reseña de las conclusiones y las líneas futuras de trabajo.

II. DESARROLLO ANTENAS

Definición de antenas

Las ecuaciones de Maxwell relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las cargas y corrientes que los crean. La solución a las ecuaciones da lugar a formas de onda [2]:

- Guiadas (líneas de transmisión, guías de ondas).

- Libres en el espacio (antenas).

Este conjunto de ecuaciones junto con ciertas relaciones auxiliares y definiciones es un grupo básico de relaciones matemáticas que describen todos los fenómenos electromagnéticos en el margen de frecuencias desde cero hasta las radio frecuencias de las bandas más elevadas y fenómenos a la frecuencia de la luz para tamaños superiores a los atómicos. Las ondas electromagnéticas que radia o recibe una antena se rigen por estas ecuaciones.

El IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define a una antena como “aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas”. Dicho de otro modo, la antena es la transición entre un medio guiado y el espacio libre [3], [4].

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia (f) y longitud de onda (λ):

$$c = \lambda \times f \quad (1)$$

donde c es la velocidad de propagación de la luz en el medio (3×10^8 m/s en el espacio libre).

Las antenas en su gran mayoría guardan una estrecha relación entre su dimensión física y la longitud de onda eléctrica de la señal a transmitir. El conjunto de todas las frecuencias a utilizar (espectro de frecuencias) se divide en bandas, cada una de las cuales presenta características que dan origen a tipologías de antenas muy diversas (Tabla I).

TABLA I
Bandas de frecuencias

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)
3	ULF	300-3 000 Hz
4	VLF	3-30 kHz
5	LF	30-300 kHz
6	MF	300-3 000 kHz
7	HF	3-30 MHz
8	VHF	30-300 MHz
9	UHF	300-3 000 MHz
10	SHF	3-30 GHz
11	EHF	30-300 GHz
12		300-3 000 GHz
13		3-30 THz
14		30-300 THz
15		300-3 000 THz

RECOMENDACIÓN UIT-R V.431-7 [5].

La comunicación entre un transmisor y un receptor separados una distancia R puede realizarse básicamente mediante: a.- Una línea de transmisión con pérdidas proporcionales a $e^{-\alpha R}$, donde α es la constante de atenuación de la línea. b.- Dos antenas con visión directa y con pérdidas proporcionales a $1/R^2$ [3].

Clasificación según la geometría [3]

Por su forma, podemos clasificar las antenas en: antenas de cable, antenas de apertura, reflectores, lentes, agrupaciones de antenas o array, antenas de ondas viajeras (*travelling wave antennas*), antenas logoperiódicas, otras configuraciones geométricas.

Clasificación según su comportamiento eléctrico [3]

Por su comportamiento eléctrico podemos clasificarlas en: antenas de banda ancha, antenas miniatura, antenas multifrecuencia, antenas inteligentes.

Los nuevos sistemas de comunicaciones móviles de Cuarta Generación (4G) y las

nuevas generaciones (xG) en fase de experimentación ofrecen una gran variedad de servicios a una muy elevada tasa binaria. En estos escenarios multiservicios, los operadores se ven obligados a optimizar sus procesos de planificación de red y a introducir nuevas tecnologías que mejoren la eficiencia espectral de los despliegues celulares.

Las antenas inteligentes constituyen una tecnología innovadora que sin duda puede contribuir significativamente a mejorar la capacidad de las redes xG y otros servicios inalámbricos de elevada capacidad de transporte. Este tipo de antenas se basan en tecnologías MIMO, fractales y AG.

Análisis de antenas [3], [4]

El problema de análisis de antenas busca de resolver las ecuaciones de Maxwell, con unas condiciones de contorno determinadas: los conductores y dieléctricos de los que está formada la antena. Para estructuras sencillas de antena como las antenas tipo cable, dipolos, monopolos, los métodos analíticos son suficientes. Cuando la antena tiene una forma compleja o si el medio que la rodea presenta características como anisotropía, no-homogeneidad, etc., la resolución del problema por métodos analíticos puede ser muy complicada y en ocasiones, imposible. Entonces hay que recurrir a los métodos numéricos. Entre los métodos más conocidos encontramos el Método de los momentos (*Method of Moments, MoM*), el Método de diferencia finita en el dominio del tiempo (*Finite Difference Time Domain, FDTD*) y el Método de los elementos finitos (*Finite Element Method, FEM*). Tendencias actuales de investigación básica y de interés comercial, la evolución de los métodos numéricos, junto con computadoras más rápidas, permite analizar antenas en estructuras en movimiento, como bar-

cos, aviones, satélites, coches, y ver cómo se comporta la antena en un entorno diferente en el espacio libre. Podemos citar a modo de ejemplo:

Miniaturización de antenas. El aumento de dispositivos con antena ha sufrido un crecimiento continuo (Smartphone, tablets, notebooks, routers inalámbricos, drones, dispositivos sensores inalámbrico remotos, etc.) y consecuentemente la necesidad de minimizar el tamaño de las antenas. El diseño de este tipo de antenas lleva consigo diversos parámetros como la radiación de la antena teniendo en cuenta el cuerpo humano, la propagación multicamino y el diseño con dimensiones muy pequeñas respecto a la longitud de onda de la señal.

Otro ejemplo muy ligado a la electrónica es la integración de una antena en un chip, juntamente con los circuitos de radiofrecuencia, como filtros y amplificadores. Es lo que se llama *system-on-chip*.

Antenas multifrecuencia, es decir, antenas que puedan operar en varios sistemas de comunicación con características similares de radiación.

Antenas para aplicaciones militares donde es interesante disponer, por ejemplo, de antenas de gran ancho de banda y de tamaño miniatura.

Otro campo de interés es el de antenas dieléctricas. Del mismo modo que un conductor fija unas condiciones determinadas de contorno (campo eléctrico tangencial nulo en su superficie), las dieléctricas fijan otras condiciones y así podemos encontrar bocinas construidas exclusivamente con dieléctrico como por ejemplo, las antenas

denominadas lentes.

La demanda para incrementar la capacidad de las redes sin cables ha impulsado la investigación de métodos que exploten la capacidad de selección espacial. En este sentido, los sistemas de antena inteligente (*smart antennas*, *MIMO*) dotan de mayor capacidad, mejor calidad de servicio, más tiempo de vida de las baterías en las unidades móviles y menor contaminación por radiaciones no ionizantes (RNI). Las antenas inteligentes están basadas en una agrupación de antenas y un algoritmo de procesamiento y formación del haz.

Otra área de aplicación práctica es la de síntesis de antenas, es decir, cómo tiene que ser la antena para que radie de una forma especificada a priori. Entre los diversos métodos disponibles se destaca por su principio los basados en algoritmos genéticos.

El objetivo primordial de un algoritmo genético es evolucionar a partir de una población de soluciones para un determinado problema, produciendo nuevas generaciones de soluciones que sean mejores que las anteriores.

Se han desarrollado métodos de gran importancia mediante la aplicación de la geometría fractal al diseño de antenas [1], [3]. La aplicación de dicha geometría es útil para el diseño de antenas eléctricamente pequeñas, eficientes, multifrecuencia y de alta directividad.

Otros desarrollos orientados a redes inalámbricas de comunicaciones lo constituyen los Sistemas de Antenas Distribuidas (*Distributed Antenna System*, *DAS*) y los Sistemas de Radio Distribuidos (*Distributed*

Radio System, DRS) [6]. Los sistemas DAS y DRS y las celdas de dimensión reducida son diversas opciones para facilitar servicios inalámbricos en las áreas de interior de los edificios.

Otro campo de gran interés es el de los metamateriales [7], que consiste básicamente en la síntesis de materiales no existentes en la naturaleza con propiedades ϵ_r y μ_r negativas. Un metamaterial es un material artificial que presenta propiedades electromagnéticas inusuales, propiedades que proceden de la estructura diseñada y no de su composición, es decir, son distintas a las de sus elementos constituyentes. La estructura diseñada podría considerarse como una “molécula”, y sus propiedades ser modeladas mediante parámetros globales, permitividad, permeabilidad, índices de refracción, etc.

ANTENAS UTILIZADAS PARA LA COMUNICACIÓN DIGITAL

Las antenas utilizadas en sistemas que operan con señales digitales responden a diversos lineamientos teóricos y consecuentemente a diversas topologías [1]. Veremos aquí algunas de aquellas que las tecnologías actuales han implementado en los sistemas de comunicaciones electrónicos de vanguardia utilizando señales digitales en un sentido amplio de la palabra.

Las antenas que abordaremos en este trabajo son las antenas de múltiples entradas y múltiples salidas, MIMO, antenas fractales y antenas de algoritmos genéticos. Como característica en común estas antenas operan sobre múltiples bandas y su tamaño es muy reducido adaptándose muy bien a los actuales sistemas de comunicaciones digitales transportando señales con diferentes codificaciones y modulaciones.

Antenas MIMO

MIMO es una tecnología de diseño de antenas que permite proporcionar más velocidad y cobertura inalámbrica a los sistemas de transmisión [8]. Es una tecnología que se aplica en sistemas inalámbricos como WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas), WiFi y redes móviles 3,5G como HSDPA (*High-Speed Packet Access*, Acceso por Paquetes de Alta Velocidad) y HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*, Acceso por Paquetes Ascendente de Alta Velocidad). Precisamente esta mejora de la eficiencia de las antenas ha permitido la evolución a la arquitectura 4G o LTEA.

El sistema MIMO es una tecnología inalámbrica que utiliza varios transmisores y receptores para transferir mayor cantidad de datos al mismo tiempo y algoritmos apropiados aprovechando las contribuciones de las trayectorias múltiples. Las antenas inteligentes utilizan la tecnología de diversidad espacial, la cual hace uso de antenas en exceso. Cuando hay más antenas que transferencias espaciales, las antenas pueden agregar diversidad al receptor y aumentar el alcance [9].

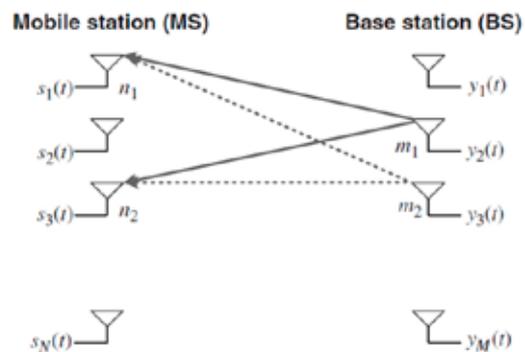


Figura 1. Topología de antena MIMO [8]

En la figura 1 se observa una topología de antenas MIMO con N antenas emisoras y M antenas receptoras, en una configuración generalizada. La diversidad aumenta con el producto de $M \times N$ y sus características de funcionamiento dependen de la arquitectura espacial, hardware y algoritmo de control.

Cuanto más antenas se utilicen se obtienen mayores velocidades de transferencia efectiva. Por ejemplo en un sistema dado con tres antenas se puede lograr una velocidad de 600 Mbps, mientras un adaptador con dos antenas tiene una velocidad de 300 Mbps.

En tecnología MIMO puede haber un circuito de RF para cada antena, lo cual permite la coexistencia de varias vías de RF. Este proceso es conocido como multiplexación espacial ya que varios flujos espaciales (señales de radio) se llevan en una sola frecuencia simultáneamente. La cantidad de datos que se puede procesar en ambos extremos de la conexión permite mejorar la velocidad y la conectividad de la red. La tecnología MIMO está asociada frecuentemente a los sistemas de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales).

Las señales sufrirán desvanecimientos de una manera casi independientes creando caminos de señal diferentes.

Se puede realizar una clasificación de las antenas MIMO de acuerdo a su parámetro de diversidad.

Diversidad de antenas [8], [10]: La diversidad de antenas, puede obtenerse instalando múltiples antenas, tanto en el lado del transmisor como en el lado del receptor. Si las antenas se instalan suficientemente apartadas entre sí, las señales sufrirán des-

vanecimiento de una manera más o menos independiente, y por tanto se crean caminos de señal diferenciados. La separación de antena requerida depende de la dispersión local del medio así como de la frecuencia de la portadora. El canal de radio presenta un comportamiento dinámico producto de los efectos multicamino y del ensanchamiento Doppler, los cuales pueden afectar significativamente el rendimiento del sistema

La diversidad en la transmisión de datos se basa en la siguiente idea: la probabilidad de que múltiples canales estadísticamente independientes experimentan simultáneamente desvanecimientos profundos es muy baja. En situaciones reales es de esperar que los canales no sean totalmente independientes, sin embargo, un índice de correlación bajo sería suficiente para obtener una disminución de la relación señal a ruido (*SNR, Signal Noise Relation*) media necesaria para alcanzar una determinada probabilidad de indisponibilidad. A esta disminución de SNR media se llama ganancia de diversidad. Las diferentes réplicas recibidas de la señal transmitida son combinadas adecuadamente en recepción y enviadas a un circuito de demodulación y detección.

Por ejemplo en un sistema de telefonía móvil en el que el terminal está cerca del suelo y en el que existen mucha dispersión, el canal varía sobre pequeñas distancias en el espacio, y por tanto una separación de antena típica puede ser la mitad del ancho de banda de la portadora. Sin embargo para estaciones bases o sistemas instalados en torres, esta separación debe ser del orden de diez veces el ancho de banda.

Diversidad de frecuencia: la información se transmite en más de una portadora, de tal forma que señales con una separación

de frecuencia mayor que determinado valor no experimenten el mismo desvanecimiento, siendo la separación en frecuencia necesaria para que los canales estén parcial o totalmente decorrelados una función del ancho de banda de coherencia del canal. Esta técnica tiene la desventaja de necesitar generalmente un ancho de banda significativamente mayor, con un número igual de receptores que de canales de diversidad. La diversidad en frecuencia se emplea usualmente en enlaces por línea de vista que usan FDM (*Frequency Division Multiple*, Multiplexión por División de Frecuencia) y para rutas críticas.

Diversidad de tiempo [8], [10]: La diversidad de tiempo puede conseguirse promediando el desvanecimiento del canal a través del tiempo. Normalmente, el tiempo de coherencia del canal es entre diez y cien veces el tiempo de símbolo, por lo tanto el canal está altamente correlado a través de símbolos consecutivos. Por consiguiente la información se transmite repetidamente a espacios de tiempo, de forma que la repetición se haga en condiciones independientes de desvanecimiento. Este tipo de diversidad tiene un inconveniente que hace que su uso esté poco generalizado, y es que se reduce la velocidad de transmisión efectiva, y además, debido a que la separación temporal entre transmisiones de las réplicas debe ser mayor que la duración media de los desvanecimientos, se produce una considerable latencia.

Diversidad de polarización [8], [10]: Se ha comprobado experimentalmente que las señales polarizadas horizontal y verticalmente presentan un grado significativo de decorrelación. Esta decorrelación es debida a las múltiples reflexiones en el canal entre el transmisor y el receptor con un coeficiente de reflexión distinto para cada tipo de polarización, lo que resulta en diferentes ampli-

tudes y fases para cada señal. Tras suficientes reflexiones aleatorias, las señales pueden mostrar un alto grado de decorrelación, haciendo posible la ganancia de diversidad.

Diversidad de ángulo [8], [10]: Las diferentes réplicas de la señal pueden experimentar también diferentes canales de acuerdo a la dirección en que apunten los lóbulos principales de la(s) antena(s), tanto en el transmisor como en el receptor. De esta forma, al incidir sobre diferentes superficies de dispersión (*'scatterers'*), se pueden obtener canales con bajas correlaciones.

Diversidad por selección [8], [10]: Al clasificar las técnicas de diversidad de acuerdo al procesamiento aplicado a las señales recibidas o transmitidas, una de las técnicas más sencillas es la de selección. Cuando se aplica en el receptor se pueden utilizar m demoduladores y m cadenas de RF para proveer m ramas de diversidad, seleccionándose la rama con mayor SNR, o se pueden utilizar m antenas y solo un demodulador y cadena de RF, seleccionando la rama con la mayor relación portadora a ruido (CNR, Carrier Noise Relation). En caso de su aplicación en transmisión, el receptor debe observar periódicamente todos los canales e informar al transmisor sobre el canal con mayor envolvente. En caso que todas las ramas tengan la misma SNR media, la amplitud de la señal de salida del combinador simplemente es la magnitud de la señal más fuerte.

Diversidad por conmutación [8], [10]: Este método es muy similar a la diversidad por selección, excepto que en lugar de usar la mejor de m señales, los canales son observados en una secuencia determinada hasta encontrar uno con envolvente por encima de un nivel umbral predeterminado. Este canal se mantiene hasta que cae por debajo del

umbral y el proceso de búsqueda se reinicia. Las estadísticas de desvanecimiento son un poco inferiores a las obtenidas por el método anterior, pero su implementación es más sencilla, requiriendo de sólo un receptor.

A modo de ejemplo en la figura 2 vemos la SNR necesaria para un BER (Bit Error Rate, Tasa de Error Binario) dado y tomado como parámetro diferentes esquemas de codificación MIMO

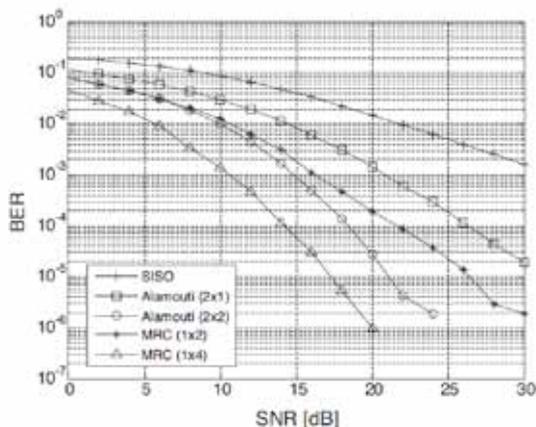


Figura 2. BER versus SNR para diferentes esquemas MIMO [8]

Una antena muy utilizada en la actualidad es la antena de parche o microstrip la cual se basa en la tecnología de fabricación de circuitos impresos de alta precisión. Consiste básicamente en un parche radiante que se imprime sobre un sustrato dieléctrico cubierto por un material conductor y un plano de tierra, como se muestra en la Figura 3. La antena está compuesta por un rectángulo de circuito impreso doble faz, dos capas de cobre sobre un sustrato dieléctrico, comúnmente fibra de vidrio.

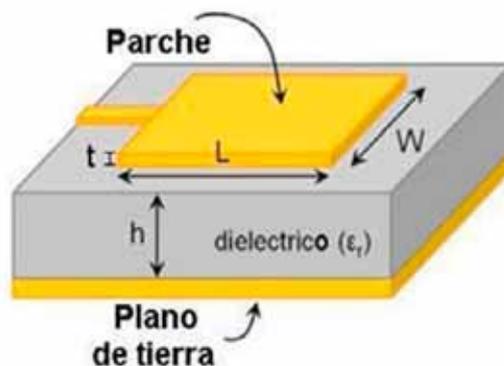


Figura 3. Antena de parche o microstrip [11]

El sustrato dieléctrico permite aislar el parche radiante del plano de tierra, el cual tiene tres parámetros que influyen en el diseño de la antena de parche:

- 1) Constante dieléctrica ϵ_r o permitividad relativa.
- 2) Grosor o altura h del sustrato.
- 3) Pérdidas en el dieléctrico δ .

También se considera el material de construcción y principalmente, la geometría del parche, que puede ir desde formas geométricas regulares hasta geometrías más complejas como tipo fractal.

Entre las ventajas que se pueden mencionar de este tipo de antenas podemos citar: dimensiones pequeñas, menor peso, diversidad de polarización, sintonización multibanda.

Sin embargo debemos mencionar como desventajas: baja eficiencia, baja potencia de radiación, ancho de banda reducido en la frecuencia, (en torno al 5%-10%) y afectación por factor térmico.

Aunque estas antenas pueden ser utilizadas de manera individual, es usual utilizar arreglos con el fin de lograr mejores características que las proporcionadas de manera individual.

Como ejemplo podemos tomar la antena de tecnología MIMO Ubiquiti LocoM5 la cual utiliza 4 antenas tipo parche como se observa en la figura 4 [12].

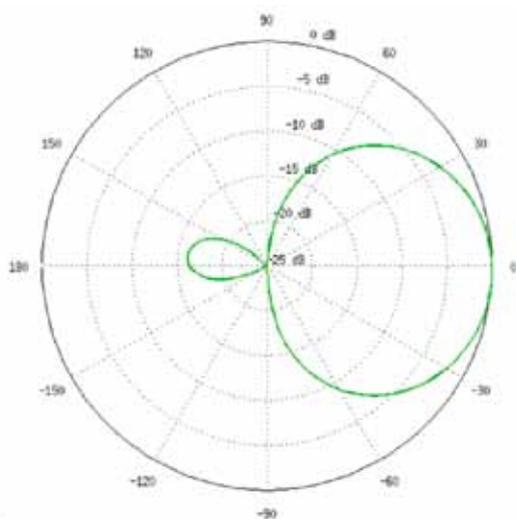


Figura 5. Diagrama de radiación horizontal Ubiquiti LocoM5 [12]

La Recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R): Recomendación UIT-R F.752-1 Técnicas de Diversidad para Sistemas de Relevadores Radioeléctricos (Cuestión UIT-R 106/9) [13] establece las recomendaciones referidas a los sistemas que utilizan diversidad de antenas.

Antenas fractales

La utilización de la geometría fractal aplicada a antenas permite el diseño de antenas multifrecuencia utilizando una propiedad que presentan estas geometrías: la auto-semblanza. Esta propiedad indica

que el objeto está formado por réplicas de sí mismo a escalas más reducidas [3], permitiendo el diseño de antenas fractales que presenten diagramas iguales o muy parecidos en diferentes frecuencias de operación. Un ejemplo se observa en la figura 6.

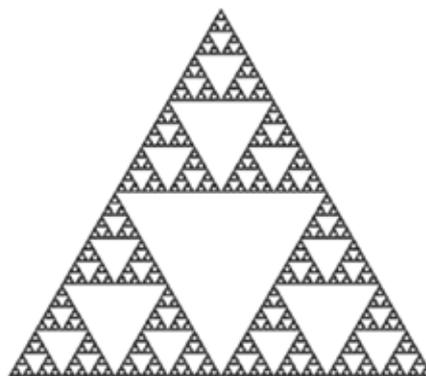
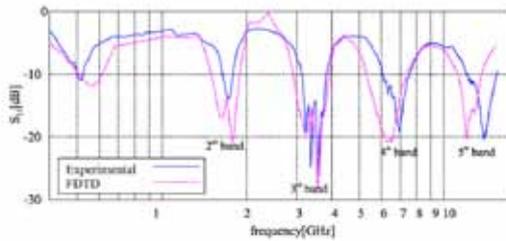


Figura 6. Plantilla de una antena fractal basada en el triángulo de Sierpinski [14]

Una posibilidad para diseñar antenas multi-frecuencia es ir añadiendo tantas antenas como bandas de operación se requiera. Por ejemplo, para un sistema operando a 1GHz, 2GHz y 4GHz se podrían diseñar tres dipolos de media longitud de onda. Sin embargo si se aborda el problema con una antena autosimilar como la inspirada en el triángulo de Sierpinski (matemático polaco) se puede lograr que diversas regiones de la estructura de la antena operen a una banda de frecuencias. Bien diseñada se puede conseguir que para una banda de frecuencias centrada en f_1 , sea toda la estructura la responsable de la radiación.

En la figura 7 se observa la variación del coeficiente de reflexión S_{11} típico de una antena de topología Sierpinski en función de la frecuencia, diferenciándose las bandas de frecuencias de mínima reflexión, adecuadas para el funcionamiento de la antena.



El uso de fractales en el diseño de antenas ofrece varios beneficios a los fabricantes de dispositivos que tienden a la miniaturización [1], [3]. La geometría de fractales fue descrita en 1975 por Benoît B. Mandelbrot. Esta visión diferente de la geometría intenta describir matemáticamente objetos y fenómenos que resultarían muy complejos de describir con la geometría Euclidiana. Existen varias técnicas de creación de fractales: las curvas de Koch, los copos de nieve de Koch y los triángulos de Sierpiński.

Para la construcción del fractal se empieza con una figura inicial conocida como semilla. A dicha figura se le aplica un generador y cierto grado de iteración que permita finalmente obtener la figura deseada. La figura final servirá como modelo para diseñar la antena fractal. Utilizando eficientemente el espacio la antena tiene un perímetro lo suficientemente extenso en comparación con λ lo cual causa que la resistencia de radiación se incremente, la energía reactiva decrezca y la eficiencia de la radiación se incremente.

En el mercado podemos encontrar una amplia variedad de antenas de topología fractal. A modo de ejemplo podemos mencionar la antena fractal de la marca Fractus FR01-S4-250. Su diseño está basado en el triángulo de Sierpiński y sus dimensiones son muy reducidas (Figura 8).

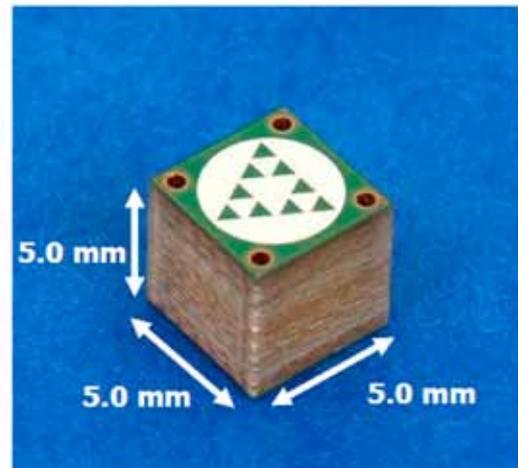


Figura 8. Antena fractal FRACTUS FR01-S4-250 [15]

Su tamaño es muy pequeño considerando las longitudes de onda eléctrica de funcionamiento haciéndola ideal para sistemas electrónicos portables tales como los equipos de telefonía celular. En la Tabla 2 se puede observar las especificaciones técnicas de la antena FRACTUS FR01-S4-250 tribanda, para telefonía celular y la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical, Industrial, Científica y Médica).

TABLA II
Especificaciones técnicas antena Fractus tribanda FR01-S4-250 [15]

Especificaciones Técnicas	698 – 798 MHz	824 – 960 MHz	1710 – 2690 MHz
Eficiencia Promedio	> 40%	> 45%	> 70%
Ganancia de Pico	-0.2 dBi	1.0 dBi	3.4 dBi
ROE	< 3:1		
Diagrama de Radiación	Omnidireccional		
Polarización	Lineal		
Peso	0.25 g.		
Temperatura	-40 a +85 °C		
Impedancia	50 Ω		
Dimensiones	5.0 mm x 5.0 mm x 5.0 mm		

De las especificaciones técnicas de la tabla II podemos inferir que su comportamiento mejora de manera creciente con la frecuencia con un aumento de la eficiencia promedio y la ganancia de pico. La relación

de onda estacionaria se mantiene por debajo de 3:1 para todo el rango de frecuencias.

Estas características sumadas a su diagrama de radiación omnidireccional son compatibles con los equipos celulares actuales.

Antenas de Algoritmos Genéticos [16], [17], [18]

Son variados los esquemas que pueden ser utilizados para optimizar las características eléctricas de la antena, entre ellos se encuentra la aplicación de algoritmos genéticos. Los AG son un método de búsqueda estocástica que considera las posibles soluciones de un problema como individuos de una población y aplica procedimientos de búsqueda que imitan los mecanismos empleados por la evolución biológica como técnica de optimización. Un AG permite que una población compuesta por muchos individuos evolucione bajo reglas de selección específicas hacia un estado que maximice su aptitud.

Los AG son métodos numéricos que permiten sintetizar cualquier tipo de parámetros de una antena. Además, presenta una gran versatilidad ya que se pueden añadir como variables a optimizar no sólo las amplitudes (tanto en módulo como en fase) sino que también la distancia entre elementos. El diseñador especifica las propiedades electromagnéticas de la antena, y el AG sintetiza automáticamente una configuración que sirva.

Un proceso de optimización de antenas consta de:

1) Creación de una población inicial, por ejemplo, un conjunto de N arreglos con amplitudes y distancias arbitrarias.

2) A partir de esta población inicial la función de coste evalúa su proximidad al objetivo y ordena el individuo de mejor a peor.

3) Con los mejores especímenes (padres), se realiza una cruce para obtener hijos (cross-over). esperando que hereden las buenas propiedades de sus progenitores.

4) Como los hijos pueden ser mejores que los padres, se aplica la función de coste para ordenar los elementos de mejor a peor.

5) Para evitar caer en un máximo relativo, se introducen mutaciones el cual sirve por ampliar el espacio de búsqueda. Una mutación puede ser por ejemplo una variación aleatoria de una amplitud o de la distancia en algunas de las antenas del arreglo.

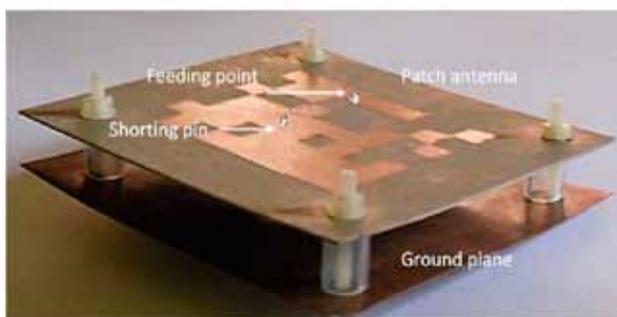


Figura 9. Antena microstrip con comportamiento multibanda sintetizada mediante optimización por algoritmos genéticos. (J. Jayasinghe)

III. CONCLUSIONES

Las antenas utilizadas en los sistemas inalámbricos de comunicaciones de datos digitales son de vital importancia para una cobertura amplia y predecible, minimizando los problemas fundamentales de transmisión tales como interferencias, desvanecimiento, retardos, pérdida transitoria de señal.

Las antenas descritas en este trabajo han sido estudiadas hace ya mucho tiempo; sin embargo de la mano del desarrollo de la tecnología, las altas velocidades de operación electrónica actuales, el aumento de la potencia de procesamiento digital, los grandes niveles de integración de circuitos en semiconductores y los nuevos materiales disponibles han potenciado su desarrollo en innumerables sistemas que operan con señales digitales.

Es así que en la actualidad una gran variedad de sistemas de comunicaciones electrónicas utilizan antenas de tecnología MIMO y fractales por su pequeño tamaño pero fundamentalmente por su comportamiento eléctrico aplicado a sistemas en movimiento o portables.

Así también el desarrollo de antenas basadas en algoritmos genéticos adquieren importancia creciente con la finalidad de optimizar el comportamiento de antenas de una red de comunicación electrónica, constituyéndose en una alternativa viable para la resolución de múltiples problemas.

La evolución de los sistemas móviles y portables inalámbricos llevará a la implantación de sistemas de comunicaciones electrónicas en entornos más complejos como ser las picoceldas en interior de edificios, centros de salud, celdas a bordo de satélites, naves, automóviles, naves industriales, aumentando la necesidad de utilizar antenas robustas, eficientes y confiables.

IV. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Una de las líneas futuras de trabajo considerada de interés y factible de ser llevada a cabo se orienta hacia el estudio, diseño, construcción, medición y caracterización de antenas microstrip y fractales en las bandas de 800Mhz, 1.800 MHz, 1.900 MHz y 2.400 MHz. Se pretende investigar métodos de diseño práctico e implementación de antenas adaptativas, multibandas y de ganancia direccionable. Estas antenas serán utilizadas en un Sistema de Medición Autónomo de Radiaciones No Ionizante y en prototipos de Antenas Inteligentes, objetivos fijados en el Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Social denominado "Optimización y Control de las RNI", a cargo del Grupo de Radiaciones No Ionizantes del Departamento de Ingeniería de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional del Nordeste.

REFERENCIAS

- [1] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [2] Simon Ramo, John R. Whinnery, Theodore Van Duzer, "Campos y Ondas", Pirámide, 1974.
- [3] O Jaime Anguera y Antonio Pérez. Young, "Teoría de Antenas", La Salle Ingenierías, 2008.
- [4] José Alberto Bava, "Antenas Reflectoras en microondas", EdULP, 2013.
- [5] Unión Internacional de Telecomunicaciones. RECOMENDACIÓN UIT-R V.431-7, 1953-2000.
- [6] Yan Zhang, Honglin Hu, Jijun Luo, "Distributed Antenna Systems: Open Architecture for Future Wireless Communications", Auerbach Publications, 2007.
- [7] Jordi Bonache Albacete, Tesis doctoral: "Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados", Universidad Autónoma de Barcelona, 2006.
- [8] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang "MIMO-OFDM Wireless Communications With MatLab", John Wiley & Sons, 2010.
- [9] TelecomHall, <http://www.telecomhall.com/>, 25 de febrero de 2015
- [10] Kühn, V., "Wireless Communications over MIMO Channels", John Wiley & Sons Ltd, 2006
- [11] <http://www.antenna-theory.com/spanish/antennas/patches/patch.php>, 26 de febrero de 2015
- [12] Ubiquiti, <https://www.ubnt.com/products/> http://dl.ubnt.com/guides/NanoStation_M/NanoStation_M_Loco_M_QSG.pdf, 25 de febrero de 2015.
- [13] Unión Internacional de Telecomunicaciones. RECOMENDACIÓN UIT-R F.752-1, 1992-1994.
- [14] <http://interprice.esy.es/2014/05/17/antena-fractal/>, 25 de febrero 2015.
- [15] Fractus. http://www.fractus.com/sales_documents/FR01-S4-250/DS_FR01-S4-250.pdf, 25 de febrero de 2015.
- [16] Gregory S. Hornby, Derek S. Linden, Jason D. Lohn. "Automated Antenna Design with Evolutionary Algorithms", [http://ti.arc.nasa.gov/m/pub-archive/1244h/1244%20\(Hornby\).pdf](http://ti.arc.nasa.gov/m/pub-archive/1244h/1244%20(Hornby).pdf) NASA, 2006.
- [17] D.S. Linden, E-E- Altschuler. "The Design of Yagi Antennas Using a Genetic Algorithm" Proceedings UNS/URSI Radio Science Meeting, Baltimore, MD, July 1996, p.283
- [18] F.J. Ares-Pena, J.A. Rodriguez-Gonzalez, E. Villanueva-Lopez, S.R. Rengarajan "Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns". Antennas and Propagation, IEEE Transactions on (Volume:47, Issue: 3). Page. 506 - 510. ISSN: 0018-926X. 1999.