

INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones en general surgen de la necesidad del hombre de estar comunicándose continuamente, a esta reflexión llegué después de platicar con un profesor acerca del por qué decidió estudiar Ingeniería Electrónica y comunicaciones, a lo que en primera instancia me comentó “puedo pasar un día sin tomar agua, dos o tres sin comer pero ni uno sin comunicarme”.

Todas y cada una de las personas aprenden un idioma, una lengua o un dialecto según su capacidad para comunicarse, algunos otros tienen que aprender a comunicarse con señas. También se observa la necesidad de comunicarse al escribir o al tratar de dejar un pensamiento para generaciones posteriores; al remontarse un poco en la historia se puede ver que para largas distancias se enviaban señales de humo o cartas con ayuda de un corredor.

El modelo de un sistema de comunicación no ha cambiado, ya que se necesita un emisor, un medio y un receptor, tal es el caso de las comunicaciones inalámbricas que tienen como medio al espectro electromagnético, que en teoría es ilimitado. Pero en la realidad, es un recurso natural limitado tan preciado que es utilizado lo más eficientemente posible, el espectro electromagnético ha experimentado modificaciones para poder ser utilizado en toda su capacidad de la mejor manera, ya que se encuentra en su punto máximo de congestionamiento. A pesar del uso extenso de medios de transmisión como la fibra óptica, líneas de microstrip, guías de onda; las transmisiones inalámbricas constituyen

una eficaz y poderosa herramienta que permite la transferencia de voz, datos y video, sin la necesidad de utilizar cables para establecer la conexión.

La congestión radioeléctrica del espacio se ha visto aliviada en parte gracias a nuevos esquemas de modulación y de compresión de información. No obstante, el recurso del espacio, como canal de comunicaciones es cada vez más demandado en la medida en que los avances tecnológicos permiten el acceso a tecnologías de punta a un mayor sector de la población.

En el presente trabajo, se realizó un estudio de las diferentes técnicas de modulación digital a fin de encontrar con cual de ellas se puede transmitir una mayor cantidad de datos con menos ruido y mejor uso del espectro electromagnético, considerando la aplicación actual y cual es el estado del arte de las técnicas de modulación digital, es decir, qué propuestas hay para mejorar la eficiencia espectral de los esquemas de modulación digital o que propuestas de nuevas técnicas de modulación digital existen para el canal de radio.

En el Capítulo 1 se estudia la evolución de los sistemas inalámbricos, la repercusión que tienen en la telefonía celular y en los satélites. Retomando conceptos básicos como el modelo de comunicación, modulación y las características que nos permiten evaluar un esquema, que son la base técnica de este trabajo.

En el Capítulo 2 se da una introducción a las técnicas de modulación digital, que comprende una forma de clasificarlas, enfatizando los aspectos más importantes de cada una ellas como son su plano constelacional, las ecuaciones para representar cada señal,

densidad espectral y su probabilidad de error, así como el diagrama a bloques de los moduladores y demoduladores.

En el Capítulo 3 se realiza una introducción a diferentes estándares de comunicación inalámbrica para observar la aplicación de las diferentes técnicas de modulación digital y la manera en que hacen más eficiente el envío de información.

En el Capítulo 4 se hicieron simulaciones que permiten comparar los planos constelacionales de las diferentes técnicas de modulación, así como del BER. Se llevó a cabo una comparación en la eficiencia del ancho de banda de diferentes estándares y se hacen comentarios sobre las aplicaciones que tiene cada una.

En el Capítulo 5 se introducen 3 técnicas que son SOPK, 2MSK y xGCM, así como las nuevas tecnologías que se pretenden usar para 4G, resaltando la importancia de una técnica que se adapte según se requiera con las condiciones del medio y velocidad de transmisión.

En el Capítulo 6 se dan las conclusiones del estudio realizado y se proponen algunas sugerencias para trabajos futuros.

Capítulo 1

Introducción a las Comunicaciones Inalámbricas

1.1. Evolución de las comunicaciones inalámbricas.

Es todo un clásico citar los trabajos de Hertz y Marconi de finales del siglo XIX para comenzar a hablar de la historia de las comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, el origen de la radio se puede remontar al año 1680 con la teoría de Newton sobre la composición de la luz blanca. Esta teoría atrajo la atención de muchos científicos como un área de estudio, especialmente de aquellos en Europa, que comenzaron a esforzarse por investigar experimentos con la luz. Estos descubrimientos son la base de los sistemas de comunicación inalámbrica [1].

Los orígenes de las comunicaciones inalámbricas siguen rápidamente la invención de la radio a finales de 1880 y principios de 1890. Las primeras aplicaciones de los radios móviles están relacionadas con la navegación segura de los barcos en el mar. Antes de comenzar a usar las comunicaciones inalámbricas, para comunicarse se utilizaba por ejemplo, las transmisiones en clave Morse, pero esto dio un giro total en 1906 cuando Reginald Fessenden logra transmitir exitosamente voz sobre el canal de radio. En 1915 con el invento de Fleming del tubo de vacío o bulbo se hizo posible construir radios móviles, con lo cual en 1920 se empiezan a generar los primeros sistemas que transmitían en una sola dirección con AM, en 1933 cuando se descubre FM se mejora la calidad de audio [2,4,6,37].

En 1946 se presenta el primer sistema de telefonía móvil comercial (San Luis Missouri), MTS (Mobile Telephone Service) y un año más tarde surge el concepto de telefonía celular en los laboratorios Bell por D.H. Ring, siendo MTS el precursor de los

sistemas de telefonía celular y en 1948 Shockley, Bardeen y Brattain inventan el transistor en los laboratorios Bell, con lo cual se comienzan a miniaturizar todos los circuitos electrónicos. AT&T introduce IMTS (Improved Mobile Telephone System) en 1964 siendo un antecedente del servicio de telefonía celular. En 1968 para evitar interferencia la FCC comienza a regular el uso del espectro electromagnético [2,4,6,37].

Como se puede observar el impacto que han tenido las comunicaciones inalámbricas en los últimos años ha sido asombroso, ya que han ido evolucionando a pasos agigantados. Si se repasa un poco el medio de transmisión que utilizan las comunicaciones inalámbricas, se observa que su principal recurso de transmisión es el espectro electromagnético.

El espectro electromagnético es el conjunto de ondas electromagnéticas, que van desde las de menor longitud de onda y por lo tanto mayor frecuencia y energía, como son los rayos cósmicos, rayos gamma, y rayos X, pasando por la luz ultravioleta, luz visible (que en realidad ocupa una estrecha franja del espectro electromagnético), infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda y menor energía como son las ondas de radio [3]. En cualquier caso, cada una de las categorías es de ondas de variación de campo electromagnético. En la Figura 1.1 se muestra el espectro electromagnético dividido en frecuencia:

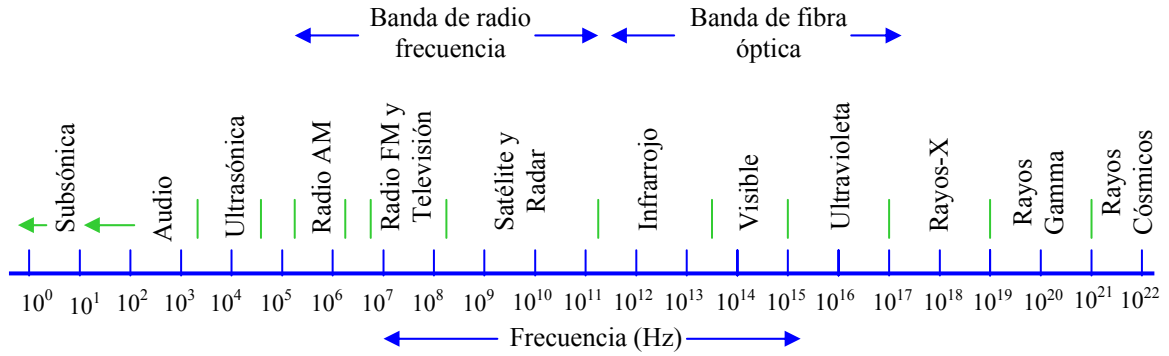


Figura 1.1. Espectro electromagnético [6].

La Tabla 1.1 muestra el espectro de RF, con sus longitudes de onda, frecuencias y aplicaciones:

Banda de RF	Frecuencia	Comentarios
VLF	>3KHz	Muy baja frecuencia de radio, se encuentra la voz.
LF	>30KHz	Baja frecuencia, onda larga de radio.
MF	>300KHz	Mediana Frecuencia, onda media (AM) y corta de radio.
HF	>3MHz	Alta frecuencia, aplicaciones como banda civil y AM.
VHF	>30MHz	Muy alta frecuencia, aplicaciones como radio FM, aeronáutica y televisión.
UHF	>300MHz	Ultra alta frecuencia, aplicaciones como televisión ,satélites, radioastronomía y telefonía celular.
SHF	>3GHz	Super alta frecuencia, radar, microondas terrestres y satelitales.
EHF	>30GHz y <300GHz	Extrema alta frecuencia, radar, microondas terrestres y satelites.

Tabla 1.1 Espectro de Radio Frecuencia [6,37].

El espectro electromagnético es un recurso ilimitado. Que ha experimentado modificaciones para poder ser utilizado en toda su capacidad, aunque los nuevos esquemas de modulación han ido aliviando este tráfico aun son insuficientes.

1.2. Evolución de la comunicación celular.

La habilidad de comunicarse con personas en movimiento ha evolucionado significativamente desde que Guglielmo Marconi, en 1897, demostró por primera vez la habilidad de la radio para proveer contacto continuo con barcos que se encontraban navegando por el canal Inglés. Desde entonces, la gente alrededor del mundo ha adoptado con gran entusiasmo nuevos métodos y servicios de comunicaciones inalámbricas.

Sin embargo, ha sido en los últimos 10 años, cuando la industria de las comunicaciones experimentó el más grande crecimiento. Esto se debe entre otras razones, al mejoramiento en la fabricación de circuitos de RF, la integración de circuitos a gran escala y las tecnologías de miniaturización; las cuales han logrado que los equipos portátiles se vuelvan más pequeños, económicos y confiables.

Después de la invención de las comunicaciones inalámbricas de dos vías a principios del siglo XX y hasta mediados del mismo, los descubrimientos clave de los sistemas móviles inalámbricos fueron inventados en los Laboratorios Bell. El concepto consiste en el reuso de la misma radio frecuencia (RF) en un grupo de células arregladas en una estructura llamada *clúster* para servir a un número ilimitado de usuarios [12].

La Primera Generación de los sistemas celulares de comunicaciones móviles inalámbricas era analógica y se basaba en la tecnología de multiplexado por división de frecuencia (FDM). Limitados por la tecnología de aquel tiempo, la mayoría de los teléfonos eran grandes y se encontraban permanentemente instalados en un vehículo. A finales de los años 1980, con los avances de la tecnología de semiconductores, la industria de los teléfonos móviles creció significativamente, cuando en 1991 sale a la venta el primer estándar digital [2].

Utilizando los circuitos integrados de aplicación específica (ASICs) el tamaño de los teléfonos disminuyó considerablemente y se convirtieron en teléfonos de bolsillo.

El alza de la industria celular vino con la introducción de los estándares de la tecnología digital de la segunda generación (2G), incluyendo GSM (*Global System for Mobile Communications*), IS-136 (TDMA), IS-95 (CDMA), PDC (*Personal Digital Cellular*).

La característica más importante de la Tecnología Digital consiste en que reduce significativamente el costo del Handset y la infraestructura de los sistemas.

El sistema de Tercera Generación (3G) comenzó a ser desarrollado casi inmediatamente después del lanzamiento de los sistemas de 2G. Entre los objetivos del sistema de Tercera Generación se encuentran: la mejora significativa de la eficiencia espectral y posiblemente el costo del sistema. Una característica más profunda consiste en el mejoramiento de las capacidades de información y multimedia: la comunicación, ya no

únicamente será de persona a persona, sino que ahora también se podrán llevar a cabo la comunicación de persona a máquina y de máquina a máquina.

Como ya se mencionó anteriormente, una de las características principales de los sistemas celulares de Tercera Generación (3G), consiste en el mejoramiento de la eficiencia del espectro de frecuencias.

Con el fin de facilitar el "roaming global", la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha propuesto frecuencias en bandas similares para todo el mundo. Desafortunadamente, las bandas de frecuencias asignadas no necesariamente están alineadas de país a país.

La generación 2.5G ofrece características extendidas, ya que cuenta con más capacidades adicionales que los sistemas 2G, como: GPRS (*General Packet Radio System*), HSCSD (*High Speed Circuit Switched*), EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*), IS-136B e IS-95B entre otros. A este tipo de tecnologías se les conoce como de Generación 2.5 (2.5 G), por encontrarse en un punto intermedio entre las tecnologías 2G, como GSM, y los sistemas 3G de Tercera Generación, como UMTS.

La tecnología celular de generación 2.5 hace posible el aumento de la velocidad de transmisión de datos, en comparación con las redes celulares 2G actuales. Los operadores celulares pueden implementar la tecnología 2.5G mediante actualizaciones de software en la red, mientras que la tecnología 3G precisa la instalación de hardware nuevo, por lo que

muchas compañías consideran hacer cambios de este tipo antes de migrar a otra generación.

Para la mayoría de los sistemas de 2G, basados en los estándares TDMA o GSM, la evolución a 3G se planea a través del estándar EDGE (*Enhanced Data for GSM Evolution*) [33]. Para los proveedores de un nuevo servicio, el Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal (UMTS) está basado en la tecnología CDMA de banda ancha (W-CDMA) [12, 33].

El sistema W-CDMA utiliza 5 MHz de ancho de banda en cada enlace, usando Duplexado por División de Frecuencias (FDD). Para los sistemas basados en la tecnología IS-95 (CDMA), la evolución será basada en el estándar IS-2000 (cdma2000) [12]. La implementación inicial de cdma2000 utiliza 1.25 MHz de ancho de banda en cada enlace para asegurar una compatibilidad completa con los sistemas CDMA de 2G, con una trayectoria de migración posible para sistemas de 5 MHz.

Para facilitar el rápido desarrollo de los estándares móviles inalámbricos de 3G, fueron lanzados 2 programas con la estandarización UMTS y cdma2000. Ellos fueron la Sociedad de la Tercera Generación de Proyectos, identificada como 3GPP, por UMTS y 3GPP2 por cdma2000 [12, 13].

Analizando la historia del desarrollo de la telefonía celular, cabe mencionar que su evolución ha sido sorprendentemente rápida, ya que básicamente en 10 años, se han logrado desarrollar los sistemas de comunicaciones, y evolucionar hasta la Tercera

Generación de Telefonía Celular. Lo cual, lleva a pensar que dentro de poco, los sistemas celulares van a integrar todos los servicios con los que la sociedad cuenta actualmente, y van a lograr converger con otras redes de comunicación e información, como pueden ser la red satelital, Televisión pagada, ISDN, entre otras.

Hace algunos años el celular no era algo tan necesario como lo es ahora, cada vez más personas requieren estar mejor comunicadas, pero los celulares no son el único ejemplo también hay que tomar en cuenta a los enlaces satelitales que hacen posible tener una comunicación en los lugares que se encuentran muy apartados.

1.3. Historia de los satélites.

Las redes de radiocomunicación móvil, como las de telefonía celular, generalmente no pueden tener la cobertura total de un área geográfica grande debido a obstáculos naturales, aun instalando múltiples estaciones repetidoras en lugares elevados, por lo que conseguir la cobertura deseada puede requerir un largo proceso de desarrollo o no ser viable desde el punto de vista económico [16].

Un satélite de comunicaciones es un repetidor de microondas en el cielo, el cual consiste de una combinación de diversos circuitos electrónicos de comunicaciones [6].

El físico y escritor de ciencia ficción Arthur C. Clarke propuso la idea de aplicar el concepto de la órbita geostacionaria para ubicar en ella satélites artificiales para

comunicación de cobertura global. La aplicación de esa idea permitió el desarrollo de los sistemas de satélites comerciales, los cuales surgen de la necesidad de establecer enlaces confiables de comunicación telefónica y telegráfica como para la televisión [16].

En 1960 en Canadá y los Estados Unidos se demuestra la viabilidad técnica y económica de los sistemas satelitales, la cual primero fue experimentada en la NASA (National Aeronautics and Space Administration) [4].

La tecnología de los sistemas satelitales puede ser dividida en dos partes: el segmento espacial y el segmento de Tierra. Los grandes avances que se obtuvieron en estos dos aspectos, como son los satélites y la tecnología móvil terminal, han hecho posible el rápido desarrollo de estos sistemas [4]. En los primeros 25 años de operación, las capacidades de los satélites se han incrementado 200 veces sobre sus predecesores, y el costo de canal por segmento espacial se ha reducido [17].

El servicio satelital móvil se ha definido por la FCC como servicio de radiocomunicación entre estaciones móviles terrenas y una o más estaciones espaciales. En general, se pueden clasificar a los servicios satelitales en tres clases:

1. servicios aeronáuticos,
2. marítimos y
3. de tierra.

Por las características que tienen los satélites de cubrir grandes áreas de la superficie terrestre en cualquier momento y que son una forma de sistema de radiocomunicación hay unos aspectos importantes que comentar:

- Proveer servicios y agregar tráfico sobre grandes áreas.
- Alojar recursos (ancho de banda y potencia) para diferentes usuarios en una región de cobertura según lo necesiten.
- Los costos son insensibles a la distancia.
- Proveer servicios a usuarios móviles.
- Comunicaciones punto a punto, multipunto a punto y punto a multipunto.

Dentro de los servicios que se brindan por satélite se encuentra la distribución de señales de televisión, comunicación entre estaciones terrenas con barcos, aviones y vehículos, y acceso a datos de monitoreo y control (monitoreo de tuberías y niveles de líquidos) [17].

Al comenzar a implementarse la 3G de comunicaciones inalámbricas y con el despertar de una 4G, los satélites han ganado mucha atención. Dentro de las características principales se tiene la provisión de transmisiones de datos de alta velocidad y servicios multimedia interactivos.

Para 4G los servicios móviles satelitales estarán totalmente integrados con los sistemas celulares, jugando importantes roles de respaldo o acceso a satélites, para proveer acceso en cualquier lugar del mundo a diversos usuarios [19].

Algunos de los estándares aprobados para IMT-2000 son (algunos ya se están implementando) [18,57]:

- **SAT-CDMA** basado en la propuesta de *Telecommunications Technology Association* (TTA) de Korea.
- *Satellite W-CDMA (SW-CDMA)* basado en la propuesta de *European Space Agency* (ESA).
- *Wideband Code/Time Division Multiple Access (W-C/TDMA)* basado en la propuesta de ESA
- *Satellite Radio Interface-D (SRI-D)* basado en la propuesta de *ICO Global Communications* llamada ICO: RTT (Intermediate Circular Orbit)
- *Satellite Radio Interface-E (SRI-E)* basado en la propuesta de Inmarsat llamada Horizons
- **Satcom 2000** basado en la propuesta de Iridium.

Gran parte de la investigación y de lo que se está desarrollando, consideran las redes de satélites que no son geoestacionarios para dar servicios multimedia a usuarios móviles por su bajo retraso de propagación y pérdidas por trayectoria [19]. La industria satelital Angel Technologies da servicio de Internet por medio de un avión solar, el cual está diseñado para volar a 51 mil pies de altura, transmitiendo a una potencia de CD de 20KW y con una capacidad total de 6Gbps. También conocido como HALO [56].

1.4. Sistema de comunicación.

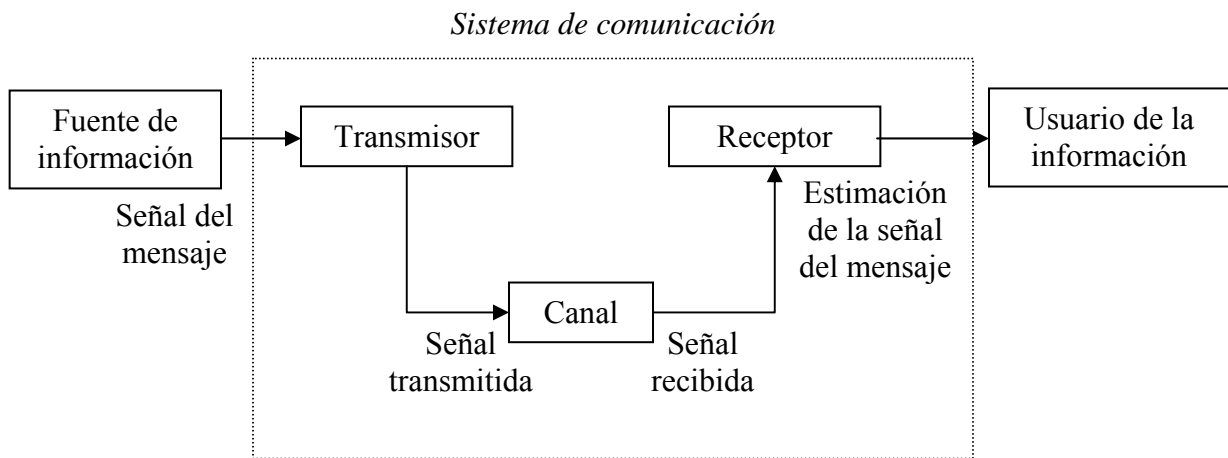


Figura 1.2. Elementos de un sistema de comunicación [20].

En la Figura 1.1 se observa el modelo básico de cualquier comunicación, aunque aquí sólo se muestra comunicación en un solo sentido, para que se complete el ciclo el receptor tiene que hacer uso de esa información o contestarle al transmisor cerrando así el proceso de comunicación.

La función del transmisor es convertir la señal del mensaje producida por la fuente de información en una forma que puedan ser transmitidas por el medio de comunicación o canal. Mientras que el receptor será el encargado de reconstruir esa señal en una forma reconocible para el usuario, la señal es distorsionada por el ruido que se adiciona por los mismos elementos del transmisor, por el medio y por el receptor [20].

Dentro de los sistemas de comunicación modernos se tienen los sistemas de cable metálico, microondas, sistemas de radio satelitales y sistemas de fibra óptica.

1.5. Modulación.

Señal es un suceso que sirve para, o al menos es capaz de, iniciar una acción [5]. Una señal puede ser también la variación de una corriente eléctrica u otra magnitud que se utiliza para transmitir información [3].

En telecomunicación el término Modulación engloba el conjunto de técnicas para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda senoidal. Básicamente, la modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora, que es la información que se quiere transmitir, dichos parámetros pueden ser fase, amplitud o frecuencia [3,6].

A continuación se muestra la forma más usual en que se puede caracterizar una señal [6]:

$$V(t) = V \sin(2\pi ft + \theta) \quad (1.1)$$

donde:

$V(t)$ = onda senoidal de voltaje variante en el tiempo

V = pico de amplitud (volts)

f = frecuencia (hertz)

θ = cambio de fase (radianes)

En la Tabla 1.2 se ven algunas técnicas de modulación que surgen de ir variando la frecuencia, el voltaje y la fase de una señal. A partir de éstas surgen las demás técnicas de modulación.

Parámetro	Digital	Análogo
V	ASK	AM
F	FSK	FM
θ	PSK	PM

Tabla 1.2 Técnicas básicas de modulación [6].

La importancia de modular se hace clara porque sería impráctico propagar señales de información en banda base sobre cables metálicos, fibra óptica o a través de la atmósfera, ya que se interferirían unas con otras y porque es muy difícil radiar bajas frecuencias a través de una antena en forma de energía electromagnética, ya que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de transmisión que afecta el diseño de la antena, ya que a mayor frecuencia menor tamaño de la antena [6,15].

$$\lambda = c / f \tag{1.2}$$

Donde λ es la longitud de onda, c es la velocidad de propagación de la luz y f es la frecuencia a la cual transmite una antena. La longitud de la antena es aproximadamente igual a la longitud de onda, y usando la ecuación 1.2 [15]:

$$L = \lambda = c / f \tag{1.3}$$

Donde L es la longitud de la antena (tamaño) se observa que ésta es inversamente proporcional a la frecuencia.

1.6. Energía y potencia.

Las clasificaciones de energía y de potencia son mutuamente excluyentes ya que:

- a) Una señal de energía tiene una potencia media igual a cero.
- b) Una señal de potencia tiene una energía infinita.

En general, las señales periódicas y las señales aleatorias son señales de potencia y las señales determinísticas y no periódicas son señales de energía. Para el análisis de una técnica de modulación es muy importante comparar sus espectros de energía, los cuales no son otra cosa sino la representación de la señal a la salida del modulador por medio del análisis de Fourier ya sea en frecuencia o en el tiempo. La serie de Fourier ayuda a representar una señal en términos de un conjunto de senoidales relacionadas armónicamente, mientras que la transformada de Fourier da una descripción en el dominio de la frecuencia o espectro de la señal.

1.7. Medidas a tomar en cuenta para seleccionar una técnica de modulación.

Cuando se selecciona una técnica de modulación hay ciertos parámetros en los que hay que fijarse a la hora de seleccionarla como son [6,7]:

1. Eficiencia de potencia.
 - a. Habilidad de una técnica de modulación para preservar la fidelidad del mensaje digital a bajos niveles de potencia.

- b. El diseñador puede incrementar la inmunidad al ruido al incrementar la potencia de la señal.
- c. Es una medida de cómo la potencia de una señal debe ser incrementada para alcanzar un BER en particular para un esquema de modulación.
- d. Señal de energía por bit / densidad espectral de la potencia del ruido:

$$E_b / N_0.$$

2. Eficiencia del ancho de banda y capacidad del canal.

- a. Habilidad para acomodar información con un ancho de banda limitado.
- b. Tasa de transmisión de datos por hertz: R/B bps por Hz.
- c. Ley de Shannon: Capacidad del canal / ancho de banda; a continuación se muestra la ecuación de dicha ley [6]:

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.4)$$

3. Facilidad de implementación.

- a. Que, tanto el circuito para modular como el demodulador, sean fáciles de implementar.
- b. Que su costo de fabricación sea económico.

En este capítulo se dio una revisión de la evolución de las comunicaciones inalámbricas, con una introducción a los conceptos básicos de comunicación como: modelo de comunicación, importancia de modular, tipos de señales y características para seleccionar una técnica de modulación. Es claro que la evolución para migrar a la segunda

generación de comunicaciones inalámbricas en gran parte fue el hecho de que al usar modulaciones digitales se podía hacer un uso más eficiente del espectro, por lo que en el siguiente capítulo se darán las características de cada técnica de modulación digital, así como una forma de clasificarlas.