

## Capítulo 2

# Estado del Arte

En este capítulo se va a exponer la situación actual de las comunicaciones por radiofrecuencia, haciendo especial énfasis en los circuitos integrados que nos ocupan.

El punto de partida de la tecnología inalámbrica WLAN se sitúa en 1979 cuando IBM implementa las primeras redes de este tipo en Suiza. El término radiofrecuencia se aplica a la porción menos energética del espectro electromagnético, situada entre unos 3 Hz y unos 300 GHz.

En la Tabla 1 se enumeran las bandas en las que se pueden clasificar el espectro de RF.

A partir de 1 GHz las bandas entran dentro del espectro de las microondas. Por encima de 300 GHz la absorción de la radiación electromagnética por la atmósfera terrestre es tan alta que la atmósfera se vuelve opaca a ella, hasta que, en los denominados rangos de frecuencia infrarrojos y ópticos, vuelve de nuevo a ser transparente.

Nombre	Abreviatura inglesa	Banda ITU	Frecuencias	Longitud de onda
			Inferior a 3 Hz	> 100.000 km
Extremely low frequency	ELF	1	3-30 Hz	100.000 km – 10.000 km
Super low frequency	SLF	2	30-300 Hz	10.000 km – 1000 km
Ultra low frequency	ULF	3	300–3000 Hz	1000 km – 100 km
Very low frequency	VLF	4	3–30 kHz	100 km – 10 km
Low frequency	LF	5	30–300 kHz	10 km – 1 km
Medium frequency	MF	6	300–3000 kHz	1 km – 100 m
High frequency	HF	7	3–30 MHz	100 m – 10 m
Very high frequency	VHF	8	30–300 MHz	10 m – 1 m
Ultra high frequency	UHF	9	300–3000 MHz	1 m – 100 mm
Super high frequency	SHF	10	3-30 GHz	100 mm – 10 mm
Extremely high frequency	EHF	11	30-300 GHz	10 mm – 1 mm
			Por encima de los 300 GHz	< 1 mm

**Tabla 1: División del espectro de RF**

Las bandas ELF, SLF, ULF y VLF comparten el espectro de la AF (audiofrecuencia), que se encuentra entre 20 y 20000 Hz aproximadamente. Sin embargo, éstas se tratan de ondas de presión, como el sonido, por lo que se desplazan a una velocidad de 343 m/s sobre un medio material. Mientras que las ondas de Radiofrecuencia, al ser ondas electromagnéticas, se desplazan a la velocidad de la luz, 300.000 Km/s sin necesidad de un medio material.

## **2.1. Tipos de Comunicaciones inalámbricas por RF**

Las transmisiones de datos entre equipos electrónicos sin cables, se están aplicando cada vez más debido a los medios tecnológicos actuales, que son los circuitos integrados, los cuales permiten realizar diseños muy innovadores sin disponer de costosa instrumentación para RF, añadiendo todas las ventajas de una comunicación inalámbrica.

Hablando en términos de aplicaciones industriales, primero se usaron módulos de RF con componentes discretos unidireccionales, precisamente para no tener que depender de un diseño en RF sin tener experiencia. Posteriormente con la aparición de circuitos transmisores, completamente integrados, con las funciones de emisor y

receptor en diferentes bandas de frecuencia que se fueron estandarizando por zonas (Europa, EEUU y Japón), han permitido su uso en campos tan diversos como aplicaciones industriales, comerciales, y médicas, como por ejemplo: sistemas de control remoto, transmisión de datos procedentes de sensores o sistemas de adquisición de datos, en equipos de monitorización médica, etc.

Las comunicaciones inalámbricas por RF se pueden clasificar según el cumplimiento o no de un protocolo estándar o de un protocolo propietario, y por otro lado según las frecuencias de trabajo (las actualmente llamadas <1GHz, y las de 2.4GHz). Las <1GHz van desde 300 a 900MHz (según las normativas en cada zona) y las de 2.4GHz que están normalizadas en todo el mundo, que a la vez definen velocidad de transmisión o ancho de banda y campo de aplicación.

Las principales consideraciones sobre las comunicaciones RF de corto alcance son el coste, el alcance, el consumo, y el protocolo que se implementa. Estos aspectos siempre están relacionados, ya que hay una serie de parámetros que influyen en todos ellos. Es conocido que el alcance depende de la frecuencia de trabajo de manera inversamente proporcional, es decir, a mayor frecuencia menor alcance. El alcance depende de la potencia de salida, pero también de la sensibilidad de recepción. La potencia de salida y la sensibilidad del receptor dependen también del tipo de antena (externa, cerámica o de circuito impreso) y de sus características. Y finalmente depende del entorno y medio de transmisión, es decir se logrará el mismo alcance al aire libre, en campo abierto o en una ciudad, dentro de una nave industrial o en un edificio, con paredes sencillas o con muros de cemento. Sería interesante conocer el alcance de los SoC que nos incumben, pero no es el objetivo de este proyecto.

En resumen, el rango de trabajo en RF depende de:

- Frecuencia
- Potencia de salida
- Sensibilidad de recepción
- Características de la antena
- Entorno de trabajo

## 2.2. Bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical)

Las bandas ISM fueron definidas por la ITU en el artículo 5 de las Regulaciones Radio (RR), concretamente puntos 5.138 y 5.150 [2]. Para sistemas de RF en comunicaciones digitales inalámbricas, son las que no necesitan licencia, siempre que no se pasen los límites de potencia, y son gratuitas en cuanto a la necesidad de usar protocolos normalizados. Esto implica que este tipo de comunicaciones tenga cierta tolerancia frente a errores y que utilicen mecanismos de protección contra interferencias, como técnicas de espectro ensanchado.

Las bandas ISM se reservaron para equipamiento que se relacione con procesos industriales y/o científicos o aplicaciones médicas, sin embargo, muchos elementos cotidianos trabajan en esa banda, como los dispositivos bluetooth, el mando de las videoconsolas, y la totalidad de las tecnologías WLAN y WPAN comerciales se utilizan en dichas bandas.

Sin embargo hay ligeras diferencias en la legislación de algunos países, debido a que la ITU realiza labores de normalización en tres regiones diferentes, lo que da lugar a diversos problemas a la hora de emplear una tecnología en algunos territorios.

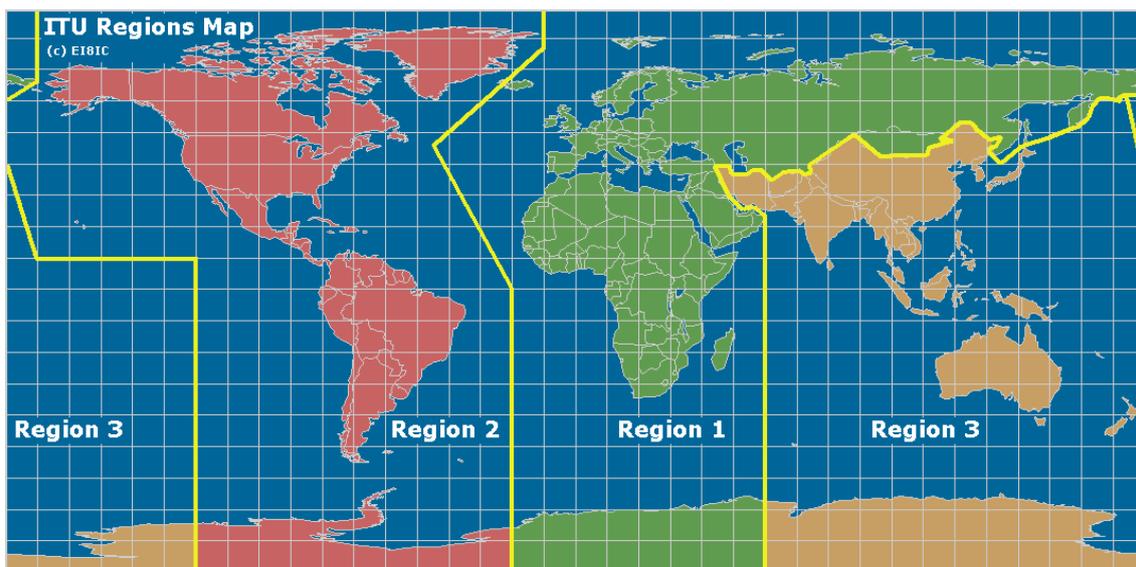


Figura 2.1: Regiones de normalización del ITU

Las frecuencias de trabajo estandarizadas por debajo de 1GHz son: 315 MHz en USA (potencia máxima +30 dBm), 433 MHz (+10 dBm) y 868 MHz (+14 dBm) en Europa en AM o FM.

Regulaciones en las bandas ISM <1GHz en el mundo:

**USA/Canada:**

260 – 470 MHz (FCC Part 15.231; 15.205)

902 – 928 MHz (FCC Part 15.247; 15.249)

**Europa:**

433.050 – 434.790 MHz (ETSI EN 300 220)

863.0 – 870.0 MHz (ETSI EN 300 220)

**Japón:**

315 MHz (Aplicaciones de muy baja potencia)

426-430, 449, 469 MHz (ARIB STD-T67)

La banda de frecuencias a 2.4GHz está normalizada en casi todo el mundo con algunas diferencias, con respecto a la potencia máxima de salida en USA es de 1W y en Europa es de 100mW y para 802.15.4/Zigbee es de 10mW (0dBm)

**USA/Canada:**

2400 – 2483.5 MHz (FCC Part 15.247; 15.249)

**Europa:**

2400 – 2483.5 MHz (ETSI EN 300 440 or ETSI EN 300 328)

**Japón:**

2400 – 2483.5 MHz (ARIB STD-T66)

2471 – 2497 MHz (ARIB RCR STD-33)

En la Tabla 2 se muestra la subdivisión de las bandas ISM inferiores a 1 GHz en Europa, destacando el propósito de aplicación, el espacio entre canales y la potencia máxima permitida y el ciclo de servicio. El ciclo de servicio es el tiempo de actividad de la radio, campo fundamental para dispositivos que buscan un consumo muy reducido de energía. En las redes con balizas (beacon) los nodos sólo necesitan estar despiertos mientras se transmiten las balizas y cuando se les asigna tiempo para transmitir. Si no

hay balizas, el consumo es asimétrico, repartido en dispositivos permanentemente activos y otros que sólo no están esporádicamente.

Rango de Frecuencia (MHz)	Aplicación	Potencia de Salida	Espacio entre canales	Ciclo de Servicio del 0,1%	Ciclo de Servicio del 1%	Ciclo de Servicio del 10%	Ciclo de Servicio hasta 100%
433.05 - 434.79	Propósito general	10 mW					
868.00 - 868.60	Propósito general	25 mW			Si		
868.60 - 868.70	Dispositivos de alarma	10 mW	25 kHz	Si			
868.70 - 869.20	Propósito general	25 mW		Si			
869.20 - 869.25	Dispositivos de alarma social	10 mW	25 kHz	Si			
869.25 - 869.30	Dispositivos de alarma	10 mW	25 kHz	Si			
869.30 - 869.40	Protocolo EACM	Sin definir	25 kHz				
869.40 - 869.65	Propósito general	500 mW	25 kHz			Si	
869.65 - 869.70	Dispositivos de alarma	25 mW	25 kHz			Si	
869.70 - 870.00	Propósito general	5 mW					Si

Tabla 2: Bandas ISM inferiores a 1GHz en Europa

### 2.3. Tipos de Modulaciones Digitales

Por razones de calidad, eficacia y comportamiento espectral, la elección del sistema de modulación debe inclinarse hacia alguna variante de la modulación de fase o de frecuencia con fase continua, en la que el espectro de modulación no sea excesivamente amplio. Las formas básicas de modulación digital son ASK, OOK, FSK, PSK. A continuación se describen brevemente las características más interesantes de cada una.

#### 2.3.1. Modulación por variación de Amplitud (ASK – OOK)

Las ventajas de la modulación por variación de amplitud ASK (Amplitude Shift Keying) son el sencillo diseño lo que tiene implícito un menor coste y el bajo consumo.

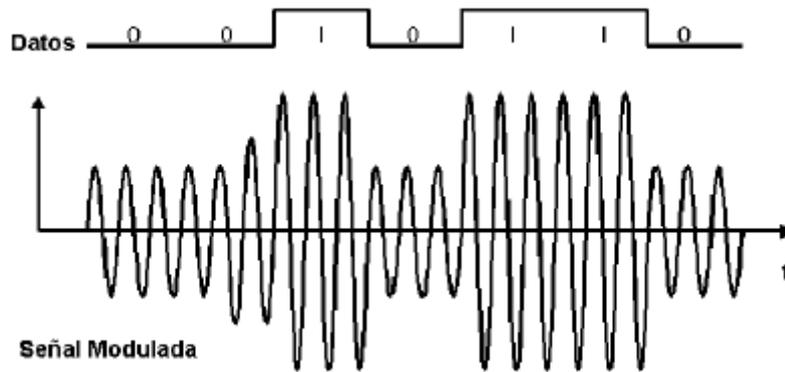


Figura 2.2: Modulación ASK

Especialmente si se utiliza el método de modulación On/Off OOK (On/Off Keying), donde un 0 digital no hay potencia de salida y un 1 digital se entrega toda la señal portadora, se reduce considerablemente el consumo. La desventaja es la fragilidad en presencia de interferencias por ruido eléctrico, que pueden provocar errores en los datos recibidos, así como pérdidas de sincronismo

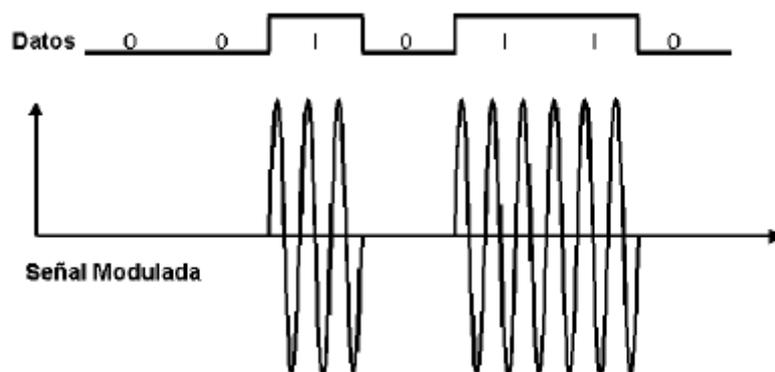


Figura 2.3: Modulación OOK

### 2.3.2. Modulación por desplazamiento de Frecuencia (FSK)

La modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK – Frequency Shift Keying), con un 0 digital se transmite una portadora a una frecuencia y con un 1 digital se transmite la portadora a otra frecuencia distinta, con la misma amplitud. La ventaja de este tipo de modulación es la mejor robustez ante la presencia de interferencias. La desventaja es la complejidad del sistema (mayor coste) y el consumo que permanece siempre presente durante la transmisión.

Se utiliza principalmente en los módems de baja velocidad. Se emplea separando el ancho de banda total en dos bandas, los módems pueden transmitir y recibir datos por el mismo canal simultáneamente.

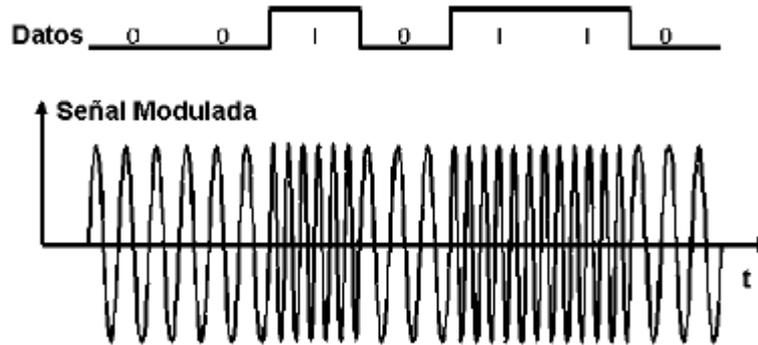


Figura 2.4: Modulación FSK

Este tipo de modulación consiste en asignar una frecuencia diferente a cada estado significativo de la señal de datos. Para ello existen dos tipos de modulación FSK:

- FSK Coherente: La característica que define esta modulación es que en el instante de asignar la frecuencia se mantiene la fase de la señal.
- FSK No Coherente: Aquí la fase no se mantiene en el momento de asignar la frecuencia. La razón de utilizar una modulación FSK no coherente tiene sentido cuando se emplean osciladores independientes para la generación de las distintas frecuencias. La modulación FSK se emplea en los módem en forma general hasta velocidades de 2400 baudios. Sobre velocidades mayores se emplea la modulación PSK.

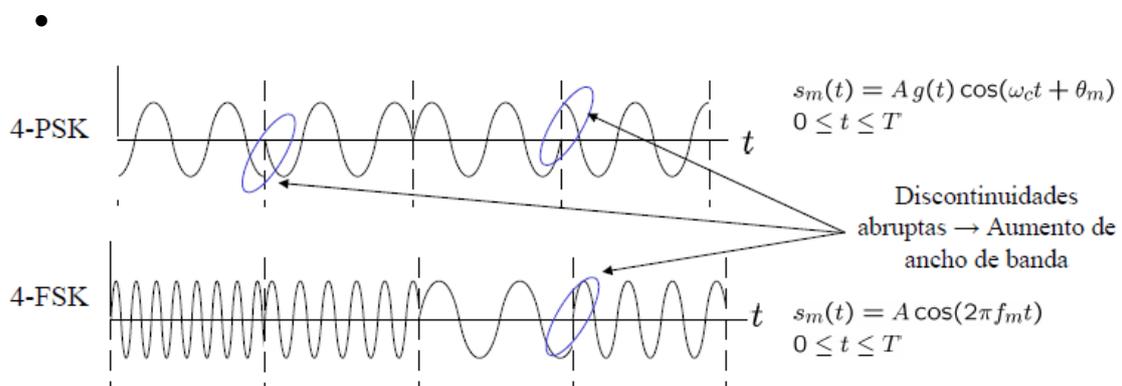


Figura 2.5: Modulaciones sin memoria

### 2.3.3. Modulación por desplazamiento de Frecuencia con Fase Continua (CPFSK)

Las señales que se han descrito hasta ahora son sin memoria, la fase no tiene porque ser continua como se aprecia en la Figura 5 y la posible conmutación de frecuencias entre intervalos adyacentes origina, en general, grandes lóbulos del espectro densidad de potencia, lo que se traduce en un requerimiento de mayor ancho de banda del previsto inicialmente. En la Figura 6 se se puede ver la diferencia entre los espectros de una FSK y una modulación CPFSK binaria. Este aumento del ancho de banda es lo que se quiere evitar. Para lo cual, se recurre a la utilización de señales moduladas en frecuencia, con la restricción de poseer una fase continua. Las así llamadas señales CPFSK. Este tipo de señales tienen memoria, puesto que se exige una continuidad en la fase de los intervalos adyacentes. En las modulaciones con memoria, la asignación de un símbolo a una señal depende del símbolo actual y de los anteriores. El transmisor y el receptor serán más complejos, pero la ventaja es que se reduce el ancho de banda que se va a transmitir por el canal.

En orden a representar las señales CPFSK, se comienza construyendo la señal digital:

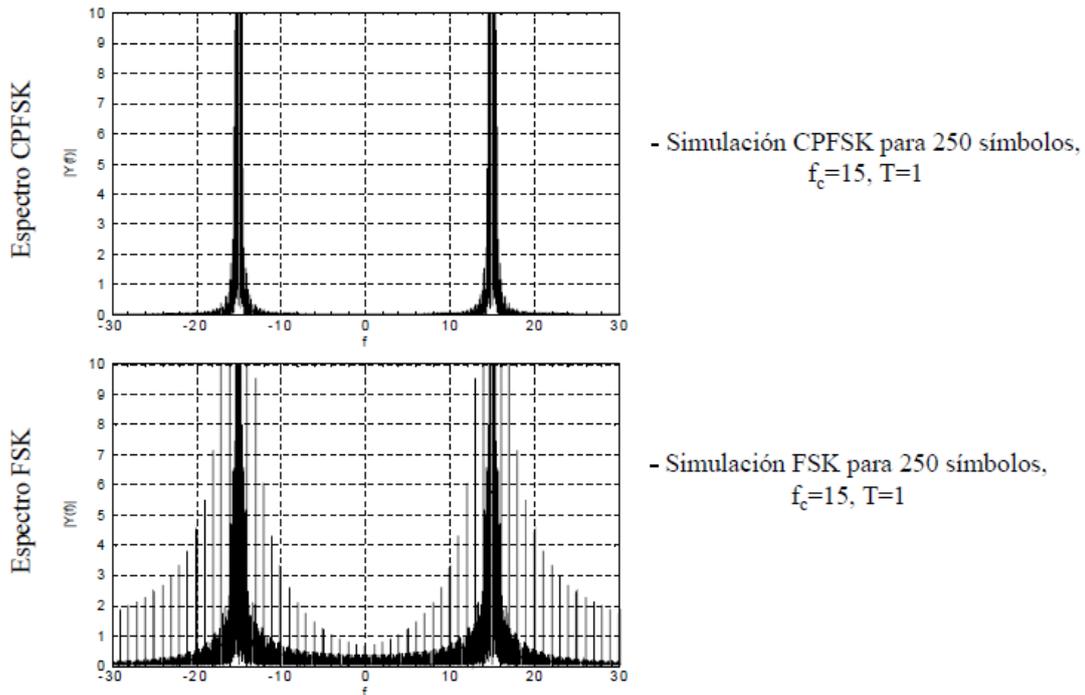
$$d(t) = \sum_k I_k \cdot g(t - kT) \quad (2.1)$$

dónde el proceso aleatorio discreto  $\{I_k\}$  se obtiene a través del mapeo correspondiente de los M símbolos que deseamos transmitir y toma los valores  $\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)$  .y  $g(t)$  es un pulso de duración finita, que vale 0 para  $t < 0$ . Definimos una fase instantánea en la forma:

$$\phi(t; I) = 2T\omega_d \int_{-\infty}^t d(\tau) \delta\tau \quad (2.2)$$

Observemos que, aunque  $d(t)$  es una función discontinua, la fase instantánea es una función continua en  $t$ , puesto que es derivable.  $\omega_d$  es la desviación de frecuencia de pico, y la señal anterior se utiliza para definir la señal modulada:

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_c t + \phi(t; I) + \phi_o] \quad (2.3)$$



**Figura 2.6: Comparación de los espectros FSK y CPFSK**

Es decir, una señal FSK, que utiliza la frecuencia:

$$\omega_i = \omega_c + \omega_d I_n = \omega_c + \frac{\pi h}{T} I_n \quad (2.4)$$

para transmitir el símbolo representado por  $I_n$ . Se observa que si el índice de modulación toma el valor  $1/2$  ( $\omega_d = \frac{\pi}{2T}$ ), la señal FSK resultante es ortogonal. En efecto, en ese caso, atendiendo a la definición de  $I_n$ , la mínima separación entre las frecuencias utilizadas vendría dada por  $\frac{\pi}{T}$ , lo que corresponde a un esquema FSK ortogonal.

### 2.3.4. Modulación por desplazamiento mínimo de fase (MSK)

Un caso particular de señales CPFSK es especialmente interesante, el representado por una señal CPFSK, binaria con un índice de modulación igual a  $1/2$ . En ese caso, como hemos dicho anteriormente con la modulación CPFSK, nos encontramos con un esquema de modulación ortogonal binario.

Presenta las siguientes ventajas:

1. Generación mediante modulación de secuencia directa.

2. Característica de fase continua.
3. Envolvente constante.
4. Anchura de banda reducida.
5. Posibilidad de aplicación de varios métodos de detección: Coherente, por Discriminador y Diferencial.

La expresión de la portadora modulada en frecuencia por  $x(t)$  es:

$$y(t) = A \cdot \cos\left[2\pi f_o t + 2\pi \Delta f_c \int_{-\infty}^t x(u) \delta u\right] \quad (2.5)$$

Si se denomina T al periodo de bit, el índice de modulación es:

$$m = \frac{\Delta f_c}{(1/2T)} \quad (2.6)$$

Como ya se ha dicho en MSK,  $m=0,5$ , luego  $\Delta f_c = 1/4T$  y los bits sucesivos producen al final del intervalo saltos de fase iguales a  $\pm\pi/2$ . Como ejemplo se puede mostrar la Figura 7 la trayectoria de fase para cualquier señal moduladora.

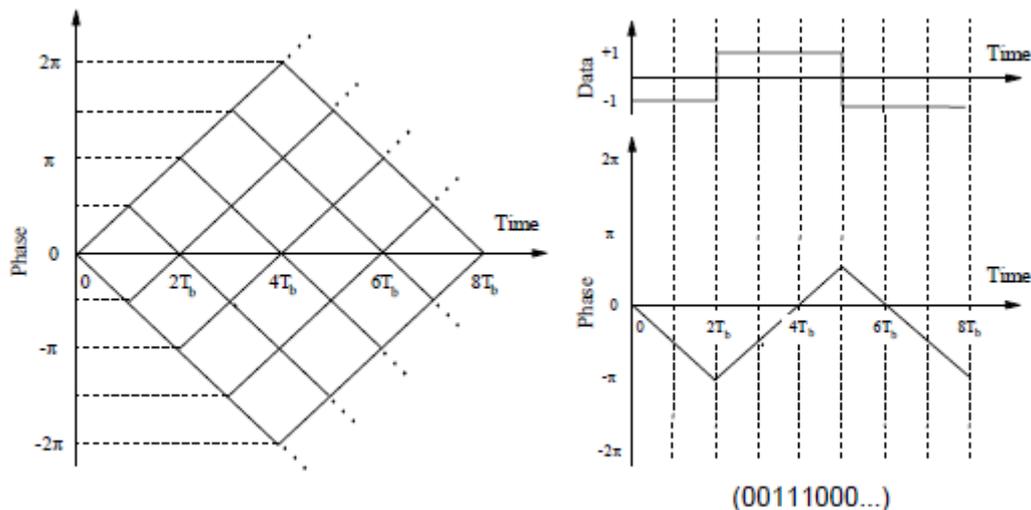


Figura 2.7: Transiciones de fase MSK

Desarrollando (2.5) puede ponerse:

$$y(t) = I(t) \cdot \cos \omega_o t - Q(t) \cdot \text{sen} \omega_o t \quad (2.7)$$

por lo que la señal MSK puede generarse mediante un modulador de cuadratura en el que las señales moduladoras en los ejes I y Q son sinusoides de periodo  $4T$ . En la Figura ZZ se representa la densidad espectral de potencia de la señal MSK en función de la frecuencia normalizada  $(f - f_o)T$ . En la figura se observa que el espectro es bastante ancho, con lóbulos laterales de gran intensidad. Ello se debe a las transiciones relativamente bruscas que experimenta la fase de la señal modulada, si el dispositivo que se quiere diseñar fuese móvil, la modulación no sería aplicable, ya que para estos se exige que la radiación en las bandas adyacentes sea muy reducida, con el fin de aprovechar la canalización disponible. Por este motivo en sistemas móviles se emplea la modulación GMSK [23].

Estas características hacen de la MSK un candidato idóneo para las comunicaciones digitales del dispositivo que nos ocupa. No se ha pretendido dar una visión en profundidad de los aspectos más teóricos, sino destacar los aspectos más relevantes. Se puede encontrar un análisis más exhaustivo en [24].

### 2.3.5. Modulación por desplazamiento de Fase (PSK)

En la modulación por desplazamiento de fase (PSK - Phase Shift Keying), se codifican los valores binarios como cambios de fase de la señal portadora.

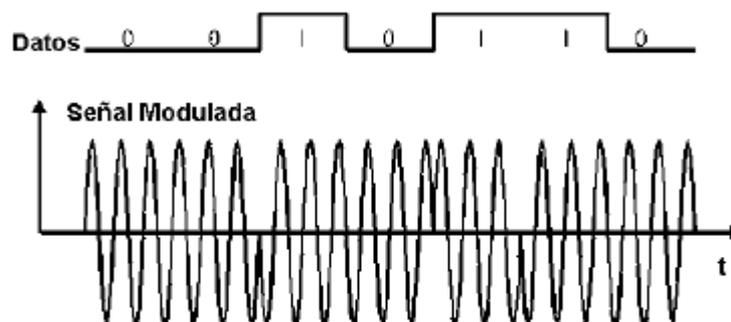


Figura 2.8: Modulación PSK

Dentro del contexto PSK se distinguen dos tipos de modulación de fase:

- Modulación PSK. La modulación PSK consiste en cada estado de modulación está dado por la fase que lleva la señal respecto de la original.
- Modulación Diferencial de Fase DPSK (Diferencial PSK) cada estado de modulación es codificada por un salto respecto a la fase que tenía la señal

anterior. Empleando este sistema se garantizan las transiciones o cambios de fase en cada bit, lo que facilita la sincronización del reloj en recepción.

### **2.3.6. Modulación por desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK)**

La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK - Quadrature PSK), consiste en que el tren de datos a transmitir se divida en pares de bits consecutivos llamados Dibits, codificando cada bit como un cambio de fase con respecto al elemento de señal anterior.

### **2.3.7. Modulación por desplazamiento de Fase Múltiple (MPSK)**

La modulación por desplazamiento de fase múltiple (MPSK – Multiple PSK), en este caso el tren de datos se divide en grupos de tres bits, llamados tribits, codificando cada salto de fase con relación a la fase del tribit que le precede.

La necesidad de transmisión de datos a velocidades cada vez más altas a hecho necesario implementar otro tipo de moduladores más avanzados como es la Modulación en Cuadratura. Este tipo de modulación presenta 3 posibilidades:

### **2.3.8. Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)**

La modulación de amplitud en Cuadratura (QAM – Quadrature Amplitude Modulation), en este caso ambas portadoras están moduladas en amplitud y el flujo de datos, divididos en grupos de 4 bits, y a su vez en subgrupos de 2 bits, codificando cada dibits en 4 estados de amplitud en cada una de las portadoras.

Consiste en una combinación de PSK y ASK, es decir, se van a combinar las variaciones de amplitud en referencia al momento de fase en que ocurren con lo cual vamos a poder incluir más bits en los mismos ciclos.

### 2.3.9. Modulación de Fase en Cuadratura (QPM)

En este tipo de modulación de fase en cuadratura (QPM – Quadrature Phase Modulation), las portadoras tienen 2 valores de amplitud. El flujo de datos se divide igual que en el caso anterior en grupos de 4 bits y a su vez en subgrupos de 2 bits, modulando cada dibit en 4 estados de fase diferencial en cada una de las portadoras.

Esta modulación de fase y amplitud en cuadratura (QAPM – Quadrature Amplitude Phase Modulation), también conocida como AMPSK o QAMPSK debido a que es una combinación de los dos sistemas de amplitud y fase. El esquema típico en este caso consiste en agrupar la señal en grupos de 4 bits considerando 2 dibits, el primer dibit modula la portadora I en amplitud y fase mientras que el otro realiza lo mismo con la portadora Q.

### 2.3.10. Modulación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM)

La modulación por división de frecuencia ortogonal (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing), también conocida como 'Modulación por multitono discreto' (DMT), trabaja dividiendo el espectro disponible en múltiples subportadoras.

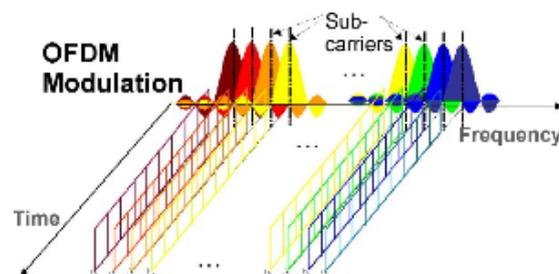


Figura 2.9: Modulación OFDM

En resumen, la modulación que se ha utilizado en el proyecto es MSK, ya que aunque el CC2510 y el CC1110 permiten utilizar otras modulaciones como 2-FSK GFSK y ASK (esta última sólo el CC1110), la modulación MSK tiene las ventajas de poseer una alta inmunidad al ruido, característica de fase continua, generación mediante modulación de frecuencia directa y un espectro estrecho, pero el inconveniente de una implementación compleja tanto el modulador como el demodulador. Como se han

realizado todas las pruebas de manera satisfactoria con esta modulación y los SoC la implementan sin problemas se ha optado por esta modulación frente a las demás. No resultaría complicado cambiar los registros necesarios para utilizar cualquier otra. En caso de que fuese necesario, mediante los valores hexadecimales proporcionados por el SmartRF Studio, software que se analizará en el Capítulo 4, mediante el cual se puede conocer como modificar el código que se carga en los SoC.

## 2.4. Tipos de tecnologías empleadas en radiofrecuencia

En radiofrecuencia se emplean dos tipos de tecnologías, la banda estrecha y la banda ancha que aprovecha todo el ancho de banda disponible, en lugar de utilizar una portadora para concentrar toda la energía a su alrededor.

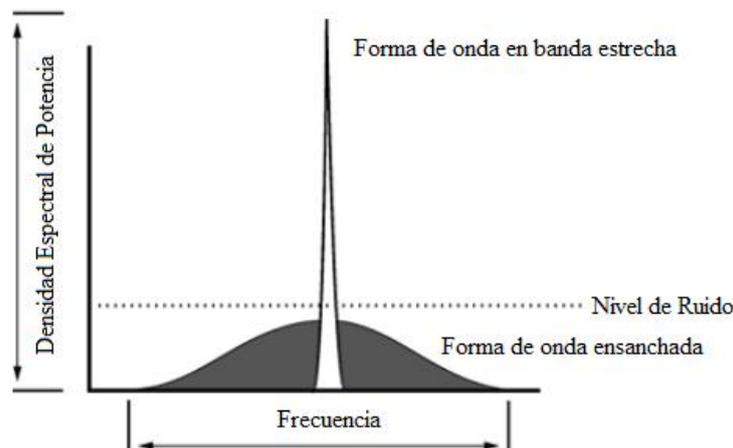


Figura 2.10: Técnica Espectro Ensanchado

### 2.4.1. Espectro Ensanchado

El espectro ensanchado (también llamado espectro expandido, espectro disperso, spread spectrum o SS) es una técnica de modulación empleada en telecomunicaciones para la transmisión de datos, por lo común digitales y por radiofrecuencia.

El fundamento básico es el "ensanchamiento" de la señal a transmitir a lo largo de una banda muy ancha de frecuencias, mucho más amplia, que el ancho de banda mínimo requerido para transmitir la información que se quiere enviar. No se puede decir que las comunicaciones mediante espectro ensanchado son medios eficientes de utilización del ancho de banda. Sin embargo, rinden al máximo cuando interactúan con

sistemas existentes que hacen uso de la frecuencia como es el caso que nos ocupa. La señal de espectro ensanchado, una vez ensanchada puede coexistir con señales en banda estrecha, ya que sólo les aportan un pequeño incremento en el ruido. En lo que se refiere al receptor de espectro ensanchado, él no ve las señales de banda estrecha, ya que está escuchando un ancho de banda mucho más amplio gracias a una secuencia de código preestablecido.

Las técnicas de modulación de espectro ensanchado permiten cumplir objetivos como:

- Protección frente a interferencia.
- Reduce la probabilidad de interceptación.
- Compatibilidad con emisiones propias y ajenas.
- Confidencialidad de las comunicaciones.

Cuando a una señal se la expande sobre varios megahercios del espectro, su potencia espectral también se ensancha. Esto hace que la potencia transmitida también se ensanche sobre un extenso ancho de banda y dificulta la detección de forma normal (es decir, sin la utilización de ninguna secuencia pseudoaleatoria). Este hecho también implica una reducción de las interferencias. De esta forma, el espectro ensanchado puede sobrevivir en un medio adverso y coexistir con otros servicios en la misma banda de frecuencia. La propiedad anti-jamming, estable a interferencias, es un resultado del gran ancho de banda usado para transmitir la señal.

Si recordamos el teorema de Shannon, se obtiene la capacidad del canal:

$$R_{\max} = BW \times [1 + (C / N)] \quad (2.8)$$

Se observa que la capacidad del canal es proporcional a su ancho de banda y a la relación señal-ruido del canal. De la ecuación anterior se deduce que al expandir el ancho de banda en varios megahercios hay más del ancho de banda suficiente para transportar la tasa de datos requerida, permitiendo contrarrestar los efectos del ruido.

A continuación, se presentan cinco técnicas de espectro ensanchado:

### **Sistemas de secuencia directa, DS**

La secuencia directa es quizás uno de los sistemas de espectro ensanchado más ampliamente conocido, utilizado y relativamente sencillo de implementar. Una portadora en banda estrecha se modula mediante una secuencia pseudoaleatoria (es decir, una señal periódica que parece ruido pero que no lo es). Para la secuencia directa, el incremento de ensanchado depende de la tasa de bits de la secuencia pseudoaleatoria por bit de información. En el receptor, la información se recupera al multiplicar la señal con una réplica generada localmente de la secuencia de código.

### **Sistemas de salto temporal, TH**

Un sistema de salto temporal es un sistema de espectro ensanchado en el que el periodo y el ciclo de trabajo de una portadora se varían de forma pseudoaleatoria bajo el control de una secuencia pseudoaleatoria. El salto temporal se usa a menudo junto con el salto en frecuencia para formar un sistema híbrido de espectro ensanchado mediante acceso múltiple por división de tiempo (TDMA).

### **Sistemas de salto de frecuencia, FH**

En los sistemas de salto de frecuencia, la frecuencia portadora del transmisor cambia (o salta) abruptamente de acuerdo con una secuencia pseudoaleatoria. El orden de las frecuencias seleccionadas por el transmisor viene dictado por la secuencia de código. El receptor rastrea estos cambios y produce una señal de frecuencia intermedia constante. Como se observa en la Figura 2.11, cada tramo de información se va transmitiendo en una frecuencia distinta durante un intervalo muy corto de tiempo.

El orden en los saltos en frecuencia se determina según una secuencia pseudoaleatoria almacenada en unas tablas, y que tanto el emisor y el receptor deben conocer. Si se mantiene la sincronización en los saltos de frecuencias se consigue que, aunque en el tiempo se cambie de canal físico, a nivel lógico se mantiene un solo canal por el que se realiza la comunicación.

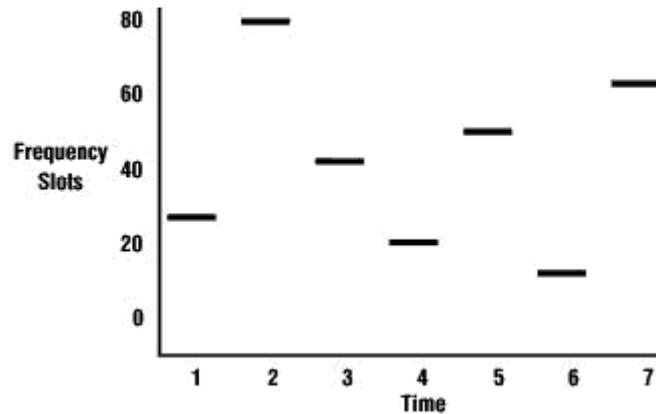


Figura 2.11: FHSS

Esta será la técnica de espectro ensanchado que se utilizará en la etapa de radiofrecuencia, utilizando para ello 4 canales separados convenientemente. En el próximo capítulo se describe como se ha utilizado esta técnica en el proyecto que nos ocupa.

### **Sistemas de frecuencia modulada pulsada (o Chirping)**

Se trata de una técnica de modulación en espectro ensanchado menos común que las anteriores, en la que se emplea un pulso que barre todas las frecuencias, llamado chirp, para expandir la señal espectral. El chirping, como también es conocido, suele usarse más en aplicaciones con radares que en la comunicación de datos.

### **Sistemas híbridos**

Los sistemas híbridos usan una combinación de métodos de espectro ensanchado para beneficiarse de las propiedades más ventajosas de los sistemas utilizados. Dos combinaciones comunes son secuencia directa y salto de frecuencia. La ventaja de combinar estos dos métodos está en que se adoptan las características que no están disponibles en cada método por separado.

## **2.5. Indicador de la potencia de señal recibida (RSSI)**

RSSI (Receive Signal Strength Indication) es una medida de la potencia presente en un receptor. Es una tecnología genérica de medida en el receptor de radio, que por lo general es invisible al usuario del dispositivo que contiene el receptor, pero es

fácilmente accesible a los desarrolladores de redes inalámbricas de protocolo IEEE 802.11.

RSSI a menudo se da en la etapa de frecuencia intermedia (IF), antes del amplificador de IF. En los sistemas de IF cero, se da en la cadena de señal de banda base, antes del amplificador de banda base. La salida RSSI es a menudo un nivel analógico de corriente continua. También puede ser muestreado por el ADC interno y los códigos resultantes disponibles directamente o por medio del periférico o el bus interno del procesador.

### **2.5.1. RSSI en implementaciones 802.11**

En un sistema IEEE 802.11, es la potencia de señal recibida en un ambiente inalámbrico, en unidades arbitrarias. RSSI puede ser usado internamente en un equipo de radio dentro de una red, para determinar cuando la cantidad de energía de radio en el canal está por debajo de un cierto umbral. Una vez que este dispositivo está preparado para enviar información, puede ser enviada una trama de información. El usuario final probablemente observará un valor de RSSI midiendo la potencia de señal de una red inalámbrica a través de una herramienta de supervisión de la red inalámbrica.

### **2.6. *Indicador de la calidad de la señal recibida (LQI)***

LQI (Link Quality Indication) es una medida de la calidad de la señal recibida, da una estimación de la facilidad que presenta una señal a ser remodulada. Mide la acumulación de la magnitud del error entre constelaciones ideales y la señal recibida, sobre los 64 símbolos inmediatos después de la palabra de sincronización. LQI es la mejor medida relativa de la calidad de un enlace (un valor alto indica un mejor enlace), ya que el valor es dependiente del formato de la modulación.

El indicador RSSI no se ocupa de la “calidad” o la “corrección” de la señal. El indicador LQI no se ocupa de la potencia real de señal, pero la calidad de señal a menudo está unida a la potencia de la señal. Esto es porque una señal potente

probablemente esté menos afectada por el ruido, aunque como se ha descrito previamente, esto depende de muchos factores.

Para simplificar: Si la modulación recibida es FSK o GFSK, el receptor medirá la frecuencia de cada bit y lo comparará con la frecuencia esperada, basada en la frecuencia del canal, la desviación y la compensación de la frecuencia medida. Si se usan otras modulaciones, el error del parámetro modulado (la frecuencia para FSK/GFSK, fase para MSK, la amplitud para ASK, etc.) será medido contra el valor ideal esperado.

Hay cinco “casos extremos” que pueden ser usados para ilustrar como trabajan los indicadores RSSI y LQI:

1. Una señal débil en presencia de ruido, puede dar un valor bajo de RSSI y de LQI.
2. Una señal débil en la ausencia total de ruido, puede dar un valor bajo de RSSI y un valor alto de LQI.
3. El ruido fuerte (por una interferencia), puede dar un valor alto de RSSI y un valor bajo de LQI.
4. Una señal fuerte sin mucho ruido, puede dar un valor alto de RSSI y de LQI.
5. Una señal muy fuerte, que puede saturar el receptor, pueden dar un valor alto de RSSI y bajo de LQI.

Tanto los indicadores RSSI como LQI son los mejores para ser usados como medidas relativas, ya que estos valores dependen del formato de modulación.

## **2.7. *Procesado Digital de Señales Analógicas***

### **2.7.1. Filtrado Previo para evitar el solapamiento**

Al procesar señales analógicas utilizando sistemas digitales, generalmente es deseable minimizar la frecuencia de muestreo. El motivo es que la cantidad de cálculo aritmético necesario para realizar el sistema es proporcional al número de muestras que

hay que procesar. Si la entrada no es de banda limitada o la frecuencia de Nyquist de la entrada es demasiado alta, puede ser necesario un filtrado previo. En el tratamiento de señales de voz sólo suele ser necesario conservar las frecuencias bajas (3-4KHz) para preservar la inteligibilidad, aun cuando la señal de voz puede tener un contenido en frecuencia significativo en la banda de 4KHz a 20KHz. Otras veces, aunque la señal ya sea de banda limitada, puede estar contaminada por ruido aditivo de banda ancha que puede ocupar la banda de frecuencias altas. Como resultado del proceso de muestreo, las componentes solapadas de ese ruido ocuparían las componentes de baja frecuencia. Si deseamos evitar el solapamiento, hay que forzar que la señal de entrada sea de banda limitada a las frecuencias por debajo de la mitad de la frecuencia de muestreo deseada. [20] Esto se puede realizar mediante un filtrado paso bajo de la señal en tiempo continuo previo a la conversión. En este contexto, el filtro paso bajo se denomina filtro antisolapamiento. Idealmente la respuesta en frecuencia de este filtro debería ser

$$H_{aa}(j\Omega) = \begin{cases} 1, & |\Omega| < \Omega_c < \pi/T \\ 0, & |\Omega| > \Omega_c \end{cases} \quad (2.9)$$

En la práctica, la respuesta en frecuencia  $H_{aa}(j\Omega)$  no puede ser limitada en banda, pero puede ser pequeña para  $|\Omega| > \pi/T$  rad/s, con lo que el solapamiento se minimiza.

## 2.8. Conversión Analógico-Digital (ADC)

Un conversor analógico-digital (ADC) es un dispositivo electrónico capaz de convertir una entrada analógica amplitud de tensión o corriente, en un valor binario que representa la amplitud cuantificada más cercana a la amplitud de entrada. La señal analógica, que varía de forma continua en el tiempo, se conecta a la entrada del dispositivo y se somete a un muestreo a una velocidad fija, obteniéndose así una señal digital a la salida del mismo, es decir, una secuencia de muestras de precisión finita o cuantificadas. Bajo el control de un reloj externo, el ADC puede iniciar y completar una conversión cada T segundos. Sin embargo, la conversión no es instantánea, por lo que sistemas de altas prestaciones incluyen además un sistema de retención.

En esta definición están patentes los cuatro procesos que intervienen en la conversión analógica-digital:

1. **Muestreo** (en inglés, *sampling*): consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de onda. La velocidad con que se toma esta muestra, es decir, el número de muestras por segundo, es lo que se conoce como frecuencia de muestreo.
2. **Retención** (en inglés, *hold*): las muestras tomadas han de ser retenidas por un circuito de retención (*hold*), el tiempo suficiente para permitir evaluar su nivel (cuantificación). Desde el punto de vista matemático este proceso no se contempla, ya que se trata de un recurso técnico debido a limitaciones prácticas, y carece, por tanto, de modelo matemático.
3. **Cuantificación**: en el proceso de cuantificación se mide el nivel de voltaje de cada una de las muestras. Consiste en asignar un margen de valor de una señal analizada a un único nivel de salida. Incluso en su versión ideal, añade, como resultado, una señal indeseada a la señal de entrada: el ruido de cuantificación.
4. **Codificación**: la codificación consiste en traducir los valores obtenidos durante la cuantificación al código binario. Hay que tener presente que el código binario es el más utilizado, pero también existen otros tipos de códigos que también son utilizados.

Durante el muestreo y la retención, la señal aún es analógica, puesto que aún puede tomar cualquier valor. No obstante, a partir de la cuantificación, cuando la señal ya toma valores finitos, la señal ya es digital.