

# Modulación QPSK no ideal en UTRA-TDD: Análisis de fase y potencia

Humberto Campanella\*, Antonio Morales\*\*, Ricardo Saad\*\*

---

## Resumen

*Este artículo analiza la modulación QPSK en UTRA-TDD; específicamente, la pérdida de ortogonalidad debida a imperfecciones en los circuitos desfasadores. Por lo tanto, se buscó caracterizar el desempeño de la modulación QPSK y relacionarlo con los requerimientos establecidos para esta interfaz. Para ello se estableció una representación a nivel de software y a partir de simulaciones se establecieron las conclusiones que se presentan. Se analizó la influencia de las desviaciones de fase de los circuitos del módem, tanto en el desempeño de BER como en la pérdida de señal recibida. Entre dichas conclusiones se encontró que las imperfecciones típicas en dispositivos comerciales no degradarían significativamente el rendimiento de la interfaz UTRA-TDD.*

**Palabras clave:** UMTS, UTRA-TDD, QPSK, desfasadores, transformadores Hilbert.

## Abstract

*This paper studies QPSK modulation when applied to UTRA-TDD, specifically the lack of orthogonality due to physical imperfection in the phase splitting circuits. Hence, it was looked forward to characterize the performance of QPSK modulation and to relate it with the requirements for UTRA. A software model simulated the transmission and reception of non-ideal QPSK modulated signals. It was analyzed the influence if the phase deviations in the modem circuits, in both the BER performance and the leakage of received power. It was found that the typical imperfections in commercial application devices do not degrade in a significant manner the performance of UTRA-TDD air interface.*

**Key words:** UMTS, UTRA-TDD, QPSK, phase splitters, Hilbert splitters.

---

Fecha de recepción: 5 de marzo del 2001

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, numerosos grupos de investigación trabajan en lo que se denomina la tercera generación de telecomunicaciones móviles. La universalización de los servicios, tanto en el plano de los aparatos como en la interrelación de proveedores, es el objetivo principal de esta tendencia global. El Grupo de Radiocomunicaciones y Señales de la Universidad del Norte se involucra en los procesos de definición de

---

\* Master en Sistemas y Redes de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid; Ingeniero Electrónico, Pontificia Universidad Javeriana. Coordinador Grupo de Radiocomunicaciones y Señales. [hcampane@uninorte.edu.co](mailto:hcampane@uninorte.edu.co)

\*\* Ingenieros Electrónicos, Universidad del Norte.

la tercera generación evaluando el desempeño del sistema UTRA-TDD a nivel de capa física en su enlace descendente [2].

En las especificaciones técnicas desarrolladas para la definición de las tecnologías de la tercera generación, se ha escogido la modulación QPSK en codificación absoluta como esquema para permitir la transmisión [5,6,7,8,9,10]. Sin embargo, pueden existir imperfecciones a nivel del modulador que degraden el desempeño del sistema. En relación con uno de estos problemas se realizó el estudio que se presenta a continuación [5,7].

En este artículo se presenta en primer lugar una breve explicación del esquema de modulación digital QPSK, el problema específico de la pérdida de circularidad, cómo se desarrolló el estudio y cuáles son sus conclusiones.

## 2. ESQUEMA DE MODULACIÓN DIGITAL QPSK

QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) es un esquema de modulación lineal digital donde la información transportada por la señal transmitida está contenida en la fase. La fase de la portadora toma uno de cuatro valores igualmente espaciados ( $0, \pi/2, \pi$  y  $3\pi/2$ ), cada uno corresponde a un único símbolo. La señal QPSK está definida por la expresión

$$s_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[ 2\pi f_c t + (i-1) \frac{\pi}{2} \right] \quad 0 \leq t \leq T \quad i = 1, 2, 3, 4$$

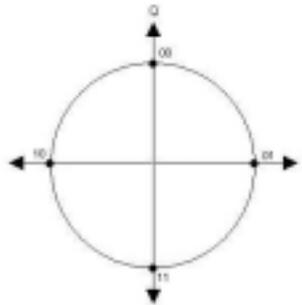
Donde E es la energía de símbolo, T es el tiempo del símbolo y es igual a dos veces el período de bit. La frecuencia  $f_c$  se toma como  $n_c / T$  para un entero  $n_c$ . Cada uno de los posibles valores de fase corresponde a una pareja de bits determinada llamada *dibit* [3].

Para el caso del sistema UTRA, se adoptó el mapeado para los *dibit* que se muestra en el cuadro 1:

**Cuadro 1**  
Relación entre *dibit* de información y la fase asignada [7]

Dibit de información	f
00	$\pi/2$
01	0
10	$-\pi$
11	$-\pi/2$

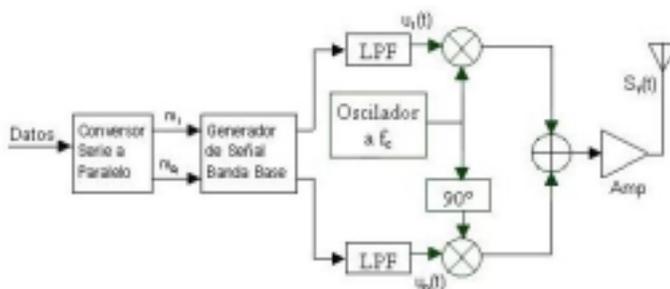
Según esta representación, una señal QPSK puede graficarse en un diagrama de constelación bidimensional con cuatro puntos, como se muestra. A partir de esta constelación se establece un diagrama de estado para la señal, como muestra la figura 1.



**Figura 1.** Diagrama de estado QPSK

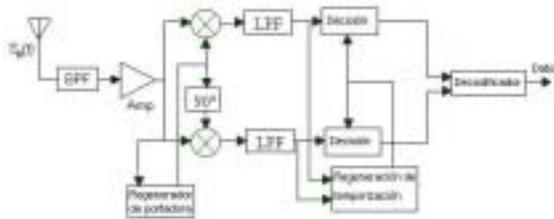
### 2.1. Proceso de modulación QPSK

La estructura típica de un transmisor QPSK se presenta en la figura 2. Inicialmente la cadena de mensaje binaria unipolar con tasa de bit  $R_b$  es convertida en una secuencia no retorno a cero (NRZ) bipolar. La cadena de bit  $m(t)$  se divide en dos secuencias,  $m_i(t)$  y  $m_q(t)$  (cadenas en cuadratura Q y en fase I), cada una con tasa de bit de  $R_b/2$ . En el generador de señal banda base se emplea una codificación de línea de tipo Gray (como la escogida para UTRA) o codificación diferencial.



**Figura 2.** Modulador QPSK

La señal codificada se somete a un filtrado pasa bajos con un filtro coseno alzado para evitar problemas de interferencia intersimbólica. Como resultado de este proceso se tiene la señal  $u(t)$ . En el modulador de cuadratura, una portadora con frecuencia  $f_c$  es modulada por  $u(t)$  para luego ser amplificada y transmitirse.



**Figura 3.** Receptor QPSK

La estructura de un receptor QPSK coherente se muestra en la figura 3. El filtro pasa banda en la entrada remueve el ruido de las bandas extrañas y la interferencia de canales adyacentes. La portadora es extraída de la señal resultante y usada para la demodulación. Los datos recibidos se someten a un filtrado pasa bajos para seguidamente usarse en la decisión del símbolo enviado. Finalmente, un decodificador toma el resultado del dispositivo de decisión y proporciona la cadena de datos recibidos [3].

### 3. PROBLEMÁTICA EN EL DESFASADOR

En la estructura del transmisor QPSK puede observarse en la etapa de RF cada una de las dos ramas de información modulando portadoras ortogonales. Para la generación de estas armónicas se usa un oscilador local ajustado a la frecuencia del sistema (en el caso de UTRA-TDD, 1.9 GHz), y un dispositivo desfasador realiza un corrimiento en fase de  $90^\circ$  a esta onda para producir la portadora de cuadratura.

El problema se presenta cuando el dispositivo desfasador no proporciona el corrimiento esperado. La consecuencia inmediata es el cambio en los niveles de potencia que se asignan a cada rama en la transmisión; esto representa aumento en las probabilidades de error en la detección. Sobre la constelación de señal se traduce en la pérdida de la circularidad entre los puntos de mensaje.

#### 3.1. Dispositivos desfasadores de $90^\circ$

Los desfasadores de 90 grados son filtros utilizados para desplazar la fase de la señal por 90 grados mientras aplican un aumento constante a la magnitud. Se utilizan comúnmente los filtros de Hilbert y los diferenciadores [4].

Estos últimos son los más comunes, se usan frecuentemente en sistemas de comunicaciones y procesamiento de señales, como por ejemplo, en la generación de señales moduladas en banda lateral única, procesamiento de señales de radar y de voz.

Por las características de su respuesta al impulso es imposible desarrollar un filtro de Hilbert ideal con el comportamiento de desfase deseado. Por consiguiente, suelen realizarse aproximaciones cuyo desempeño sea lo más cercano posible al filtro ideal.

Debido a esta aproximación y a las condiciones físicas propias de este dispositivo se presentan las anomalías que afectan el desempeño del modulador.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

Se desarrolló un modelo pasa bajos equivalente del sistema pasa banda, por lo cual no se realizó transmisión en RF. Esta concepción nos permitió aislar el problema de cualquier otra situación alienante en el sistema; así, en el momento de evaluar los efectos se aseguró la presencia sólo de las variables de interés.

Empleando el lenguaje de programación Builder C++ 4.0 se construyó una plataforma algorítmica que permitiera la simulación de todo el enlace descendente del sistema UTRA en modo TDD. La concepción fue de tipo modular, y existieron tres bloques principales: transmisor, canal de comunicaciones y receptor. Debido a la flexibilidad de los bloques fue posible el empleo de distintos algoritmos para una misma función. Esto facilitaba en el caso del transmisor, por ejemplo, el empleo de distintos modelos para la representación del problema.

Se realizó el planteamiento del proyecto definiendo como supuestos de trabajo la existencia de modelos de representación del problema, así como límites de tolerancia del sistema para el mismo. Sin embargo, hasta el momento no se ha encontrado un modelo determinístico o estadístico que simule la presencia del problema.

Por este motivo se realizó la caracterización del desempeño de un filtro de Hilbert funcionando como dispositivo desfaseador en el modulador. En el diseño de estos filtros se considera, entre otros parámetros, el número de coeficientes; un mayor número de coeficientes puede relativamente garantizar un mejor desempeño, de esta manera pueden conseguirse o no los 90 grados en el corrimiento.

Finalmente, se realizó un estudio sobre el desempeño del filtro de Hilbert, y con base en él se desarrolló el objetivo inicial de evaluar la modulación QPSK.

#### 5. CARACTERIZACIÓN DEL FILTRO DE HILBERT

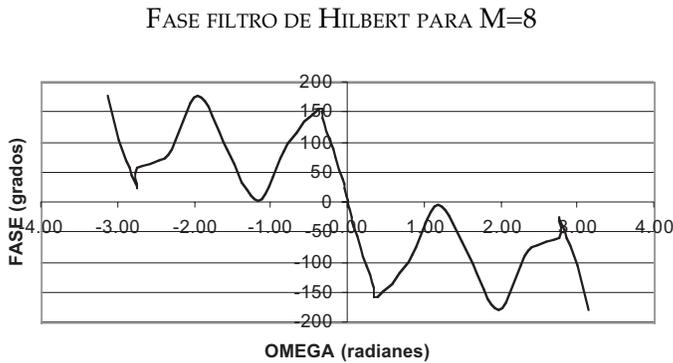
Para la desarrollo del filtro de Hilbert, se realizó un diseño a través del método de enventanado, usando una ventana Hamming. Esta posee una banda de transición

desde el lóbulo principal de  $8\pi/M$  y un valor pico de los lóbulos laterales de 43 decibelios [4].

La respuesta en fase de este diseño resultó en una recta de pendiente infinita en la zona de transición, por lo tanto inalcanzable. Sin embargo, puede aproximarse con un número considerable de coeficientes.

Por esto, se propuso en el trabajo caracterizar en fase el filtro propuesto para simular el error de fase. A continuación se presenta la respuesta en fase de este filtro para distintos valores de M (número de coeficientes).

En estas gráficas, el eje de las ordenadas corresponde a la fase que proporciona el filtro para una frecuencia relativa « $\Omega$ », que en la gráfica se ha escalado en radianes.



**Figura 5.** Respuesta en fase para M=8

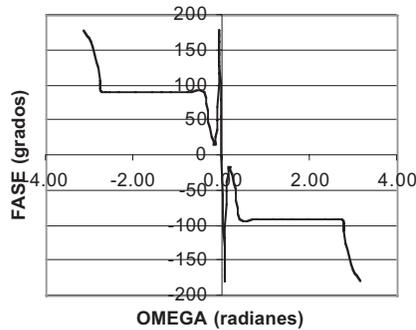
Puede observarse que el desempeño del filtro es muy pobre para M=8, debido a que el espectro de fase del filtro no mantiene  $90^\circ$  para un intervalo específico de frecuencias.

El mantener durante un intervalo los  $90^\circ$  asegurará que el desempeño del filtro es bueno por lo menos para esos valores de frecuencia. En el caso ideal en tiempo continuo, la respuesta de fase muestra  $90^\circ$  para toda frecuencia negativa y  $-90^\circ$  para frecuencias positivas. En el caso discreto, de nuestro interés, la respuesta de fase muestra  $90^\circ$  en el intervalo  $(-\pi, 0)$  y  $-90^\circ$  en el intervalo  $(0, \pi)$ ; esta respuesta es periódica, y se repite en períodos de  $2\pi$ .

Al evaluar el error en la frecuencia de Nyquist( $\pi, 3.141592$ ),  $f(3.141592)=89.6^\circ$ ; mientras una frecuencia relativa óptima se encuentra para  $W=1.5708$  rad, donde  $f=0$ . Es notorio que para un aumento o disminución pequeño en la frecuencia existe un

incremento en  $f$  elevado; por ejemplo, al evaluar en frecuencias relativas cercanas a la óptima se encuentra que son elevadas:  $f(1.9635 \text{ rad})=87.356^\circ$  y  $f(1.1781 \text{ rad})=87.3712^\circ$ .

#### FASE FILTRO DE HILBERT PARA $M=64$

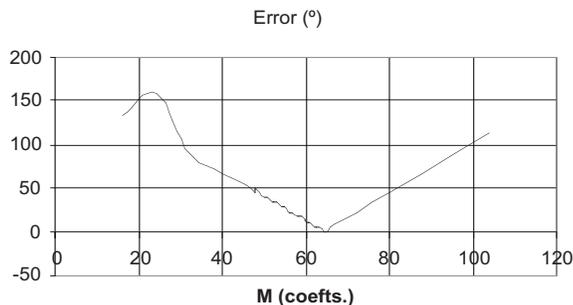


**Figura 6.** Respuesta en fase para  $M=64$

Para el caso  $M=64$ , el error absoluto en la frecuencia de Nyquits es  $f(\pi \text{ rad})=89.857^\circ$  y el error absoluto para cada límite del intervalo es  $f(0.3927 \text{ rad})=0.0288^\circ$  y  $f(2.7489 \text{ rad})=0.017^\circ$ . Es notoria la mejora en la respuesta en fase del filtro cuando aumenta el número de coeficientes empleados en el diseño.

#### 5.1. Variación del error en función del número de coeficientes

Para el estudio del desempeño de la modulación QPSK se buscaban errores específicos en el desfasador. Con el ánimo de producir tales errores se tomaron distintos números de coeficientes ubicados en una frecuencia dada. De esta forma se llegó a la grafica que muestra la figura 7:

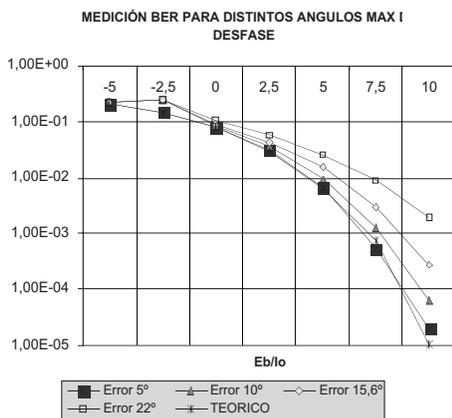


**Figura 7.** Error en función de  $M$

El comportamiento presentado por el filtro en estudio puede ser explicado analizando las respuestas en fase para la función resultante del diseño usando una ventana. Puede observarse que existe un número de coeficientes específico para el cual el error en el desfase es mínimo; en el caso particular de nuestro diseño, el número de coeficientes óptimo es 65.

## 6. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA MODULACIÓN QPSK EN UTRA-TDD

Empleando la caracterización del filtro de Hilbert e usaron distintos valores promedio de error de fase para medir el desempeño de la modulación ante la presencia del error de fase y el ruido blanco gaussiano. Las mediciones fueron realizadas para error en la fase promedio de 5, 10, 15.6, y 22°.



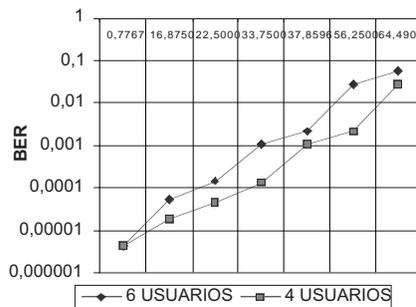
**Figura 8.** Medición BER para distintos errores de fase

Dichas mediciones se realizaron estableciendo niveles de potencia de ruido y de energía de bit de forma que permitieran realizar la medición para determinado punto.

Bajo esta consideración, se encontró que el desempeño de QPSK se degrada conforme aumenta la magnitud del error debido al problema del desfasador. En la figura 8 puede observarse que para el valor de 7.5 dB de relación energía de bit a ruido, magnitudes menores a 10° del error podrían usarse en la transmisión de voz, esto es, para BER menor que 10<sup>-3</sup>. QPSK brinda un rendimiento aceptable cuando se transmite sobre un canal AWGN con un error en la cuadratura no mayor a 10° (grados).

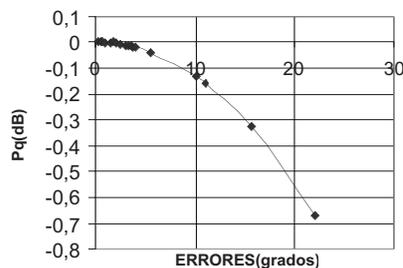
Dada esta información, se puede admitir que el diseño del filtro desfasador en el modulador determina en grado sumo el desempeño de QPSK en el sistema. Para el caso de UTRA-TDD deben realizarse consideraciones respecto a la permanencia de la frecuencia de la portadora en zonas de alta eficiencia del filtro, cuidando de imperfecciones que puedan degradar la calidad del servicio.

En la figura 9 se muestra la relación de tasa de bits errados (BER) versus el error en la cuadratura para 4 y 6 usuarios. Se puede apreciar en dicha figura que existe un aumento consistente del BER a medida que aumenta el error en la fase.



**Figura 9.** BER vs. Error de fase para 4 usuarios

Por otro lado, la potencia de la rama afectada decae frente al error de fase. En el modulador QPSK, la portadora es generada por el oscilador local con un nivel de potencia determinado por el sistema; esta portadora es suministrada al filtro desfasador para producir la portadora en cuadratura. La potencia de ambas portadoras representa la potencia de la señal QPSK. Debido al desempeño del desfasador, la portadora a su salida no presenta una cuadratura absoluta. A nivel de fase se detalló anteriormente cómo era este problema, a nivel de potencia se presenta la gráfica de la figura 10:



**Figura 10.** Potencia afectada vs. Error de fase

Puede establecerse que para errores de cuadratura menores a  $10^\circ$  (grados), la potencia se mantiene a niveles permisibles superiores al noventa y seis por ciento de la potencia original de la portadora. De los resultados de las simulaciones realizadas para la medición de la tasa de error se encontró que para estos niveles de error de fase es posible la transmisión de voz en el caso crítico, ya que la BER se mantiene por debajo del orden de  $10^{-3}$ .

## CONCLUSIONES

Las simulaciones presentadas determinan niveles de tolerancia del error en un rango menor a  $10^\circ$  (grados). A este nivel se encuentra que el desempeño de QPSK es aceptable para la transmisión, ya que la probabilidad de error de bit es menor al orden de  $10^{-3}$  y la degradación en potencia de la rama afectada es menor al cuatro por ciento de la potencia original.

Al considerar que los fabricantes de moduladores QPSK en este momento garantizan un desempeño dentro de estos límites de tolerancia, se puede afirmar que el compromiso de la no idealidad del modulador en la degradación del desempeño del sistema UTRA-TDD es mínimo. Las observaciones más rigurosas deben realizarse sobre el desempeño del dispositivo desfasador que se implemente para el sistema. Éstas deberían establecer si la zona óptima de trabajo del filtro implementado abarca la frecuencia de portadora especificada para el sistema, determinar si algún factor externo (presión, temperatura, etc.) o propio (vida útil, por ejemplo); puede inducir a la degradación del desempeño del modulador.

## Bibliografía

- [1] VITERBI, H. CDMA. *Principles of Spread Spectrum Communication Systems*. Addison-Wesley, 1995.
- [2] CAMPANELLA, Humberto. Unidad de Adquisición para un receptor WCDMA (UMTS) en modo de operación TDD / CDMA. Tesis de Master, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 1999.
- [3] GLOVER, S. *Digital communication*. Prentice Hall, 1998.
- [4] PROAKIS, S. *Digital Signal Processing: principles, algorithms and applications*. Prentice Hall, 1996.
- [5] UTRA Layer 1 description; TDD; Spreading and Modulation (v 0.0.1, 1998-08); ETSI. Agosto, 1998.  
<http://www.3gpp.org>
- [6] Physical Channels and mapping of transport channels onto physical channels (TDD) (3G TS 25.221 V3.3.0), junio del 2000. [ftp://ftp.3gpp.org/Specs/2000-06/R1999/25\\_series/25221-330.zip](ftp://ftp.3gpp.org/Specs/2000-06/R1999/25_series/25221-330.zip)
- [7] Spreading and modulation (TDD) (3G TS 25.223 V3.3.0), junio del 2000 [ftp://ftp.3gpp.org/Specs/2000-06/R1999/25\\_series/25223-330.zip](ftp://ftp.3gpp.org/Specs/2000-06/R1999/25_series/25223-330.zip)

- [8] Physical Layer Procedures (TDD) (3G TS 25.224 V3.3.0), junio del 2000.  
[ftp://ftp.3gpp.org/Specs/2000-06/R1999/25\\_series/25224-330.zip](ftp://ftp.3gpp.org/Specs/2000-06/R1999/25_series/25224-330.zip)
- [9] UTRA (UE) TDD; Radio Transmission and Reception (3G TS 25.102 V1.1.0), junio de 1999.  
<http://www.3gpp.org>
- [10] UTRA (BS) TDD; Radio transmission and Reception 3G TS 25.105 version 3.3.0, junio del 2000 (vía internet) <http://www.3gpp.org>