

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Implementación en Simulink de técnicas de modulación para
SDR.**

Autor: Tania Rama Hernández

Tutor: Msc. Erik Ortiz Guerra

Santa Clara

2013

“Año 55 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Implementación en Simulink de técnicas de modulación para SDR.

Autor: Tania Rama Hernández

E-mail: trama@uclv.edu.cu

Tutor: Msc. Erik Ortiz Guerra

Departamento de Telecomunicaciones

Facultad de Ingeniería Eléctrica

E-mail: erik@uclv.edu.cu

Santa Clara

2013

“Año 55 de la Revolución”

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de Telecomunicaciones y Electrónica autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Dpto
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico- Técnica

DEDICATORIA

A mami y a Apu.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, mi papá y Erne por siempre apoyarme y quererme, sin uds nada sería igual.

A mis abuelos, Abuela Ana, Abuela Sire, Abuela Lola y Abuelo Pipo.

A abuelo Armando por ser ejemplo.

A mis Tías(os) Esther, Tania, Doris, Noraida, Eilín, Omar y Samuel, por siempre estar presente y por quererme como a una hija.

A Daylé, Sandra, Daine y Janine, ustedes que están en mi corazón gracias por darme la certeza que estoy en el de uds.

A mis amigos de todo el grupo de Tele, ha sido maravilloso su compañía, el viaje no termina aquí, solo está comenzando.

A Mely, Dunia, Ginley y todos los que me han ayudado en este último año, me he identificado mucho con uds.

A Pompo.

A mis profesores de la carrera por el apoyo y ejemplo. En especial por su amistad, gracias Erik (titi), Erisbel (X) y Jorge.

A Orlaida y Jorge, mis papas de acogida.

PENSAMIENTO

No basta con adquirir la ciencia, es necesario también usarla.

Marco Tulio Cicerón

RESUMEN

La Radio Definida por Software es una tecnología que desde sus inicios de implementación ha gozado de mucho éxito. El estudio de esta por parte de los profesionales cubanos se hace indispensable a medida que en el mundo los dispositivos que contienen Radios Definidos por Software se adueñan de los mercados.

Como parte de la formación de profesionales competentes en todas las ramas de la ciencia, se debe crear un mayor espacio para el estudio de la Radio Definida por Software en la Disciplina Teoría de Las Comunicaciones de la carrera Telecomunicaciones y Electrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.

Es por ello que en este trabajo se pretende hacer un estudio teórico de la Radio Definida por Software y cómo se implementan los procesos de modulación/demodulación a partir de las señales I y Q en algunos de estos Radios. Además como resultado de este trabajo se obtendrán archivos de simulación en una herramienta matemática de fácil acceso a los estudiantes, para complementar mediante los turnos de laboratorio los temas que puedan ser impartidos en clases.

<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO 1. RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE</u>	<u>4</u>
1.1 Radio Definida Por Software	4
1.1.1 Características	5
1.2 Hardware.....	6
1.2.1 Subsistema Analógico.....	7
1.2.2 Subsistema Digital.....	7
1.2.3 Ejemplos De Subsistemas Analógicos Implementados.....	8
1.3 Señales I Y Q	9
1.4 Diagrama En Bloque De Subsistemas Analógicos.....	11
1.5 Consideraciones Finales	13
<u>2 CAPÍTULO 2. MODULACIONES UTILIZADAS POR SDR</u>	<u>15</u>
2.1 Modulación Analógica	15
2.1.1 Modulación Lineal.....	16
2.1.2 Modulación Angular O Exponencial.....	18
2.2 Modulación Por Software Utilizando I Y Q	22
2.2.1 Modulación AM Por Software.....	22
2.2.2 Modulación PM Y FM Por Software.....	24
2.3 Consideraciones Finales	25
<u>3 CAPÍTULO 3 SIMULACIONES Y RESULTADOS</u>	<u>26</u>
3.1 Descripción General Del Diagrama	26
3.2 Modulación/Demodulación AM	27
3.2.1 Subsistema Analógico.....	28
3.2.2 Subsistema Digital.....	29
3.3 Modulación/Demodulación PM	31
3.3.1 Subsistema Analógico.....	32
3.3.2 Subsistema Digital.....	34
3.4 Modulación/Demodulación FM	35
3.4.1 Subsistema Analógico.....	35
3.4.2 Subsistema Digital.....	37
3.5 Consideraciones Finales	38

<u>CONCLUSIONES</u>	<u>39</u>
<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>41</u>
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>42</u>
<u>ANEXO 1</u>	<u>44</u>
<u>ANEXO 2</u>	<u>48</u>

INTRODUCCIÓN

La Radiocomunicación desde su descubrimiento e invención ha fascinado a los seres humanos. Esta provee información y comunicación a largas distancias. En sus inicios las transmisiones de radio necesitaban grandes equipos para garantizar la potencia de la señal. Además estas transmisiones eran caracterizadas por un alto nivel de ruido, demoras, y error. Con el desarrollo de la electrónica analógica y digital, los dispositivos se fueron haciendo más pequeños, y con el uso de las diferentes modulaciones digitales, el error, la latencia y el ruido ha disminuido sustancialmente, ya que los procesos que antes se realizaban con grandes y ruidosos aparatos, se sustituyeron por dispositivos igual de potentes pero más compactos.

El desarrollo de la tecnología digital y el avance de los sistemas computacionales han posibilitado una migración del hardware digital a sistemas basados solamente en software.

El procesamiento digital de señales ha jugado un rol importante en el diseño e implementación de sistemas prácticos con incorporación de software, ya que en la actualidad los procesadores digitales de señal pueden trabajar a muy altas velocidades y frecuencia. Por lo que es más factible utilizar un dispositivo programable que realiza iguales funciones que un circuito electrónico.

La introducción de la idea de software en los sistemas de radiocomunicaciones ha fundamentado el surgimiento del concepto de *Software Radio*. Los *Software Radio* han revolucionado la ingeniería de radio, siendo posible ahora definir varias funciones de radio en un solo hardware solamente usando el software apropiado. A los sistemas antes referenciados se le denominan Radios Definidos por Software.

La tecnología de Radio Definida por Software ha impactado en todos los sectores de la economía, ya que ofrece una variante barata y de fácil implementación. La radio celular ha avanzado en los últimos años hasta el punto de que en un mismo dispositivo de radio se necesiten implementar más de 5 estándares diferentes. La aplicación de la Radio Definida por Software en las redes de celulares está

brindando amplias posibilidades a los operadores en este sector, posibilitando la extensión de la vida útil de las estaciones base y el alivio de la congestión en el espectro.

La aplicación de los sistemas de Radio Definida por Software en los automóviles es una nueva vía de desarrollo. Esta va encaminada fundamentalmente a la utilización de las computadoras y las tecnologías de las comunicaciones para mejorar las experiencias de viaje en los automóviles.

A pesar del alcance logrado a nivel mundial en las dos últimas décadas en la implementación de sistemas de radio definida por software, este tema no aparece ampliamente abordado en los planes de estudio de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad Central "Marta Abreu" de la Villas.

En Cuba la aplicación de esta tecnología está solo en vías de investigación por parte de algunas entidades, pero aun así se hace necesario que los estudiantes estén preparados en todos los aspectos tecnológicos actuales a nivel mundial, y el dominio de este tema debería ser parte de la preparación para estos futuros ingenieros.

En este trabajo se obtendrán simulaciones que servirán de material de apoyo en los laboratorios de las asignaturas de la disciplina Teoría de las Comunicaciones para la Carrera Telecomunicaciones y Electrónica.

Como Objetivo General de este trabajo se trazó el siguiente:

Implementar bloques de modulación /demodulación de un sistema de SDR con las señales I/Q utilizando la herramienta MATLAB.

Para una buena conducción del proceso de realización de este trabajo con el fin de cumplir el Objetivo General, se trazaron las siguientes Tareas de Investigación:

- ✓ La realización de un estudio sobre la radio definida por software.
- ✓ La caracterización de los tipos de modulación que se utilizan en la Radio Definida por Software.
- ✓ El análisis de cómo se realiza la modulación y la demodulación en los sistemas de Radio Definida por Software utilizando las señales I y Q.

- ✓ La implementación de estos procesos en la herramienta de simulación MATLAB.
- ✓ La evaluación de los resultados obtenidos en las simulaciones.

La estructura del informe de la investigación consta de introducción, capitulario, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

En la introducción se dejará definida la importancia, actualidad y necesidad del tema que se aborda y se dejarán explícitos los elementos del diseño teórico.

El capítulo 1 se dedicará a la definición de la radio definida por software y su actualidad. En el capítulo 2 se realizará un estudio de cómo se implementan las diferentes modulaciones en los sistemas de Radio Definida por Software empleando señales I/Q. El capítulo 3 se dedicará a la implementación de los bloques de modulación y demodulación en la Radio Definida por Software utilizando la herramienta Simulink de MATLAB.

1 CAPÍTULO 1 RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE

El empleo extensivo de procesadores potentes y baratos en los últimos años ha posibilitado el surgimiento de la idea de sustituir parte de la circuitería de los dispositivos de radio por programas que realicen las mismas funciones pero a nivel de software (Algora, 2011).

Actualmente se han desarrollado transmisores y receptores bajo este principio por parte de aficionados, entidades del sector de las comunicaciones y empresas de otras ramas con especial interés en brindar servicios vía radio.

Estos sistemas han puesto en el mercado una variante barata, flexible y con amplias posibilidades de desarrollo en oposición a la tradicional forma de construir los sistemas de radio. A esta tecnología se le ha denominado Radio Definida por Software o SDR, (del inglés *Software Defined Radio*).

En este Capítulo se hará referencia una serie de aspectos importantes de esta tecnología, tales como sus características y forma de funcionamiento.

1.1 RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE

En 1991 Joe Mitola III denominado padre de la SDR utiliza el término *Software Radio* para referirse a un tipo de radio reprogramable o reconfigurable que podía modificar sus funciones en distintos instantes de tiempo (Mitola, 2000).

A partir de este momento diversos autores han desarrollado definiciones, todas dependiendo del enfoque del problema en el campo del investigador.

Afirman en (C. Richard Johnson and Sethares, 2003) que: “Definido por Software significa que los elementos claves del radio están implementados en software”.

De acuerdo a Tod Sizer en (Rubenstein, 2011): “Radio Definida por Software es un término difuso, es la habilidad de modificar un radio para actuar de un modo diferente, mejorar su comportamiento y ser utilizado para más de un propósito”.

En (Quintero et al., 2006) se define SDR como un radio sustancialmente definido por software y cuyo comportamiento en capa física puede ser significativamente alterado a través de cambios en dicho software.

En (Youngblood, 2002) se explica que “Un SDR puede ser fácilmente modificado para acomodar las necesidades de operaciones de aplicaciones generales. Hay una diferencia distintiva entre un radio que internamente usa un software para algunas de sus funciones, a un radio que puede ser completamente redefinido en el campo a través de modificaciones por software. Este último es un Radio Definido por Software”.

Según (Algora, 2011) “Tecnología de radio donde algunas o todas las funciones de la capa física están definidas por software, proveyéndole flexibilidad, capacidad de reconfiguración, actualización, y posibilidades de adaptación a diferentes ambientes y propósitos a los dispositivos de radio.”

A pesar de que se muestran anteriormente varias definiciones la más referenciada es la desarrollada y publicada en (Forum, 2012) por la *Wireless Innovation Forum* y la *IEEE*, “Radio en la cual algunas o todas funciones de la capa física son definidas por software”.

Resumiendo todo lo expuesto anteriormente se puede definir un concepto acorde al perfil académico de este proyecto; siendo este:

La Radio Definida por Software es una tecnología donde a través de un software el radio tiene la habilidad de rediseñarse de forma parcial o total en diferentes instantes de tiempo, con el objetivo de mejorar o ampliar su propósito.

1.1.1 CARACTERÍSTICAS

La Radio Definida por Software elimina problemas existentes en los radios analógicos; tales como el alto costo de producción y la poca flexibilidad ante los cambios de modulación de la señal.

La SDR cuenta entre sus características con la flexibilidad, la capacidad de reconfiguración, la actualización y las posibilidades de adaptación ante diferentes ambientes. Todo esto debido a que parte de la circuitería del equipo es sustituido por un software que es capaz de realizar estas funciones.

Numerosos autores han publicado características de la SDR, según (Technology, 2002) las principales características son:

- **Reconfigurabilidad:** SDR permite la coexistencia de múltiples módulos software implementados con diferentes estándares en el mismo sistema que permite la configuración dinámica del sistema con tan solo seleccionar el módulo de software correspondiente para ejecutar.
- **Conectividad Ubicua:** SDR permite la implementación de estándares de interferencia de aire como módulos software y múltiples instancias de estos módulos que implementan diferentes estándares pueden coexistir en el equipo de infraestructura y los terminales.
- **Interoperabilidad:** SDR facilita la implementación de la arquitectura abierta de sistemas radio.

Otra característica importante en algunos de estos radios es que necesitan utilizar para configuraciones específicas un hardware básico que permita que el software funcione, además de una parte analógica que es la encargada de aportar la potencia a la señal, alimentar la antena, y otras operaciones que no pueden ser efectuadas en el dominio digital.

1.2 HARDWARE

En la figura 1.1 se observa la arquitectura básica de un SDR, la cual está formada por una parte analógica y una digital. Dentro del subsistema digital se encuentra un hardware que es el que aporta la flexibilidad y reconfigurabilidad del radio, es decir es el encargado de proporcionar la plataforma para que el software funcione. El subsistema analógico transforma la señal de entrada de la antena en señales I y Q que son proporcionadas al subsistema digital que es el encargado de entre otras funciones; modular y demodular la señal.

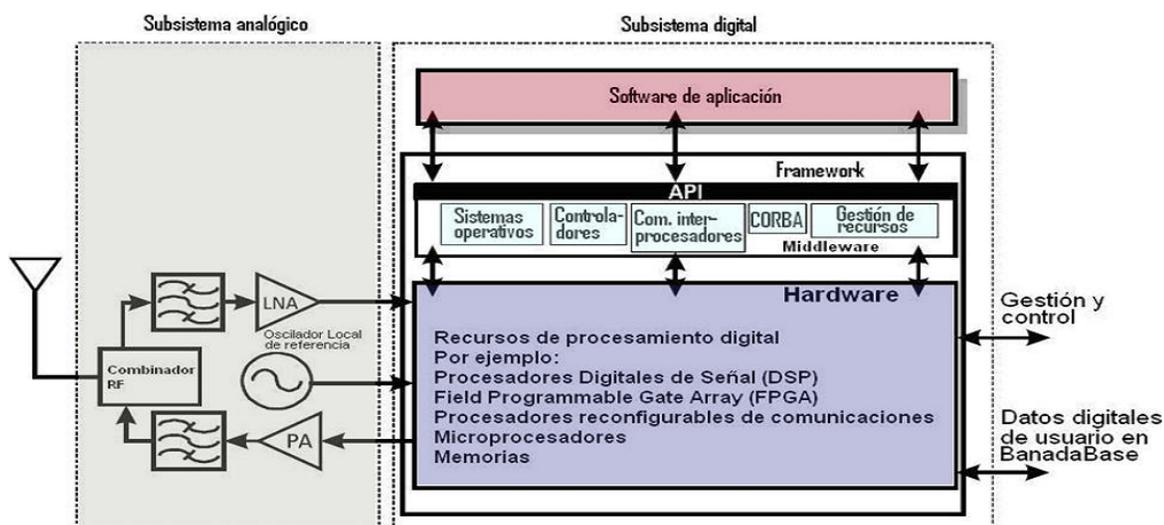


Figura 1.1 Arquitectura Básica de un SDR (Quintero et al., 2006).

1.2.1 SUBSISTEMA ANALÓGICO

Esta parte analógica es la encargada de la etapa de potencia de transmisión y recepción del SDR, además provee la alimentación de la antena, el filtrado y combinación en RF, preamplificación, amplificación, y generación de la frecuencia de referencia. Esta etapa de RF es conocida como *front-end*.

1.2.2 SUBSISTEMA DIGITAL

Dentro del subsistema digital se hallan todas las funciones que realiza el software dentro del SDR. Además se encuentran un hardware que permite el funcionamiento del subsistema digital. Existen tres opciones de implementación para este hardware.

1. **Procesadores Digitales de Señales o DSP** (del inglés *Digital Signal Processor*): Es una de las primeras tecnologías utilizadas en la implementación de los SDR. Fue utilizada en aplicaciones militares. Aporta flexibilidad al sistema y una amplia gama de aplicaciones en software existente para estos dispositivos. En el caso específico de SDR, los DSP se utilizan más en formas de procesamiento de señal computacionalmente

menos intensivas que en aplicaciones *front-end* de alta velocidad (Youngblood, 2002, Kenington., 2005).

2. Circuitos Integrados de Aplicación Especifica o ASIC (del inglés *Application Specific Integrated Circuit*): Estos dispositivos manejan lógica basada en *hardcode* para realizar funciones muy específicas. La utilización de este tipo de dispositivos tiene “el inconveniente de incrementar el tamaño de los equipos a medida que aumenta el número de “modos” o “estándares” que éste debe soportar, pues se debería implementar un ASIC para cada “servicio”, lo que indirectamente afecta también el costo” (Youngblood, 2002, Cummings and Haruyama, 1999).
3. Arreglo de Compuertas Programables por Campo o FPGA (del inglés *Field Programmable Gate Array*): Ofrecen alta capacidad de reconfiguración dinámica, lo cual dota de alta flexibilidad al sistema. “Estos dispositivos permiten optimizar espacio, consumo de potencia y facilidades de optimización/actualización, además de proporcionar lo necesario para cumplir el objetivo de contar con la disponibilidad de diversas interfaces de aire en los radios SDR” (Youngblood, 2002).

1.2.3 EJEMPLOS DE SUBSISTEMAS ANALÓGICOS IMPLEMENTADOS

Empresas como la firma italiana Microtelecom, *QuickSilver*, WinRADiO, u otras han desarrollado subsistemas analógicos para determinados SDR. Estos hardware muestran en sus especificaciones técnicas datos como:

1. Rango de Frecuencia: En dependencia del uso del radio, como receptor o transmisor, se pueden encontrar SDR que trabajan con frecuencias de 10kHz a 1GHz. Como por ejemplo el DiRaBox DRB30 que trabaja con frecuencias de 30 KHz a 30 MHz, y el QS1R que puede manejar frecuencias de 10 KHz a 62.5 MHz, y puede ser ampliado a 500 MHz (Technology, 2006, QuickSilver, 2011).
2. Potencia: La mayoría trabaja con potencias de 1W, pero existen otros que son construidos para aplicaciones más específicas y que cuentan

con una potencia mayor. El FlexRadio Systems SDR-1000 está disponible en versión para 1 W y 100W (Paradigm Software Group, 2011a, Paradigm Software Group, 2011b).

3. Conectividad a la PC: Algunos de estos SDR tienen interfaz USB 2.0 para conectarse a la PC y proveer las señales I y Q. Ejemplos de ello son el *Universal Software Radio Peripheral (USRP)*, *WR-G31DDC 'EXCALIBUR'*. Otros utilizan la tarjeta de sonido la de PC, por lo que la señal RF es primero llevada al rango auditivo humano y luego es convertida a I y Q. (WINRADIO, 2012, Blossom, 2011).

En el Anexo 1 son recogidas estas y otras características de algunos de estos equipos.

1.3 SEÑALES I Y Q

La mayoría de los radio definido por software que utilizan un subsistema analógico adicional como los mostrados anteriormente, utilizan las señales I (en fase) y Q (en cuadratura) para hacer el procesamiento de la señal.

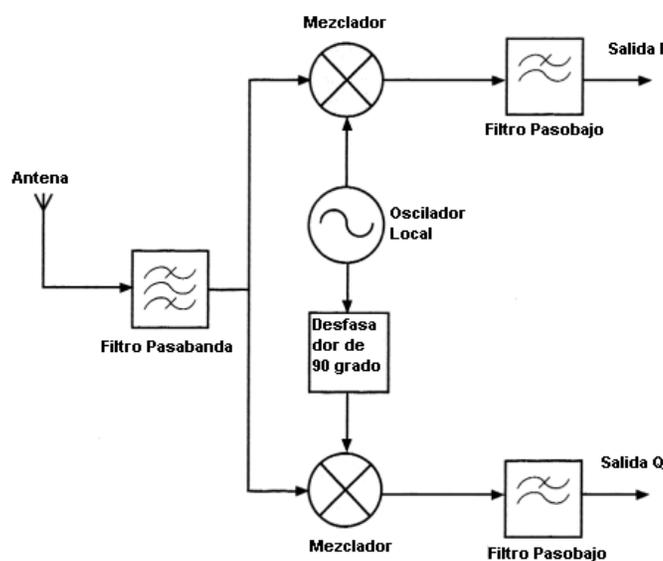


Figura 1.2 Diagrama del subsistema analógico de un SDR (Harman and Ireland, 2009).

En la figura 1.2 se muestra el diagrama en bloque del subsistema analógico de un SDR clásico. La señal es recogida por la antena y luego filtrada para asegurar que

la frecuencia deseada llegue a los dos mezcladores. Una de las salidas del oscilador está conectada a un bloque que produce un desfase de 90°, lo cual significa que las señales tienen la misma frecuencia pero una diferencia de fase de 90° entre sí. Por lo que estas señales se denominan; la señal en fase I y a la desfasada Q (en cuadratura). En la figura 1.3 ilustran dichas señales.

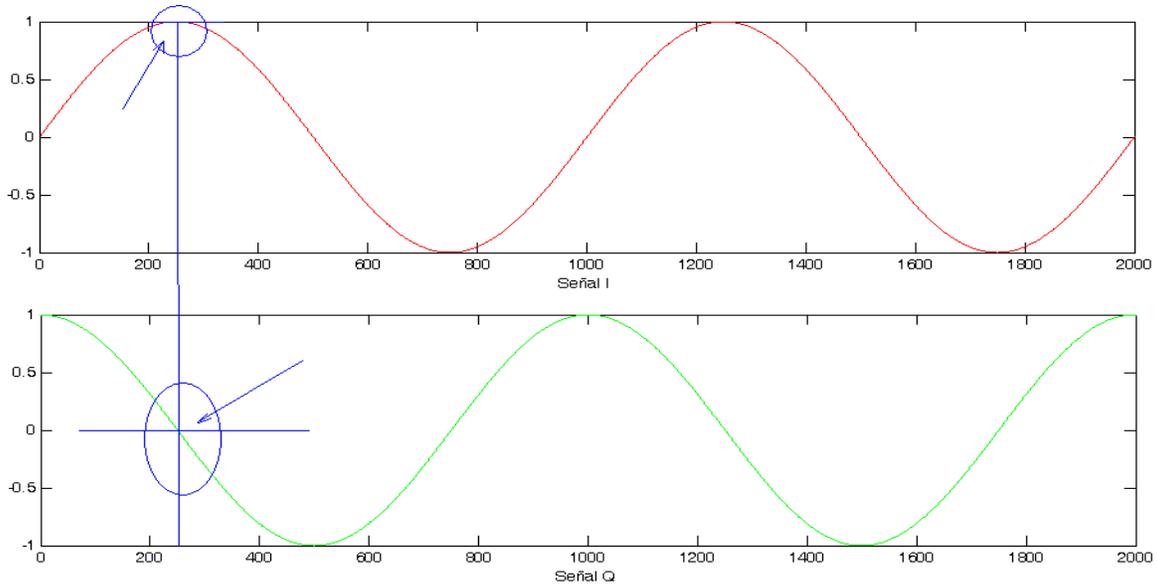


Figura 1.3 Señales I y Q.

Si las señales I y Q son representadas en un diagrama vectorial, estas serían dos vectores de igual amplitud y con un ángulo de 90° entre ellas, razón por la cual a este par se le conoce como una señal compleja, que puede ser representada matemáticamente de varias formas. Según la fórmula de Euler:

$$e^{jt} = \cos(\omega t) + j\text{sen}(\omega t) \quad 1.1$$

$$Z = e^{j \cdot fr} \cdot e^{j \cdot fo} \quad 1.2$$

$$Z = e^{j(fr+fo)} \quad 1.3$$

$$Z = e^{j(fr+fo)} = \cos(fr + fo) + j\text{sen}(fr + fo) \quad 1.4$$

Siendo las señales I y Q las siguientes:

$$I = A[\cos(fr + fo)] \quad 1.5$$

$$Q = A[\text{sen}(fr + fo)] \quad 1.6$$

Donde:

- f_r es la frecuencia RF.
- f_o es la frecuencia del oscilador local.
- A la amplitud de la señal RF de entrada.

Luego de filtradas estas señales pasan al subsistema digital donde serán procesadas para recuperar el mensaje original de la transmisión. A decir de (Harman and Ireland, 2009) con las señales I y Q se puede realizar la demodulación de AM, FM, SSB, CW y PSK. Algunas de las fórmulas que se utilizan para estos procesos serán manejadas en el Capítulo 2 de este trabajo.

1.4 DIAGRAMA EN BLOQUE DE SUBSISTEMAS ANALÓGICOS

En epígrafes anteriores se hace referencia a SDR que utilizan las señales I y Q para pasar la información del subsistema analógico al digital, para en este último realizar la modulación/demodulación de la señal. A continuación se muestran algunos ejemplos prácticos de subsistemas analógicos de SDR.

- SDR-1000: Construido por Gerald Youngblood. Es una etapa frontal de radiofrecuencia. Tiene un rango de frecuencia de 11KHz a 65MHz. Con una potencia máxima de 1W. Está diseñado para el uso de radioaficionados (Fernandez, 2011, Paradigm Software Group, 2011a).

La figura 1.4 muestra el diagrama en bloque de este radio. Después de recibida la señal es filtrada por un filtro pasabanda que asegura tener la frecuencia de señal deseada. Luego la señal es desplazada en frecuencia a la banda de audio mediante el detector por muestreo en cuadratura (QSD). Para realizar el proceso de sintonía correctamente, se controla a través del puerto paralelo (PIO) la frecuencia de oscilación del Oscilador de Síntesis Digital Directa (DDS).

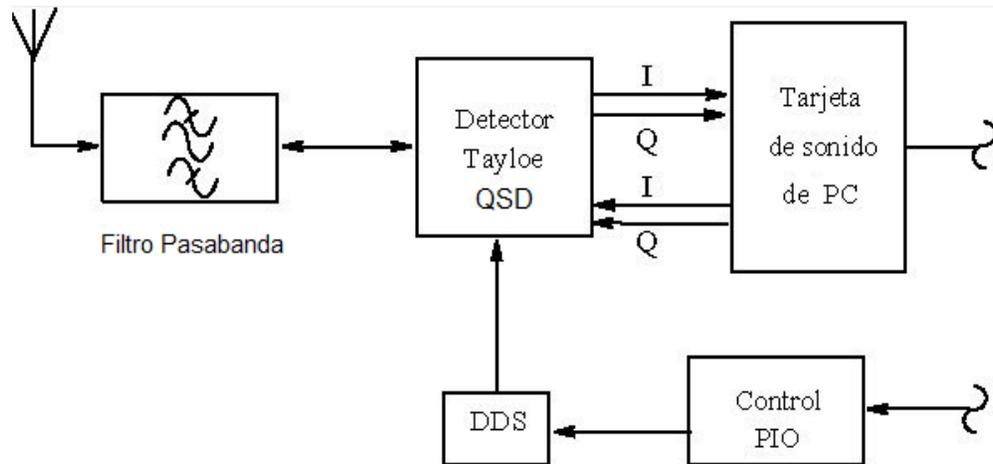


Figura 1.4 Diagrama en bloque del SDR-1000 (Fernandez, 2011).

El detector de muestreo en cuadratura (QSD, del inglés *Quadrature Sampling Detector*) toma muestras de la señal de radiofrecuencia cuatro veces por ciclo de su portadora, dando lugar a cuatro salidas con desfases respectivos de 0, 90, 180 y 270 grados. Al tratarse de un circuito muestreador y no de un mezclador, se obtienen las señales I y Q, pero sin las pérdidas y otras problemáticas propias de los mezcladores y con un funcionamiento excepcional. Dicho detector se conoce también como detector Tayloe en honor a su desarrollador (Fernandez, 2011).

- PM-SDR: Desarrollado por Martin Pernter, utiliza el software libre WinRad de Jeffrey Pawlan, así como otros programas para funcionar en Linux. Se conecta por USB y puede configurarse en el rango de 100kHz-50MHz. Entrega señales I y Q de audio a la PC (Pernter, 2012).

En la figura 1.5 se observa el diagrama en bloque de este SDR.

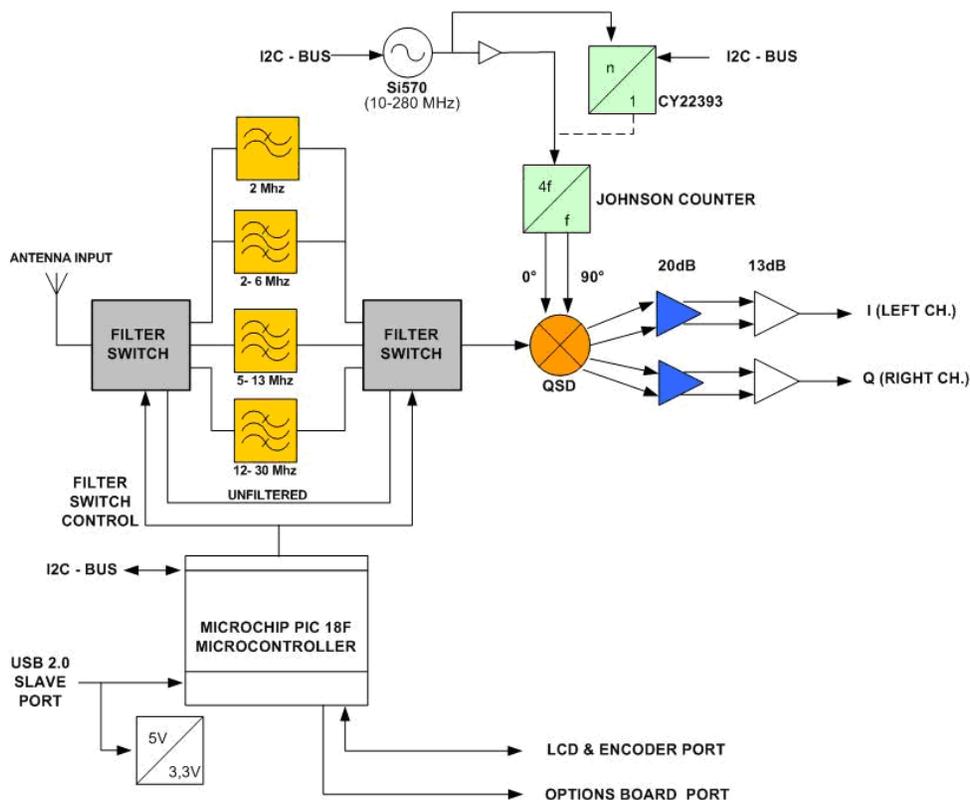


Figura 1.5 Diagrama en bloque (Pernter, 2012).

La señal de entrada es pasada por un banco de filtros que son controlados por un microcontrolador, y que aseguran que sea correctamente filtrada y seleccionada la banda de frecuencia deseada. Luego la señal es entregada al QSD que es el encargado de proporcionar las señales I y Q al subsistema digital, en este caso a la PC.

1.5 CONSIDERACIONES FINALES

La Radio Definida por Software en estos últimos años ha emergido para ofrecer una solución potencial a la inhabilidad de algunos equipos de archivar estándares globales de comunicación en un mismo dispositivo para su utilización.

Pese a que la mayoría de las funciones de los SDR son implementadas por software todavía algunos de estos radios necesitan una etapa de potencia final para lograr la transmisión, esto lo logran con un hardware adicional. Este hardware adicional o subsistema analógico realiza además otras operaciones que no

pueden ser realizadas por el subsistema digital. La señal de entrada es convertida en un par de señales complejas llamadas I y Q, las cuales son utilizadas para realizar las operaciones en el dominio digital, tales como modular/demodular la señal.

2 CAPÍTULO 2 MODULACIONES UTILIZADAS POR SDR

La modulación es un proceso que transforma la información de su forma original a una forma más adecuada para transmitirla (Carlson, 2002).

Muchas y diferentes técnicas de modulación se han desarrollado para todo tipo de uso y necesidad de los sistemas de radiocomunicación. Existen diversas clasificaciones, entre las más usadas se encuentran la modulación analógica y la modulación digital.

La SDR es una tecnología que realiza la mayoría de las funciones por software. La modulación/demodulación es uno de los procesos que se realizan en el subsistema digital del radio. Con la utilización de las señales I y Q, y algoritmos matemáticos estos radios demodulan señales moduladas analógicamente como AM, PM, FM y digitalmente como PSK.

En este Capítulo se realizará la descripción de algunas de las técnicas de modulación analógica mencionadas anteriormente y su implementación mediante software.

2.1 MODULACIÓN ANALÓGICA

En la modulación analógica el mensaje es una señal que se representa por un subconjunto de números reales; es una señal continua. En función de la relación entre la señal mensaje y los parámetros de la señal modulada, se tienen los dos tipos de modulación analógica (Carlson, 2002, Lathi, 2003, Lathi, 1998, Márquez, 2005, Couch, 2002, Stremler, 1993):

- Modulación Lineal. La amplitud instantánea de la señal modulada varía linealmente respecto a la señal mensaje.
- Modulación Angular o Exponencial. La desviación de fase instantánea varía linealmente respecto a la señal mensaje.

2.1.1 MODULACIÓN LINEAL

Existen diversos tipos de modulación lineal, todas con diferencias que las caracterizan, pero parten de una base común, que es la Modulación de Amplitud o AM (del inglés *Amplitude Modulation*).

La modulación AM fue el primer tipo de modulación que se desarrolló y se utilizó en la radio difusión común (Carlson, 2002, Couch, 2002, Márquez, 2005).

2.1.1.1 MODULACIÓN DE AMPLITUD

La modulación AM, es una traslación directa, en frecuencia, del espectro del mensaje. La envolvente de la portadora, tiene la misma forma del mensaje (Márquez, 2005, Carlson, 2002, C. Richard Johnson and Sethares, 2003). Esto se logra añadiendo el mensaje trasladado en proporción correcta a la portadora sin modular.

$$x_c(t) = A_c \cos \omega_c t + mx(t) A_c \cos \omega_c t \quad 2.1$$

$$x_c(t) = A_c [1 + mx(t)] \cos \omega_c t \quad 2.2$$

Donde:

- $x(t)$ -mensaje.
- $x_c(t)$ -señal modulada
- $A_c \cos \omega_c t$ -portadora sin modular.
- $f_c = \omega_c / 2\pi$ -frecuencia de la portadora.
- m -índice de modulación.

Debido a que A_c es la amplitud de la portadora sin modular, se dice que la amplitud modulada es una función lineal del mensaje, reafirmando el significado

de modulación de amplitud (Márquez, 2005, Carlson, 2002, C. Richard Johnson and Sethares, 2003).

$$A_c(t) = A_c [1 + mx(t)] \quad 2.3$$

El índice de modulación da la proporción del mensaje que se adiciona a la portadora sin modular. Por convención se adopta que $m \leq 1$ para que no exista sobremodulación, fenómeno que provoca inversión de fase de la portadora y distorsión en la envolvente.

En la figura 2.1 se muestran formas de onda de señales moduladas en amplitud con diferentes índices de modulación. En 2.1 d) se muestra como cuando $m > 1$ la señal se distorsiona.

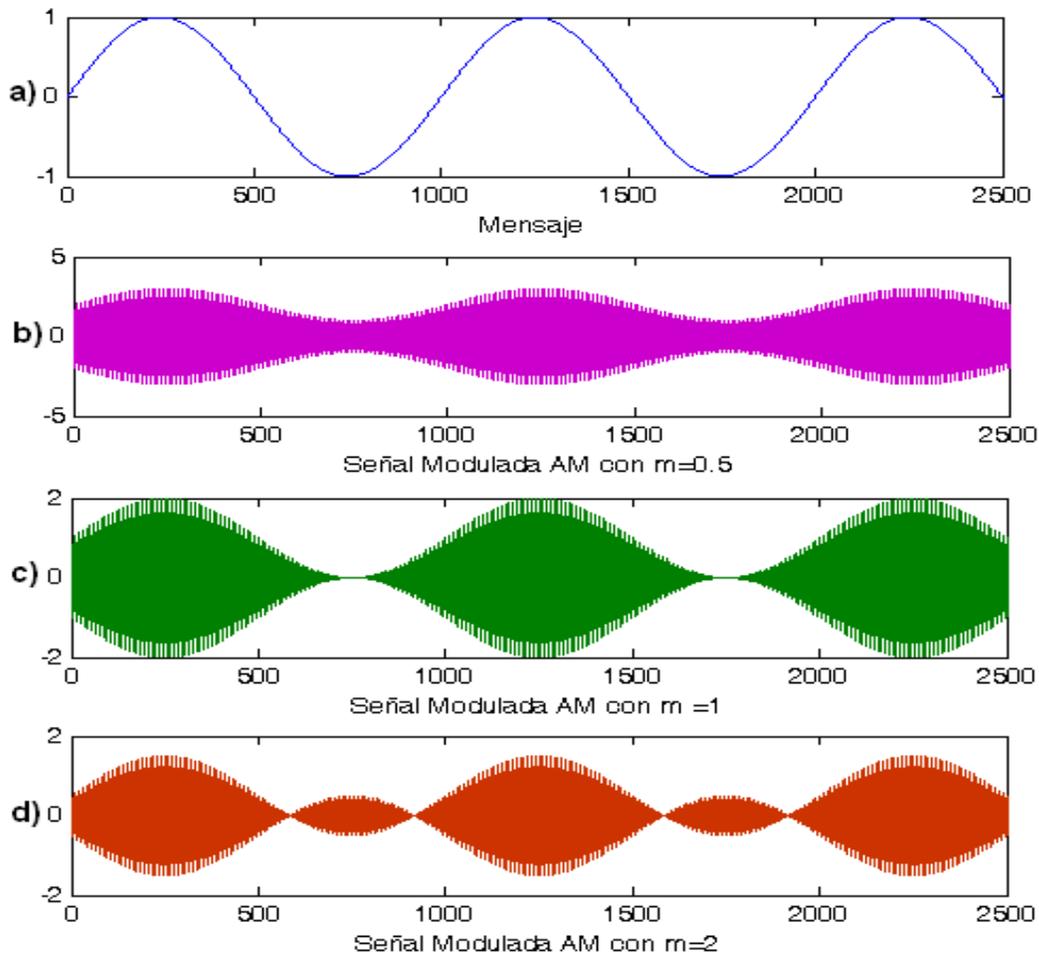


Figura 2.1 Formas de onda de señales moduladas en amplitud. a) Mensaje; b) Señal modulada con $m=0.5$; c) Señal modulada con $m=1$; d) Señal modulada con $m=2$.

2.1.2 MODULACIÓN ANGULAR O EXPONENCIAL

En una señal analógica pueden variar tres aspectos, la amplitud, la fase y la frecuencia; como se explica en el epígrafe anterior en el caso de AM varía la amplitud. En la Modulación Angular o Exponencial puede variar la fase y la frecuencia, derivándose así dos tipos de modulación; Modulación de Fase o PM (del inglés *Phase Modulation*), y la Modulación de Frecuencia o FM (del inglés *Frequency Modulation*)

En la Modulación Exponencial, la señal modulada en forma fasorial es una función exponencial del mensaje, pudiendo expresarse matemáticamente como (Márquez, 2005, Carlson, 2002, C. Richard Johnson and Sethares, 2003, Tomásí, 2003, Roupahel, 2009):

$$x_c(t) = \text{Re} \left[A_c e^{j\theta_c(t)} \right] = A_c \cos \theta_c(t) \quad 2.4$$

Siendo:

$$\theta_c(t) = 2\pi f_c t + \phi(t) \quad 2.5$$

Donde:

- θ_c - posición angular del fasor.
- $\theta_c(t)$ - función lineal de $x(t)$.
- $\phi(t)$ - ángulo de fase relativa.

2.1.2.1 MODULACIÓN DE FASE

La Modulación de Fase es el proceso donde la fase relativa ($\phi(t)$) es proporcional al mensaje ($x(t)$).

$$\phi(t) = \phi_d x(t) \quad \phi_d \leq 180^\circ \quad 2.6$$

Sustituyendo 2.6 en 2.5

$$\theta_c(t) = 2\pi f_c t + \phi_d x(t) \quad 2.7$$

Entonces la señal modulada en fase es;

$$x_c(t) = A_c \cos[\omega_c(t) + \phi_d x(t)] \quad 2.8$$

Donde ϕ_d es la constante de desviación de fase, es decir, la máxima desviación de fase producida por $x(t)$. El límite superior $\phi_d \leq 180^\circ$ establece un rango límite de $\pm 180^\circ$ para $\phi(t)$; previniendo ambigüedades de fase, ya que por ejemplo no hay distinción entre los ángulos $+270^\circ$ y -90° (Carlson, 2002).

El valor ϕ_d es análogo a m en AM, por lo que se le denomina índice de modulación de fase o constante de desviación de fase (Carlson, 2002).

En la figura 2.2 se muestra la señal modulada en fase, con una ϕ_d de $\pi/2$. El mensaje es una señal sinusoidal y los cambios de fase se observan como cambios de frecuencia, debido a que los cambios de amplitud no ocurren abruptamente y por tanto la fase no cambia repentinamente como ocurren en la figura 2.3.

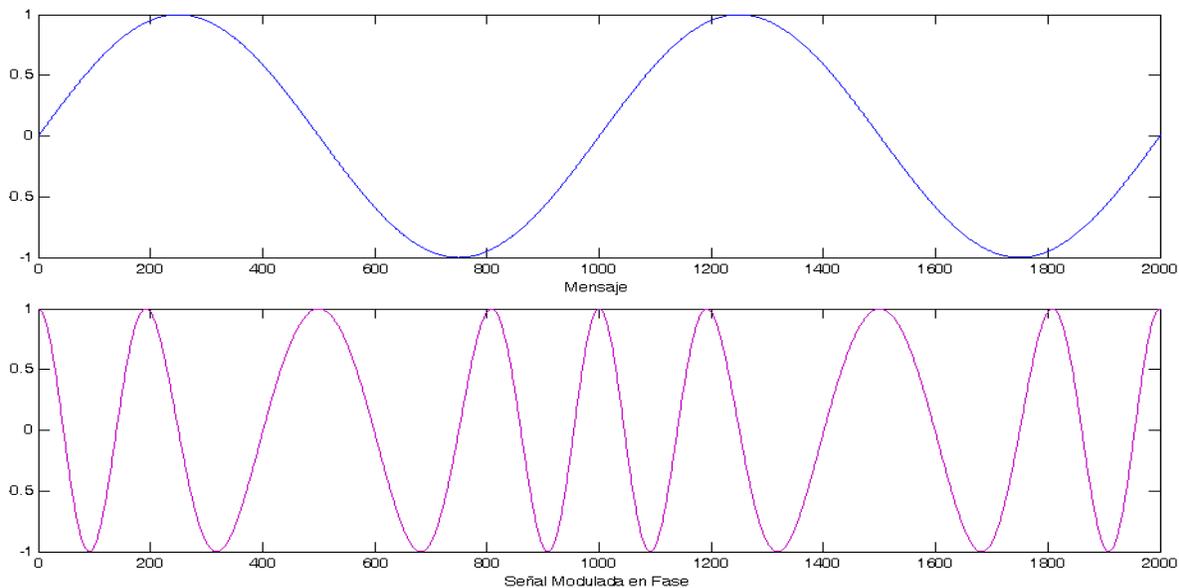


Figura 2.2 Señal sinusoidal modulada en fase.

En la figura 2.3 la ϕ_d es de π y el mensaje es una señal cuadrada con la misma frecuencia que la senoide de 2.2, en este caso se puede observar que ante los cambios abruptos de amplitud ocurren cambios de fase de 180° .

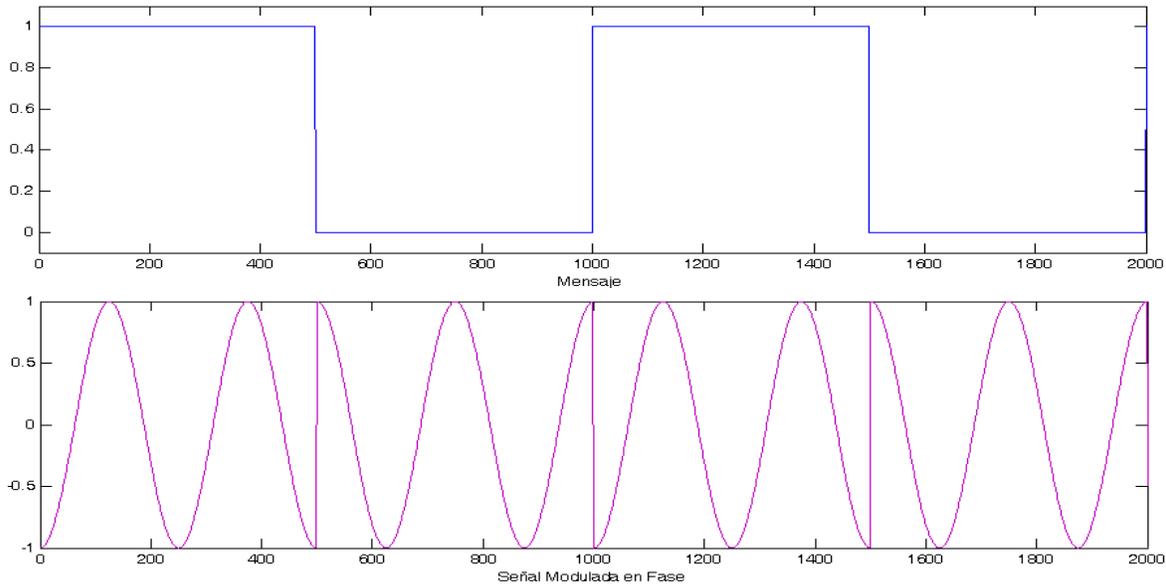


Figura 2.3 Señal cuadrada modulada en fase.

Como se observa en las figuras en la modulación PM la máxima desviación de frecuencia ocurre durante los cruces de cero de la señal modulante, por lo que se concluye que, la desviación de frecuencia es proporcional a la pendiente o primera derivada de la señal modulante (Carlson, 2002, Márquez, 2005).

2.1.2.2 MODULACIÓN DE FRECUENCIA

La Modulación de Frecuencia es el proceso donde la desviación de frecuencia instantánea $[d\phi/dt]/2\pi$ es proporcional al mensaje.

$$f(t) = f_c + f_d x(t) \quad f_d < f_c \quad 2.9$$

Siendo:

- $f(t)$ - frecuencia instantánea
- f_d -constante de desviación de frecuencia.

$$\theta_c(t) = 2\pi f_c t + 2\pi f_d \int x(t') dt' \quad 2.10$$

Por lo que la onda modulada en frecuencia es:

$$x_c(t) = A_c \cos\left[\omega_c(t) + 2\pi f_d \int x(t') dt'\right] \quad 2.11$$

Donde:

- f_d representa la máxima desviación de $f(t)$ relativa a la frecuencia portadora.
- f_c . El límite establecido por $f_d < f_c$ asegura que $f(t) > 0$

En la figura 2.4 se muestra como en FM, la máxima desviación de frecuencia, es decir, los cambios en la frecuencia de la portadora ocurren durante los máximos puntos negativos y positivos de la señal modulante, pudiendo afirmar que, la desviación de frecuencia es proporcional a la amplitud de la señal modulante (Carlson, 2002, Márquez, 2005).

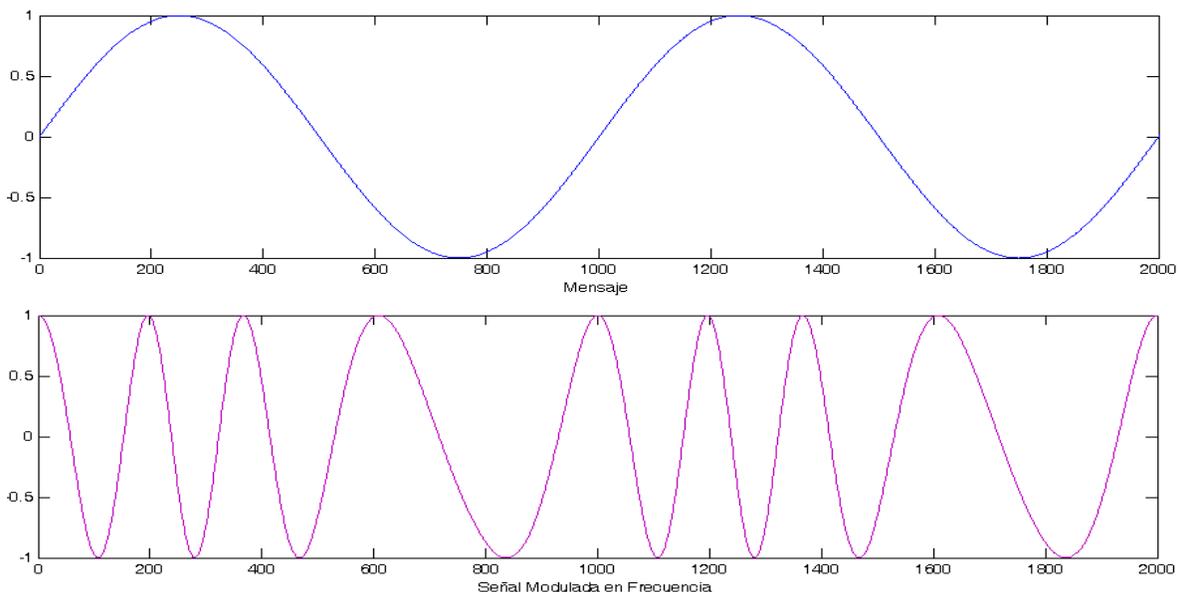


Figura 2.4 Señal sinusoidal modulada en frecuencia.

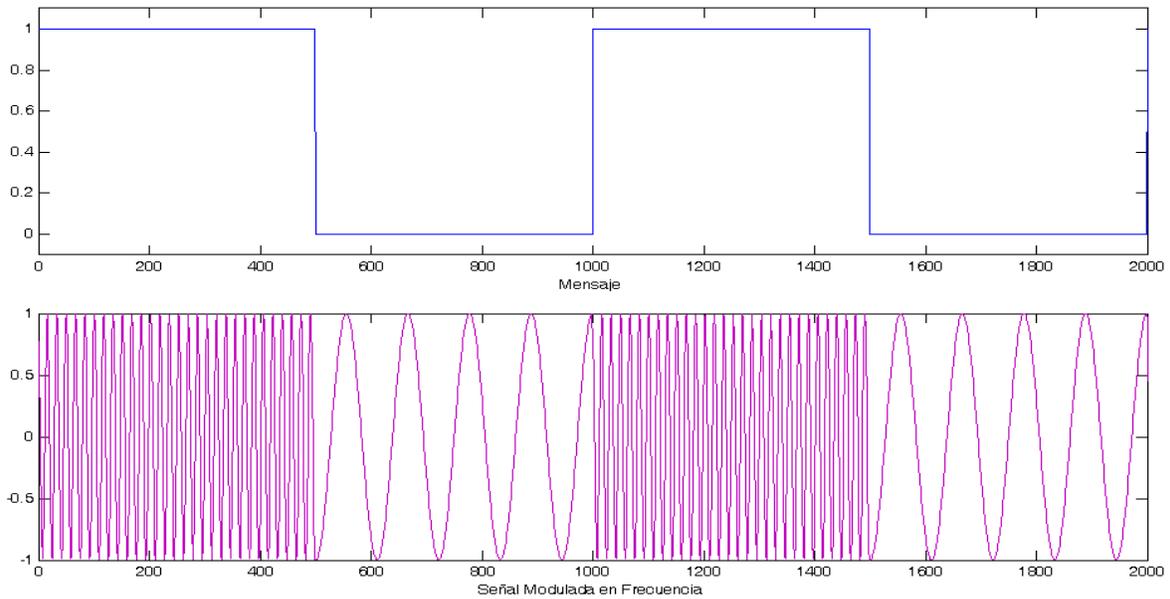


Figura 2.5 Señal cuadrada modulada en frecuencia.

Como se explicó anteriormente cuando se modula en FM los cambios ocurren en los máximos punto negativo y positivo, si se observa en la figura 2.5 cuando se modula una señal cuadrada en FM se pueden observar dos frecuencia, una para cada semiciclo de la señal cuadrada.

2.2 MODULACIÓN POR SOFTWARE UTILIZANDO I Y Q

La Radio Definida por Software es una tecnología que se adapta a diferentes medios y que puede reconfigurarse con diferentes módulos. Como se explica en el Capítulo 1, la SDR que utiliza un subsistema analógico adicional convierte la señal RF de entrada en señales I y Q que son pasadas al subsistema digital para procesarlas. Uno de los procesos que se realizan el en subsistema digital o por software es la modulación y la demodulación.

2.2.1 MODULACIÓN AM POR SOFTWARE

Las señales I y Q son señales en cuadratura. En la figura 2.6 se representan I y Q como dos vectores de igual amplitud y diferencia de fase de 90° entre sí.

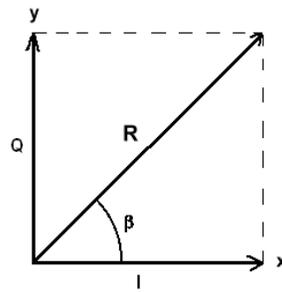


Figura 2.6 Diagrama vectorial de I y Q.

Según (Harman and Ireland, 2009, Bloom, 2007, Smith, 1998, Youngblood, 2002, C. Richard Johnson and Sethares, 2003, Islam et al., 2009) la demodulación de AM por software se realiza calculando el valor de amplitud instantáneo de cada muestra utilizando el Teorema de Pitágoras. Siendo la señal demodulada:

$$AM = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad 2.12$$

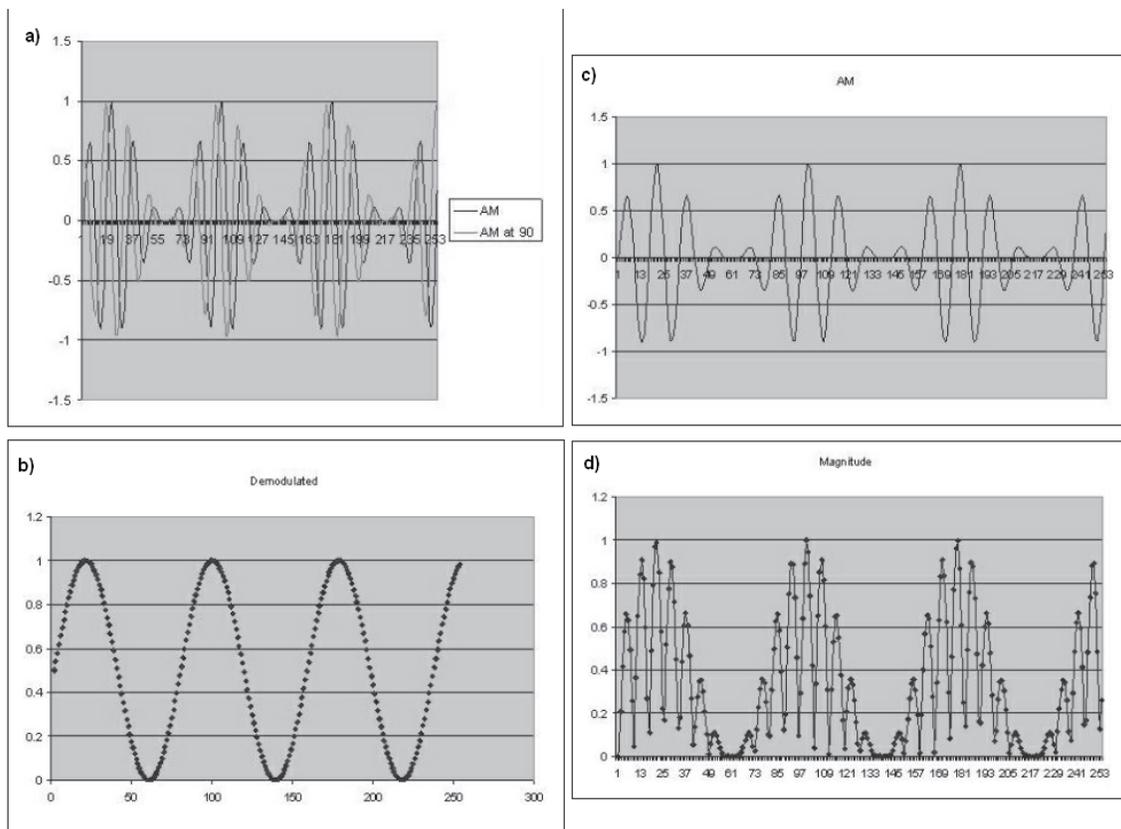


Figura 2.7 Demodulación AM a partir de las señales I y Q(Harman and Ireland, 2009).

En la figura 2.7 se ilustra el resultado de utilizar dos algoritmos de demodulación AM. En la figura 2.7 a) se encuentran las señales I y Q moduladas en AM; y en c) la señal AM modulada. En la figura 2.7 b) se observa el resultado de aplicar la ecuación 2.12, para demodular la señal. En la figura 2.7 d) se encuentra la señal resultante de calcular directamente la amplitud a partir de la señal AM.

Como se observa existe una componente de frecuencia no deseada en la figura 2.7 d), lo cual implica que luego de demodular es necesario filtrar la señal obtenida.

Se puede concluir que con la utilización de las señales I y Q se elimina la necesidad de filtrar la señal demodulada, posibilidad que se hace útil a medida que la frecuencia portadora sea más pequeña, lo que dificulta el proceso de filtrado.

2.2.2 MODULACIÓN PM Y FM POR SOFTWARE

Como se explica en epígrafes anteriores a diferencia de la Modulación AM donde la variación de la amplitud lleva la información, la Modulación de Fase y Frecuencia tiene una amplitud constante. Por lo que la demodulación depende de las variaciones de la fase instantánea de la señal RF. Resultando más complejo el algoritmo matemático para demodular la señal.

En el caso de la Modulación de Fase o PM, la fase de la señal modulada contiene el mensaje. Siendo β un ángulo del triángulo rectángulo formado por los vectores I y Q y la amplitud instantánea R. Se puede calcular β por identidades trigonométricas.

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad 2.13$$

Según (Harman and Ireland, 2009, Bloom, 2007, Smith, 1998, Youngblood, 2002) se puede demodular una señal modulada en PM utilizando la expresión:

$$PM = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right) \quad 2.14$$

Y para demodular FM:

$$FM = \frac{[(Q_n \times I_{n-1}) - (Q_{n-1} \times I_n)] / [(I_n \times I_{n-1}) + (Q_n \times Q_{n-1})]}{[I^2 + Q^2]} \quad 2.15$$

2.3 CONSIDERACIONES FINALES

La modulación es un proceso se que se ha hecho necesario a medida que las comunicaciones han avanzado, ya que permite que la información modulada viaje más lejos y se vea menos afectada por el ruido y la latencia. En la Radio Definida por Software al igual que en la radio convencional se pueden utilizar modulaciones del tipo analógico o digital. Las modulaciones analógicas AM, FM y PM son algunas de las utilizadas por los sistemas SDR. Para poder realizar este proceso la SDR utiliza algoritmos matemáticos.

3 CAPÍTULO 3 SIMULACIONES Y RESULTADOS

En el Capítulo anterior fue realizada una introducción teórica de los algoritmos que utilizan los SDR para demodular usando las señales I y Q. En este Capítulo serán mostrados los resultados de implementar estos sistemas en el Simulink de MATLAB.

La demodulación teniendo en cuenta la degradación de la señal al ser transmitida no es objetivo de este trabajo, por lo que se implementará el Bloque de Transmisión seguido del de Recepción.

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DIAGRAMA

Los esquemas realizados en la herramienta Simulink de MATLAB constan de tres bloques; Bloque de Tx, Bloque de Obtención de las Señales I y Q (o Subsistema Analógico) y Bloque de Demodulación (o Subsistema Digital). La unión de estos dos últimos bloques representa el Radio Receptor SDR.

Los esquemas utilizados para realizar las distintas modulaciones tienen similitudes por lo que se explicarán de forma general a continuación, y las especificaciones serán realizadas en los epígrafes correspondientes.

En el caso del Bloque Tx, está compuesto por el mensaje y un bloque modulador. El mensaje es una señal sinusoidal discreta, debido a que el programa exige para utilizar los bloques modulador/demodulador señales de este tipo. Por tanto el proceso de muestreo de las señales I y Q necesarios para digitalizarlas es obviado en los diagramas y análisis realizados en el Capítulo, ya que se toman las muestras de la señal directamente.

Los datos correspondientes a la cantidad de muestras de la señal y tipo de modulador varían con los esquemas. En la figura 3.1 se observa esta etapa.

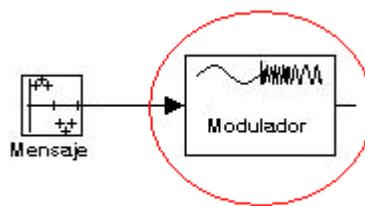


Figura 3.1 Etapa TX del diagrama.

En el subsistema analógico se realizan los procesos que no pueden ser efectuados en el dominio digital como fue expresado en el Capítulo 1; además es en este bloque donde se obtienen las señales I y Q.

Para realizar el desfasaje de 90° entre las señales I y Q se empleó un bloque de demora, el cual retrasa la señal de entrada n muestras de la señal, pudiendo apreciarse un desfasaje entre las señales si se utiliza un osciloscopio. La cantidad de muestras utilizadas es diferente en cada modulación; por lo que los cálculos de n se realizarán en los epígrafes correspondientes.

En la figura 3.2 se observa la representación general de este bloque.

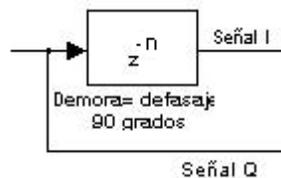


Figura 3.2 Obtención de las señales I y Q.

3.2 MODULACIÓN/DEMULACIÓN AM

La figura 3.3 se muestra el esquema utilizado para la simulación de AM. Este está dividido en los tres bloques antes mencionados.

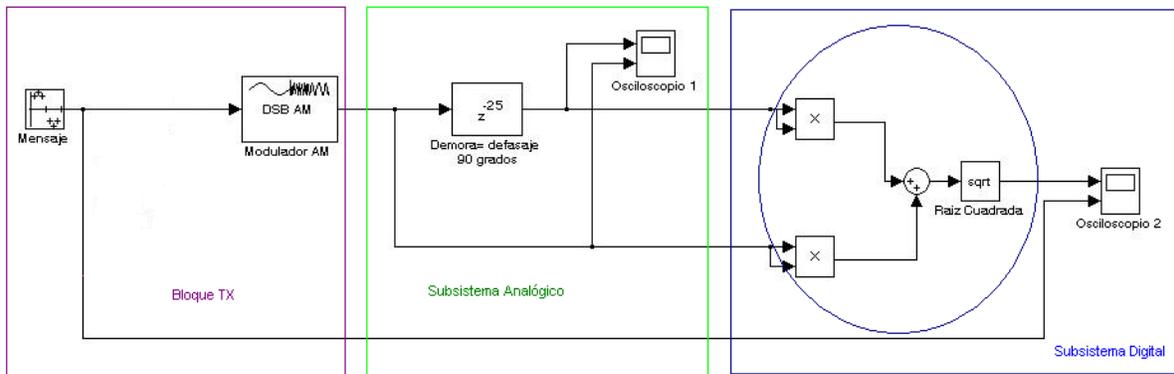


Figura 3.3 Diagrama de Modulación/Demodulación AM.

3.2.1 SUBSISTEMA ANALÓGICO

El mensaje es una señal sinusoidal discreta, los parámetros de este bloque son mostrados en la figura 3.4 junto a los del bloque Modulador AM.

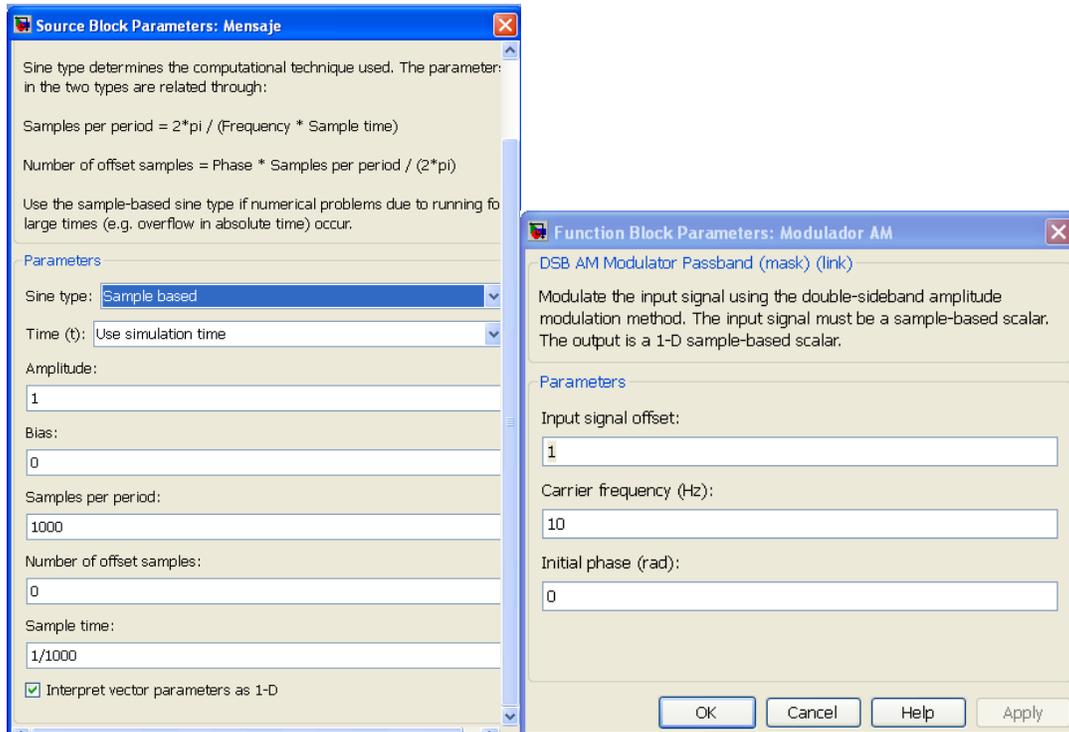


Figura 3.4 Parámetros de Mensaje y Modulador AM.

De esta figura se puede obtener los siguientes datos:

$$\#_{de.muestras.mensj} = 1000muestras$$

$$f_{portadora} = 10Hz$$

Siendo:

$$f = \frac{1}{T} \tag{3.1}$$

$$T = t_{una.muestra} \times \#_{de.muestras} \tag{3.2}$$

Se puede calcular:

$$T = 1/1000 \times 1000 = 1s$$

$$f_{\text{mensj}} = \frac{1}{T} = 1\text{Hz}$$

Por tanto cuando ocurre un ciclo del mensaje ocurren 10 de la portadora, donde el número de muestras que tiene la portadora puede calcularse como:

$$\#_{\text{muestrasporciclo}} = \frac{\#_{\text{muestras}}}{\#_{\text{ciclos.de.portadora}}} = 100\text{muestras} \quad 3.3$$

Para lograr un desfase de 90° hay que desplazar la señal un cuarto de período, para este caso esto significa retrasar 25 muestras.

En la figura 3.5 se observa como la señal I está adelantada 90 grados respecto a Q.

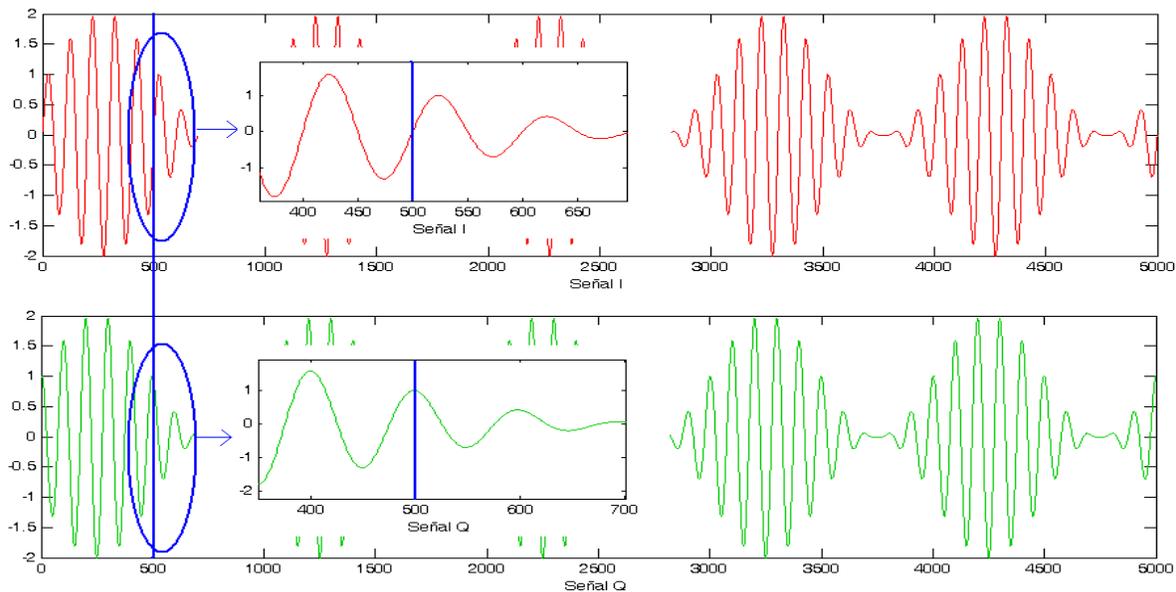


Figura 3.5 Señales I y Q.

3.2.2 SUBSISTEMA DIGITAL

Dentro del subsistema digital de un SDR se realizan todos los procesos de configuración y demodulación. En el caso que se muestra en la figura 3.6 se representa el proceso de demodulación. Para realizar la demodulación se utilizan las señales I y Q mediante el manejo de la ecuación 2.12 presentada en el Capítulo 2.

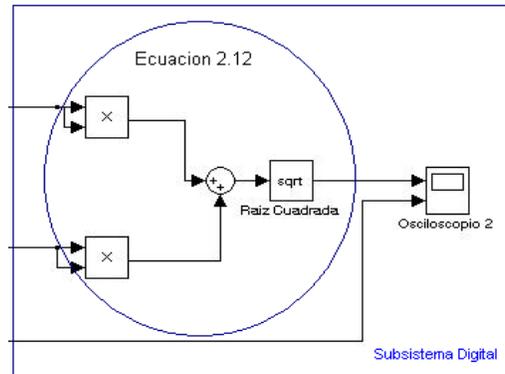


Figura 3.6 Esquema del Subsistema Digital

En el Osciloscopio se observan dos entradas, una es la señal demodulada y la otra el mensaje original para poder realizar la comparación. En la figura 3.7 se encuentran los dos canales antes mencionados. Observando detenidamente se puede notar que la señal demodulada tiene escalones, esto se debe a que las muestras están muy separadas ya que como fue explicado con anterioridad hay 10 ciclos de portadora por cada ciclo del mensaje.

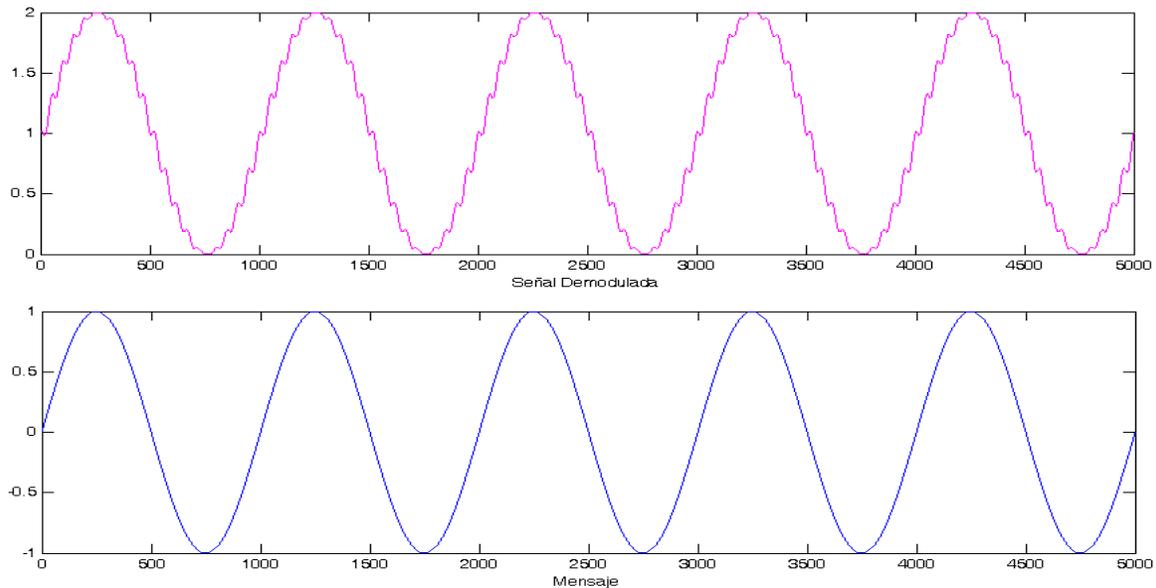
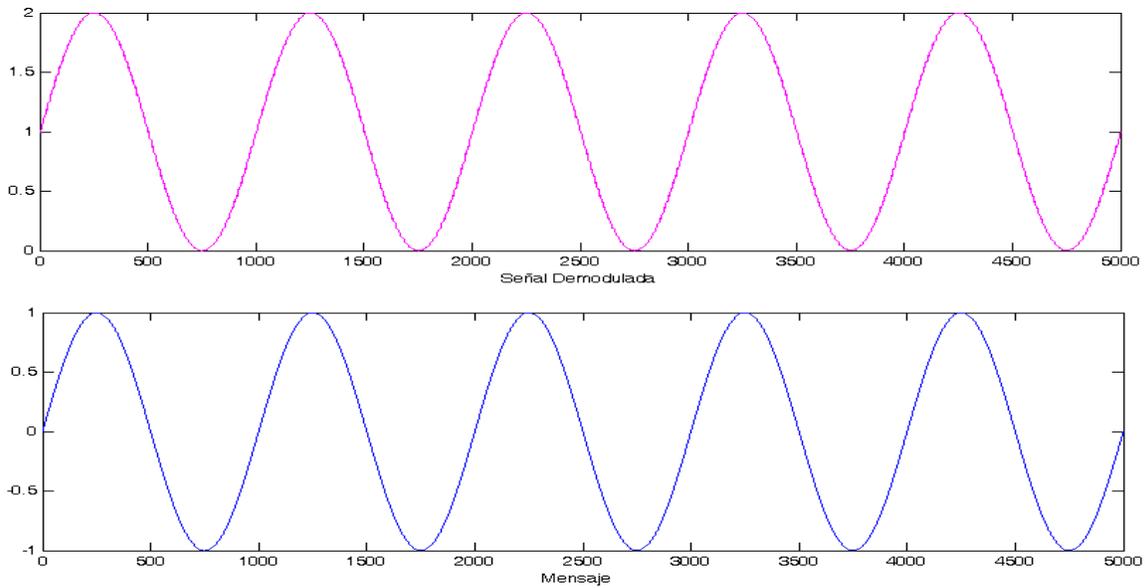


Figura 3.7 Señal AM demodulada, con 10Hz de frecuencia de portadora en el Tx.

En el caso de la figura 3.8 se utiliza una portadora de 50Hz, siendo la demora de 20 muestras, y el resultado es una señal más uniforme.



3.8 Señal AM demodulada, con 50Hz de frecuencia de portadora en el Tx.

3.3 MODULACIÓN/DEMULACIÓN PM

La figura 3.9 muestra el esquema utilizado para la modulación PM, en este caso se aprecian diferencias entre los bloques básicos mencionados.

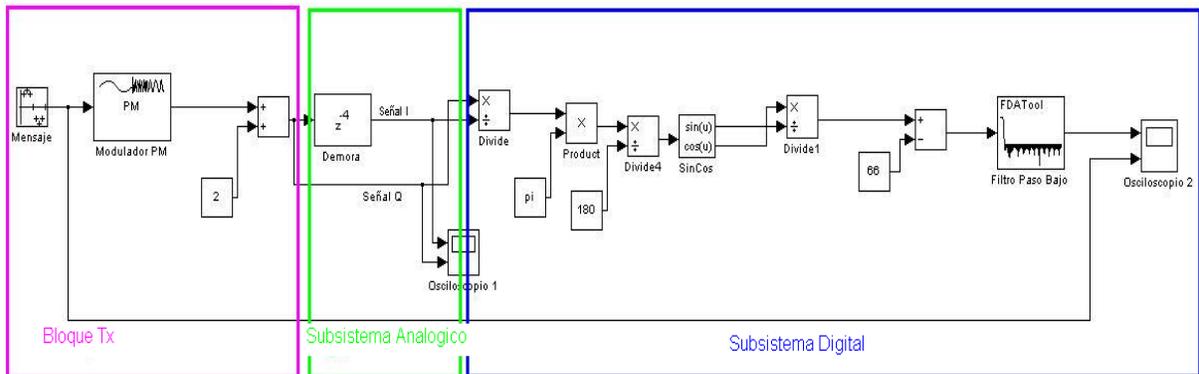


Figura 3.9 Esquema de modulación/demodulación PM.

En el caso del bloque transmisor se le ha adicionado una constante a la señal ya que en el momento de realizar el proceso de demodulación se dividen las señales y la división por 0 no está definida.

3.3.1 SUBSISTEMA ANALÓGICO

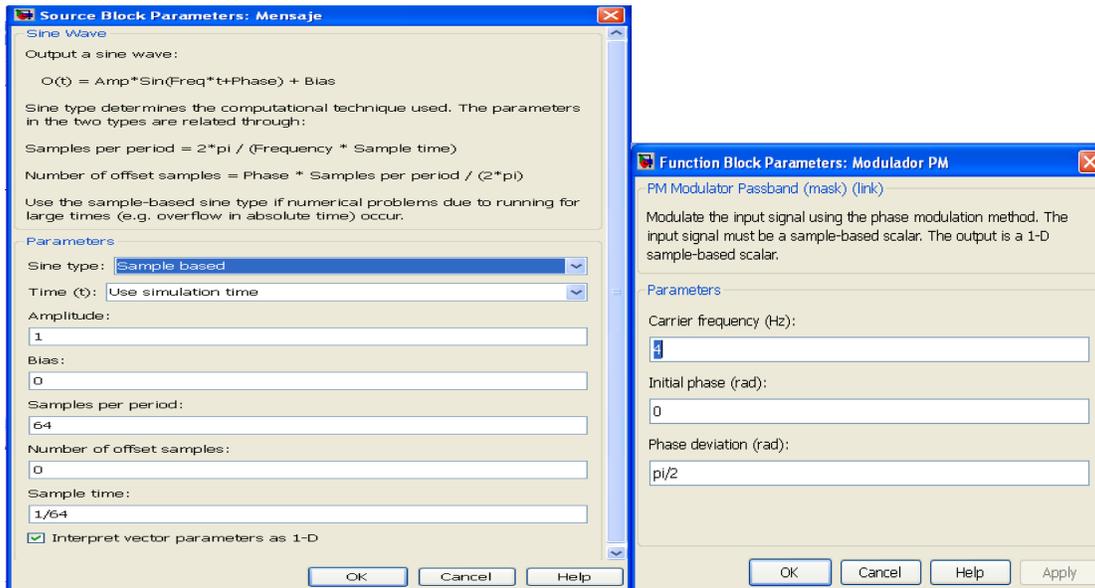


Figura 3.10 Parámetros de los bloques Mensaje y Modulador PM.

Para el cálculo de la demora en el subsistema analógico presente, se obtuvieron los datos siguientes de la figura 3.10:

$$f_{\text{moduladora}} = 4\text{Hz}$$

$$f_{\text{mensj}} = \frac{1}{T} = 1\text{Hz}$$

Siendo:

$$T = T_{\text{una.muestra}} \times \#_{\text{de.muestras}} = 1/64 \times 64 = 1\text{s} \quad 3.4$$

Se puede afirmar que en un ciclo del mensaje ocurren 4 ciclos de la moduladora, en la figura 3.11 se observa lo expuesto.

CAPÍTULO 3 SIMULACIONES Y RESULTADOS

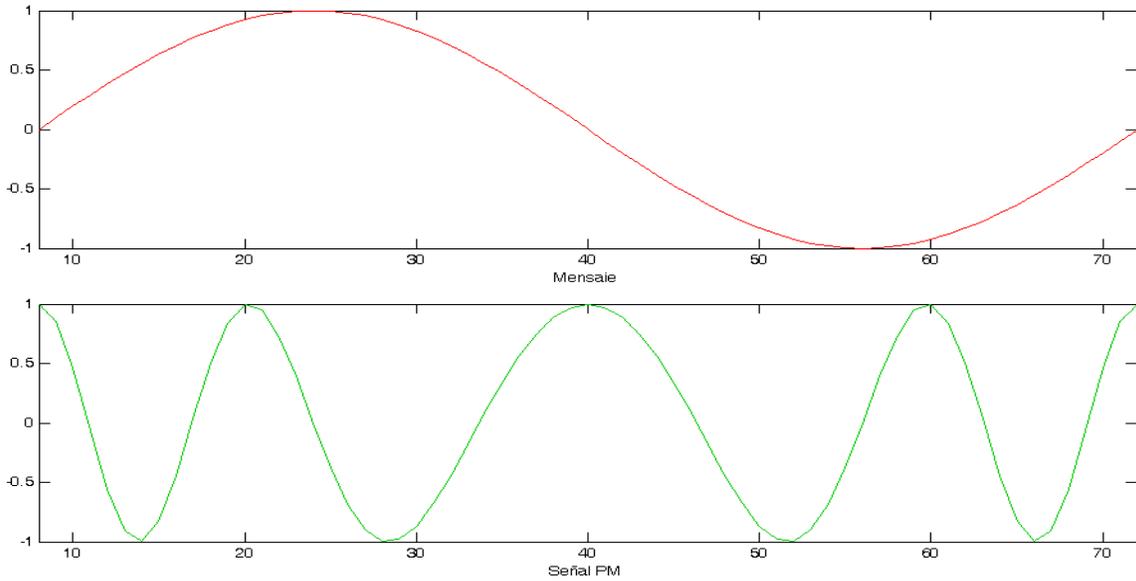


Figura 3.11 Comparación entre la cantidad de ciclos del mensaje y la señal modulada PM.

De aquí se puede determinar el número de muestras de la señal PM modulada mediante:

$$\#_{muestrasPM} \frac{\#_{de.muestras}}{cantidad.de.ciclos} = 64 / 4 = 16muestras \quad 3.5$$

Por lo que para lograr un desfase de 90°, se necesita demorar 4 muestras de la señal, este resultado es observado en la figura 3.12.

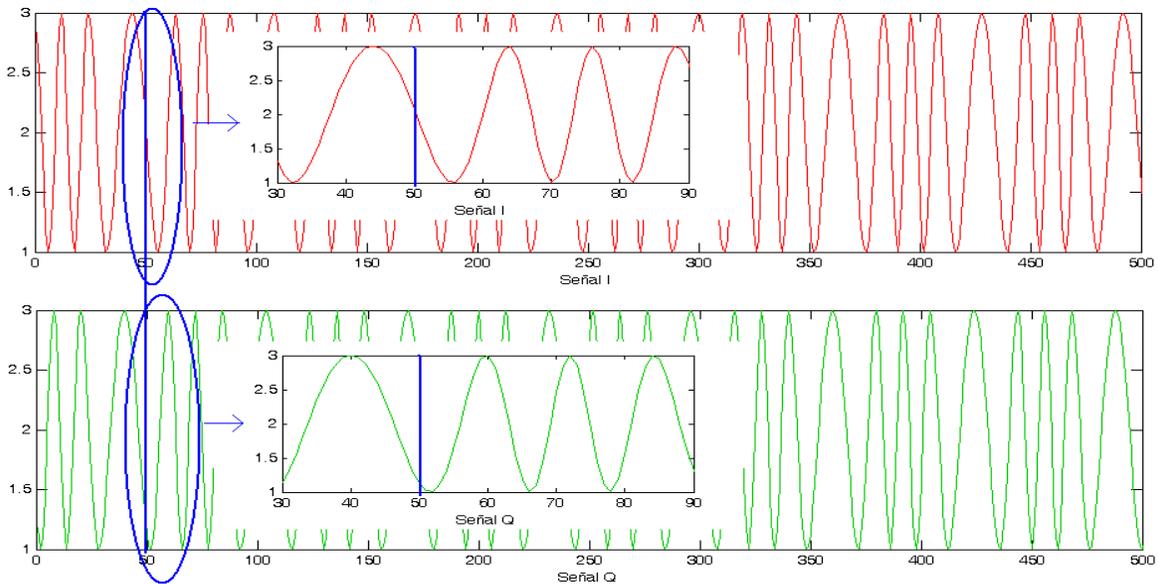


Figura 3.12 Señales I y Q.

3.3.2 SUBSISTEMA DIGITAL

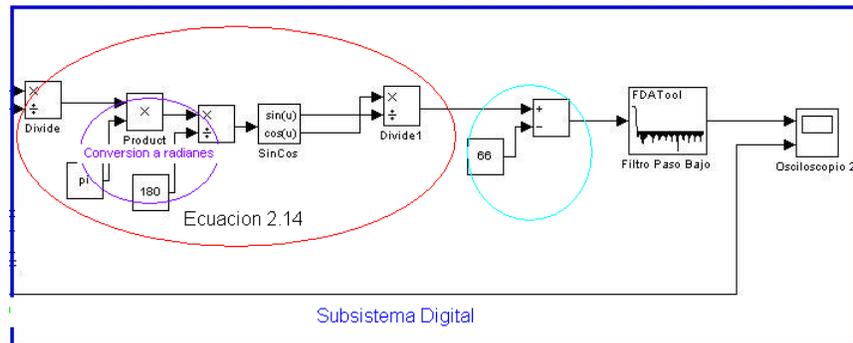


Figura 3.13 Esquema del subsistema digital.

En la figura 3.13 sobresale un bloque denominado Conversión a Radianes. El mismo fue necesario colocarlo debido a que hay que convertir la señal a radianes para utilizar el bloque SinCos, del MATLAB, en la figura 3.14 se observa cómo el programa demanda esta conversión.

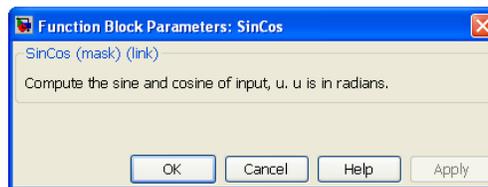


Figura 3.14 Parámetros del bloque SinCos.

El procedimiento matemático mostrado en la figura 3.13 es el presentado en la ecuación 2.14 del Capítulo 2.

En la figura 3.13 se aprecia que antes de ser filtrada la señal es llevada a otro nivel DC mediante la resta por un valor constante, esto se debe a que al dividir números pequeños, menores que 1 como los obtenidos en SinCos, la señal es elevada a un nivel DC alto, el cual es equivalente al nivel restado. Luego la señal es filtrada, en la figura 3.15 se muestra una comparación entre el mensaje y la señal demodulada, pudiéndose observar que la señal obtenida es igual al mensaje.

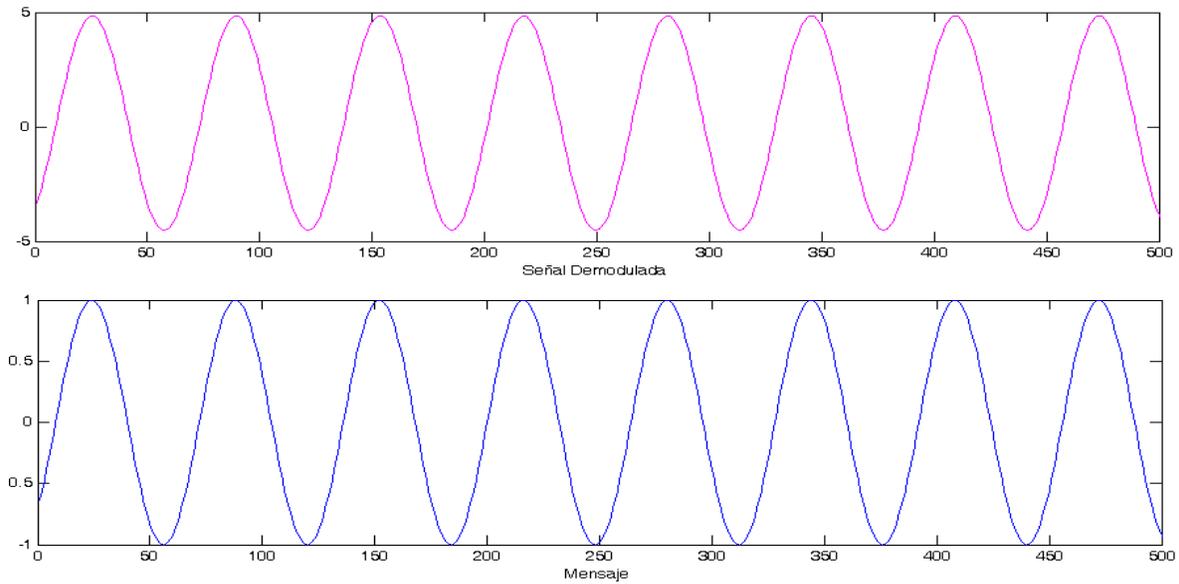


Figura 3.15 Comparación entre el mensaje obtenido y el mensaje original.

3.4 MODULACIÓN/DEMULACIÓN FM

A continuación se muestra el esquema perteneciente a la modulación FM. En este se presentan los bloques típicos antes tratados.

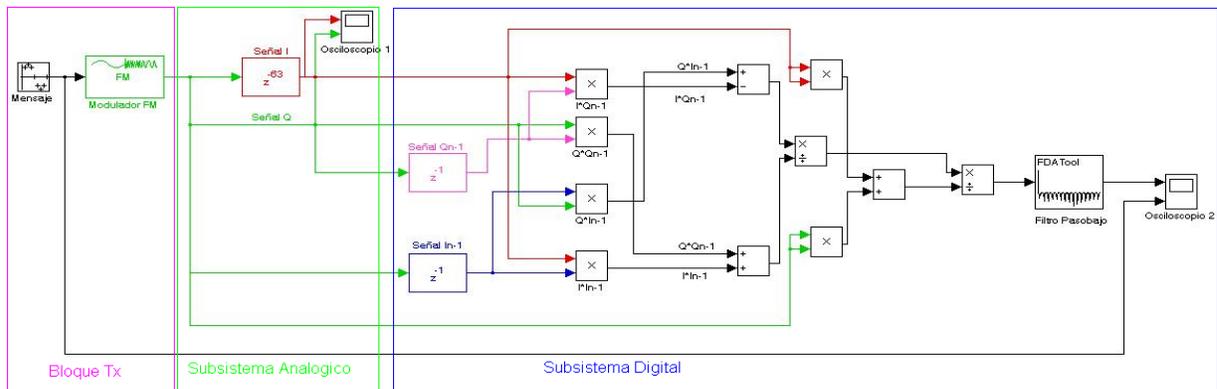


Figura 3.16 Esquema del Modulador/Demodulador FM.

3.4.1 SUBSISTEMA ANALÓGICO

Para obtener el desfase de 63 muestras se tiene en cuenta los parámetros siguientes:

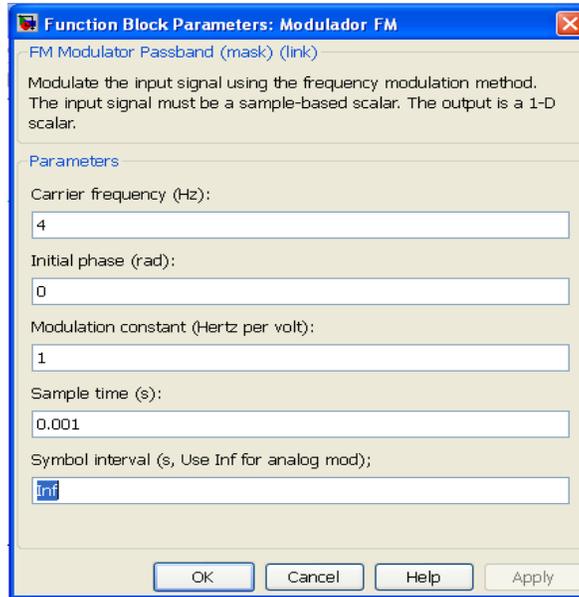


Figura 3.17 Parámetros del bloque Modulador FM.

Datos:

$$f_{portadoraFM} = 4Hz$$

$$t_{una.muestra} = 0.001s$$

Siendo:

$$T = \frac{1}{f_{portadoraFM}} = 0.25s \quad 3.6$$

$$\#_{de.muestras} = \frac{T}{t_{una.muestra}} = 250muestras \quad 3.7$$

Calculando el número de muestras necesarias para desfasar la señal como:
 $250muestras / 4 = 62.5muestras \approx 63muestras$.

En la figura 3.18 se observan las señales I y Q, constatándose el desfasaje de 90 grados.

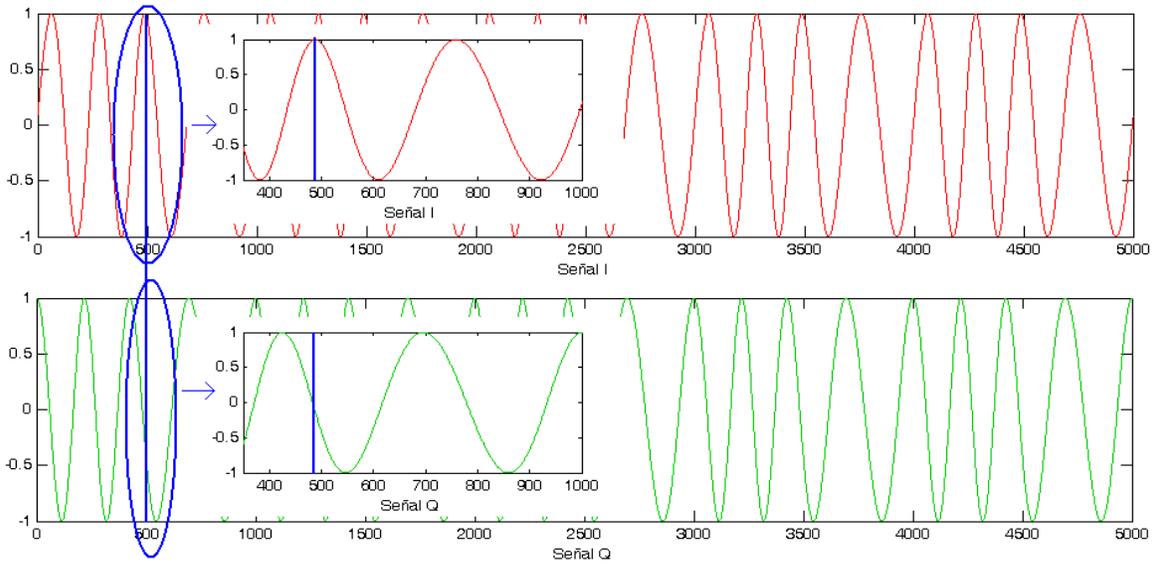


Figura 3.18 Señales I y Q.

3.4.2 SUBSISTEMA DIGITAL

Como se muestra a continuación el subsistema digital está formado por la ecuación 2.15 del capítulo 2 y un filtro pasabajo.

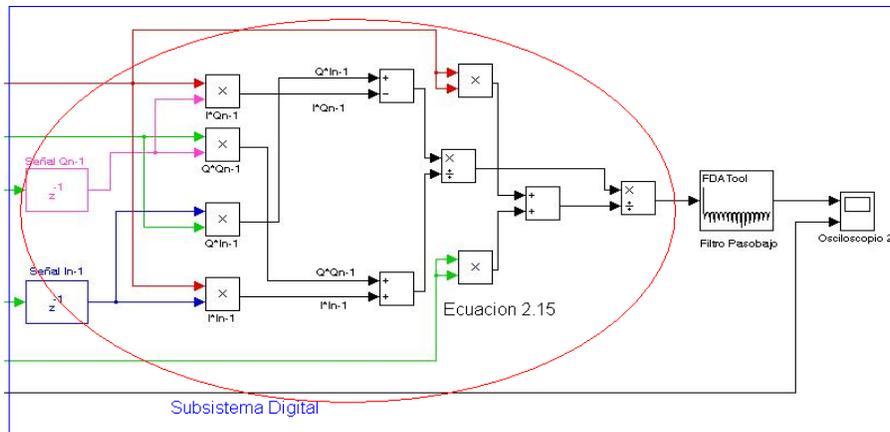


Figura 3.19 Diagrama del Subsistema Digital.

Luego de filtrada la señal se observan las semejanzas entre el mensaje original y el obtenido.

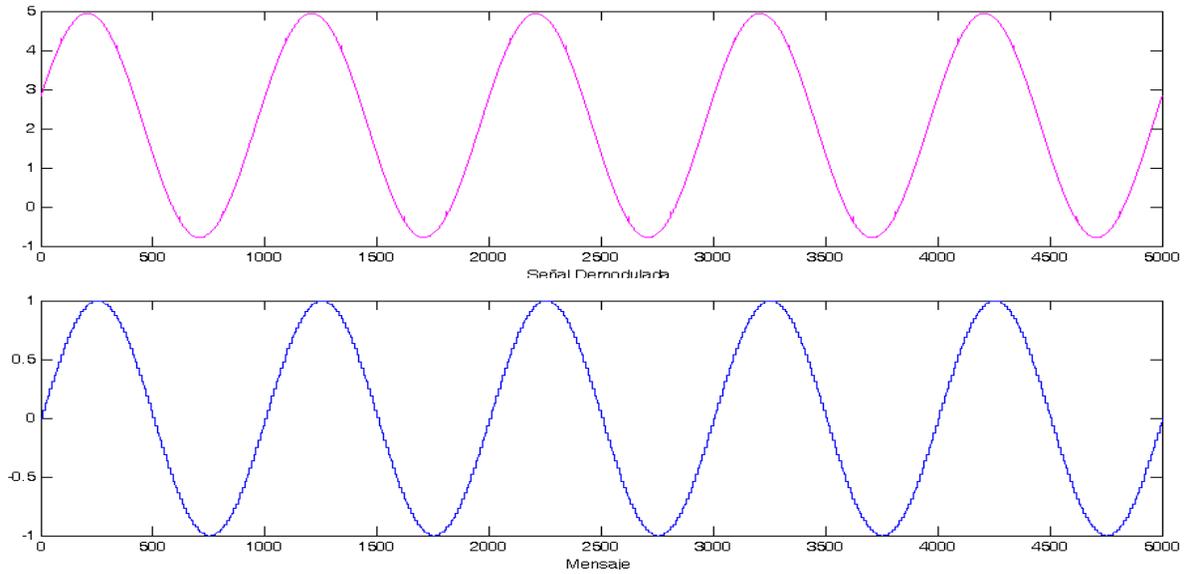


Figura 3.20 Mensaje y Señal demodulada.

3.5 CONSIDERACIONES FINALES

En este Capítulo se analizan los diagramas en bloque obtenidos en la herramienta Simulink del MATLAB. Los esquemas están apoyados en los algoritmos matemáticos que son mostrados en el Capítulo 2 de este trabajo. En el Anexo 2 se muestran otros esquemas que realizan la misma función de modulación AM pero la obtención de las señales I y Q se hacen de forma diferente.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio teórico sobre el surgimiento, definición y actual desarrollo de la Radio Definida por Software.

Este estudio arrojó que a partir de la década del 90 del siglo pasado se comenzó a manejar el término de Radio Definido por Software, siendo de interés de todas las entidades relacionadas con las radiocomunicaciones, ya sean estatales o particulares (radioaficionados).

Son muchas las definiciones encontradas en la bibliografía, pero concluyendo esta parte de la investigación se puede desarrollar una definición propia que resume los aspectos más importantes de los sistemas SDR estudiados y que sirve de punto de partida para la realización de los laboratorios de este tema.

En la revisión bibliográfica se encontraron muchas características las más referenciadas son la flexibilidad, la capacidad de reconfiguración y actualización, ya que estas aportan componentes importantes en el análisis del por qué esta tecnología se ha impuesto ante los radios convencionales analógicos, y se utiliza en diversos ambientes comerciales y científicos.

De este trabajo se puede concluir que aunque existen diferentes formas de implementación de estos radios, para que la señal tenga más potencia y sea transmitida a mayor distancia es necesaria la utilización de un hardware analógico que permite la alimentación de la antena, el filtrado y combinación de la señal RF y la potencia en la etapa final o inicial del radio; en caso de que sea un radio transmisor o radio receptor.

De estos radios se realizó un estudio más profundo en el que se encontró que los SDR que utilizan el hardware adicional implementan sus modulaciones mediante las señales I y Q, ya que es así como es transmitida la señal del hardware al software.

En este estudio se encontró que los SDR pueden utilizar diferentes modulaciones, ya sean analógicas como AM, PM y FM o digitales como PSK, y que todos estos

procesos de modulación/demodulación son realizados mediante algoritmos matemáticos en el software.

En este trabajo además se realizó la implementación de los algoritmos matemáticos que se utilizan en las modulaciones analógicas AM, PM y FM.

Para realizar esta tarea se utilizó la herramienta matemática MATLAB, específicamente una de sus aplicaciones el Simulink. Esta herramienta permite recrear en un ambiente de diagramas en bloques el radio y el canal de transmisión.

Como resultado de este trabajo se obtuvieron simulaciones que pueden ser utilizadas con fines docentes en la facultad de Ingeniería Eléctrica. Al utilizar los diagramas en bloques se permite una mayor comprensión por parte de los estudiantes de los mecanismos de funcionamiento de este proceso de modulación/demodulación. Estos resultados pueden ser utilizados para complementar conocimientos que se impartan sobre los SDR, en las asignaturas de la Disciplina Teoría de la Comunicaciones de la carrera Telecomunicaciones y Electrónica.

RECOMENDACIONES

Como parte de este trabajo se obtuvieron archivos de simulación en la herramienta matemática MATLAB, con el objetivo de que estos sean utilizados para complementar temas impartidos en clases. Se recomienda que se amplíe el estudio del tema de SDR en las asignaturas de la Disciplina Teoría de la Comunicaciones con el objetivo de utilizar estos ficheros como material de apoyo en los laboratorios de la asignatura.

Durante la etapa de confección de este trabajo se tuvieron en cuenta los procesos de modulación/demodulación para el caso de los SDR que utilizan las señales I y Q. Se recomienda que en futuros trabajos se estudien otras etapas de los SDR y este mismo proceso para otros radios que no utilicen estas señales.

En este trabajo se trabajó en las modulaciones analógicas AM, PM, y FM, para SDR. Se recomienda que se amplíe el estudio para el caso de las modulaciones digitales, y así poder brindarle al estudiante una información más ampliada y diversa, para que estén mejor preparados una vez que salgan al ámbito laboral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGORA, C. M. G. 2011. *Radio Definido por Software usando MATLAB*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
- BLOOM, A. 2007. *DSP and Software Radio Design*.
- BLOSSOM, E. 2011. *GNU Radio: the open-source software defined Radio* [Online]. Disponible en: <http://dev.emcelettronica.com/gnu-radio-open-source-software-defined-radio>
<http://gnuradio.org/redmine/wiki/gnuradio>.
- C. RICHARD JOHNSON, J. & SETHARES, W. A. 2003. *Telecommunications Breakdown. How I Learned to Stop Worrying and Love the Digital Radio*. 1ra ed. NJ: Prentice Hall: Upper Saddle River.
- CARLSON, A. B. 2002. *Communication Systems*, New York, McGraw-Hill.
- COUCH, L. W. 2002. *Digital and Analog Communication Systems*. 5ta ed.: Prentice -Hall International.
- CUMMINGS, M. & HARUYAMA, S. 1999. *FPGA in the Software Defined Radio*.
- FERNANDEZ, J. D. 2011. *SDR ¿Que es SDR? Software Defined Radio* [Online]. Radioaficion Ham Radio. [Accessed 2013].
- FORUM, T. W. I. 2012. *Software Defined Radio* [Online]. The Wireless Innovation Forum. Disponible en: http://www.wirelessinnovation.org/page/Introduction_to_SDR.
- HARMAN, P. & IRELAND, S. 2009. *Software Defined Radio. The Radio Communication Handbook*.
- ISLAM, M., HANNAN, M. A., SAMAD, S. A. & HUSSAIN, A. 2009. *Modulation Technique for Software Defined Radio Application. Australian Journal of Basic and Applied Sciences*.
- KENINGTON., P. B. 2005. *RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio*.
- LATHI, B. P. 1998. *Moderrn Digital and Analog Communication*, New York Oxford, Oxford University Press.
- LATHI, B. P. 2003. *Introducción a la Teoría y Sistemas de Comunicaciones*, México, Limusa Noriega Editores.
- MÁRQUEZ, J. E. B. 2005. *Principio de las Comunicaciones*. 3ra ed. Mérida: ULA.
- MITOLA, J. 2000. *Software Radio Architecture: Object oriented approaches to wireless systems engineering.*, Nueva York, John Wiley & Sons, Inc.
- PARADIGM SOFTWARE GROUP, I. 2011a. *Getting Started With the SDR-1000™* [Online]. TX.USA: FlexRadio Systems.
- PARADIGM SOFTWARE GROUP, I. 2011b. *undefinedFlexRadio PowerSDR™ Features and Capabilities* [Online]. TX.USA: FlexRadio Systems.
- PERNTER, M. 2012. *PM-SDR Home Page* [Online]. Disponible en: <http://www.iw3aut.altervista.org/>.
- QUICKSILVER. 2011. *QSIR Software Defined Receiver* [Online]. Ohio.USA: Software Radio Laboratory LLC. Disponible en: <http://www.srl-llc.com>.
- QUINTERO, A. G., BETANCOUR, C. A. C. & GIL, L. D. S. 2006. *SDR: La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico*

- ROUPHAEL, T. J. 2009. RF and Digital Signal Processing for Software-Defined Radio. Oxford: Elsevier.
- RUBENSTEIN, R. 2011. "SOFTWARE-DEFINED RADIO: Softly does it. *Technology Trends* [Online]. Disponible en: http://data.memberclicks.com/site/sdf/tut-SDR_article.pdf.
- SMITH, D. 1998. Signal, Samples and Stuff: A DPS Tutorial (Part 1). 14.
- STREMLER, F. G. 1993. *Introducción a los Sistemas de Comunicaciones*, Addison Wesley Iberoamericana S.A.
- TECHNOLOGY, N. R. I. C. 2006. *DRB 30 DiRaBox Digital Radio Box* [Online]. Software Defined Radio - NTi Rudolf Ille Communications Technology.
- TECHNOLOGY, W. 2002. *Software Defined Radio, White paper* [Online]. Disponible en: <http://www.broadcastpapers.com/whitepapers/WiproSDRadio.pdf?CFID=21641525&CFTOKEN=8a40b0992d28a1b2-DA5CFA3B-BA4B-0FDA-98280E8307D8724F>.
- TOMASÍ, W. 2003. *Sistema de Comunicaciones Electrónicas*. 4ta ed.: Prentice Hall.
- WINRADIO. 2012. *WR-G31DDC 'EXCALIBUR'* [Online]. WinRADiO Communications. Disponible en: <http://www.winradio.com/home/g31ddc.htm>.
- YOUNGBLOOD, G. 2002. A Software-Defined Radio for the Masses. Part 1.

ANEXO 1

DiRaBox DRB 30

Realiza la conversión de la señal de RF a baja frecuencia IF adecuada para la PC. Puede trabajar con frecuencias de 30 KHz a 30 MHz.



Figura 1.1 SDR DiRaBox DRB 30. Vista frontal y trasera.

EasySDR

Es un SDR desarrollado por Microsat. Tiene un rango de frecuencia de 64-1700MHz, con 48kb/s de ancho de banda de audio.



Figura 1.2 EasySDR de Microsat.

PM-SDR

Desarrollado por Martin Pernter, utiliza el software libre WinRad de Jeffrey Pawlan, así como otros programas para funcionar en Linux. Se conecta por USB y puede configurarse en el rango de 100kHz - 50MHz. Entrega señales I y Q de audio a la PC.



Figura 1.3 PM-SDR.

QS1R

Receptor creado por *QuickSilver*. Conectividad a la PC a través de una interfaz USB2.0. Utiliza el rango de frecuencias de 10 KHz a 62.5 MHz, que puede ser ampliado hasta 500 MHz con el empleo de sobremuestreo. Tiene un alto rendimiento y versatilidad. Utiliza Altera EP3C25 Cyclone III FPGA.



Figura 1.4 Receptor QS1R de *QuickSilver*. Vista frontal y trasera.

PERSEUS

Creado por la firma italiana Microtelecom. Envía señales digitalizadas I y Q a través de una conexión USB 2.0. Se apoya en la tarjeta de sonido de la PC. Tiene una velocidad de muestreo de 80 MHz y 14 bits de resolución, ello permite que cubra perfectamente y digitalice todo el ancho de banda de 10 KHz a 30 MHz simultáneamente. Ofrece un alto rendimiento basado en FPGA. [16]



Figura 1.5 SDR PERSEUS de Microtelecom.

WR-G31DDC 'EXCALIBUR'

Creado por WiNRADiO, es un receptor de onda corta entre 9KHz y 50 MHz. Incluye un analizador de espectro de tiempo real de 50MHz de ancho de banda y su sensibilidad ronda los 0.35 μ V. Posee interfaz USB 2.0.



Figura 1.6 WR-G31DDC 'EXCALIBUR' de WiNRADiO.

Universal Software Radio Peripheral (USRP)

Tarjeta Madre desarrollada por GNU Radio a la que se le pueden incorporar otras tarjetas para darle funcionalidad. Tiene una versión mejorada, USRP2. Es uno de los SDR más potentes que se pueden encontrar en la actualidad y emplea software libre. Tiene interfaz USB2.0 y FPGA *on-board*.

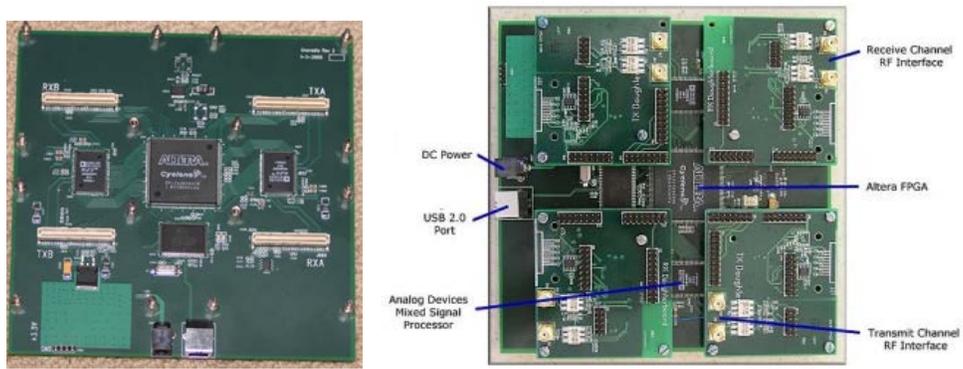


Figura 1.7 USRP fabricado por GNU Radio.

ANEXO 2

Ejemplo de Bloque Modulador AM.

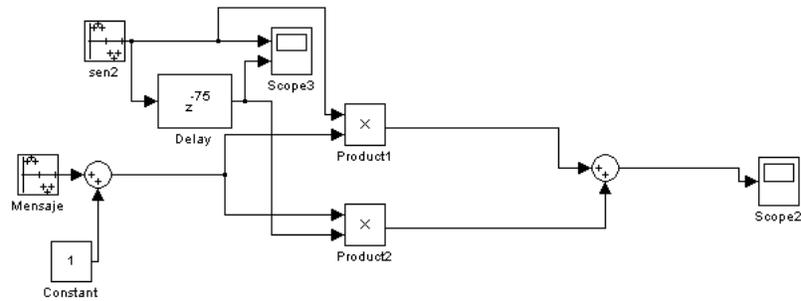


Figura 2.1 Modulador AM.

Ejemplo de Modulador/Demodulador AM.

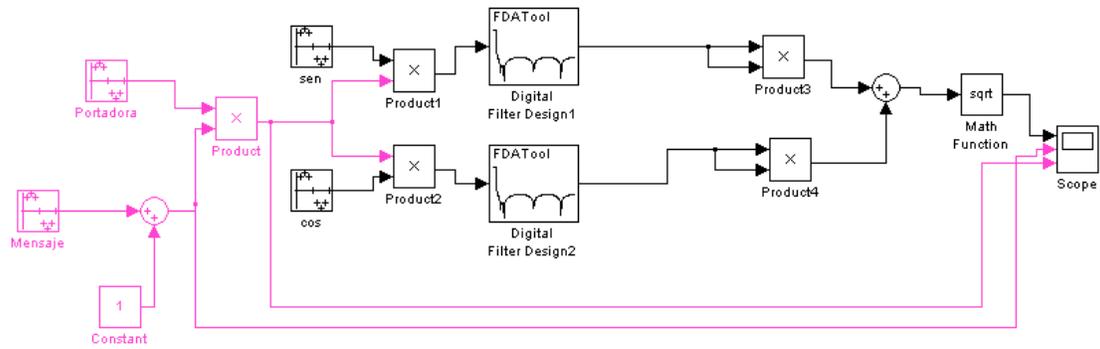


Figura 2.2 Modulador/Demodulador AM.