

**ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE LA MODULACIÓN QPSK EN EL
USRP COMO HERRAMIENTA DIDACTICA EN LA ENSEÑANZA
DE TELECOMUNICACIONES.**

Por

Jesús Espinoza Hernández

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS

en

INGENIERÍA EN ELECTRONICA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS E INGENIERIA

Agosto, 2010

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA MODULACIÓN QPSK EN EL USRP COMO HERRAMIENTA DIDÁCTICA EN LA ENSEÑANZA DE TELECOMUNICACIONES.

Autor: Jesús Espinoza Hernández
Tutor: M.C. Susana Burnes Rudecino

RESUMEN

Este proyecto de tesis analiza el desempeño de la plataforma USRP (Universal Software Radio Peripheral) como herramienta para el estudio de las modulaciones digitales y el concepto de radio reconfigurable por software en un ambiente académico. La caracterización del sistema se realizó utilizando el software *GNURadio*. Se implementó un modem de una sola vía utilizando la técnica de modulación QPSK (modulación por corrimiento de fase en cuadratura) para transmitir datos generados por medio de un archivo y se evaluó su desempeño observando gráficamente su espectro y la constelación de fases así como también su densidad espectral de potencia. La transferencia del archivo se realizó a diferentes tasas de bits para determinar la máxima velocidad de transferencia confiable entre la PC y el USRP y analizar su tasa de error de bit utilizando un cable coaxial como medio de transferencia.

Palabras Clave: Modulador, Demodulador, Radio reconfigurable por software, USRP, QPSK

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF THE USRP PLATFORM USING THE QPSK MODULATION SCHEME AS A TOOL FOR TEACHING TELECOMMUNICATIONS

Author: Jesús Espinoza Hernández
Advisor: M.C. Susana Burnes Rudecino

ABSTRACT

This thesis project analyses the performance of the USRP (Universal Software Radio Peripheral) as a tool for the study of digital modulation techniques and the software defined radio concept. The characterization of the system was done using the open source GNURadio software. A one-way modem was implemented using QPSK modulation (Quadrature Phase Shift Keying) to transmit generated data from a file and its performance was evaluated by analyzing its spectrum and signal constellation as well as its power spectral distribution. The file transmission was done at different bitrates to determine the maximum reliable transfer rate between the host PC and the USRP as well as analyzing its bit error rate over a wired coaxial medium.

Keywords: Modulator, Demodulator, Software defined radio, USRP, QPSK

Índice general

	<u>pagina</u>
RESUMEN EN ESPAÑOL	II
ABSTRACT ENGLISH	III
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
Índice de acrónimos	IX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Importancia del estudio	3
1.5. Objetivos	4
1.6. Metodología	4
2. Fundamentos teóricos	5
2.1. Concepto de señal	5
2.2. Sistema de comunicaciones digitales	7
2.3. Concepto de modulador	9
2.4. Envolvente compleja	10
2.5. El ruido como factor de degradación de la señal transmitida	10
2.6. Concepto de demodulador	12
2.7. Modulación QPSK	15
2.8. Tasa de error de bits QPSK	19
2.9. Herramientas de medición de desempeño	19
2.9.1. Diagrama de ojo	19
2.9.2. Espectrograma	21
2.10. Concepto de radio reconfigurable por software	21
3. Estudio de la plataforma USRP y GNURadio	25
3.1. Estructura del sistema USRP	25
3.2. GNURadio	32
3.3. Programación en GNURadio con Python	33
3.4. Descripción del experimento	37
3.4.1. Hardware utilizado	37

3.4.2. Código fuente de GNURadio	38
4. Resultados	41
APENDICES	42
A. Instalación del ambiente de desarrollo	43
Referencias	51

Índice de figuras

<u>Figura</u>	<u>pagina</u>
2-1. Ejemplo de una señal continua y una señal discreta	6
2-2. Diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones digitales	8
2-3. Función de densidad de probabilidad de la distribución Gausseano . . .	11
2-4. Diagrama simple de un demodulador.	13
2-5. Probabilidades condicionales de las funciones $p(z s_1)$ y $p(z s_2)$	15
2-6. Diagrama de constelación para la modulación BPSK	17
2-7. Diagrama de constelación de la modulación QPSK	18
2-8. El diagrama de ojo formado al sobreponer varias secuencias de bits . .	20
2-9. Parametros de medición del diagrama de ojo.	20
2-10.Ejemplo de un espectrograma.	21
2-11.Diagrama a bloques de un sistema ideal de SDR	22
2-12.Hardware proporcionado por Rockwell Collins para el cluster JTRS (Mchale, 2004)	23
2-13.Diagrama a bloques de un nodo del sistema Hydra (Wireless Comm Group, 2007)	24
3-1. Placa principal del USRP.	26
3-2. Estructura del DDC implementado en el USRP	29
3-3. Respuesta a la frecuencia del filtro CIC de 4 etapas y $R = 4$	30
3-4. Respuesta a la frecuencia del filtro de media banda	31
3-5. Ejemplo de una grafica de flujo en <i>GNURadio</i>	34
3-6. Grafica de flujo del programa ejemplo.	37
3-7. Árbol de directorios de los ejemplos que ofrece <i>GNURadio</i>	39
3-8. Relación de modulos del ejemplo <i>benchmark</i> de <i>GNURadio</i>	40

A-1. Opciones del instalador <i>Wubi</i>	44
A-2. Menú de arranque con la opción de <i>Ubuntu</i>	45
A-3. Escritorio <i>GNOME</i> de la distribución <i>Ubuntu</i>	45
A-4. Administrador de software Synaptic	48

<u>Tabla</u>	Índice de tablas	<u>pagina</u>
2-1. Ejemplos de señales		7
3-1. Tarjetas auxiliares que soporta el USRP.		27
3-2. <i>Endpoints</i> implementados por el controlador FX2		28
A-1. Dependencias requeridas para la instalación de <i>GNURadio</i>		47

Índice de acrónimos

ADC	Convertidor Analogo a Digital.
AWGN	Ruido Blanco Gaussiano Aditivo.
BPSK	Modulación por corrimiento de fase binaria.
CIC	Filtro Peine Integradores en Cascada.
DAC	Convertidor Digital a Analogo.
DDC	Convertidor Digital de Frecuencia hacia Abajo.
DSP	Procesador Digital de Señales.
DUC	Convertidor Digital de Frecuencia hacia Arriba.
FPGA	Field Programable Gate Array.
HB	Filtro de media banda.
ISI	Interferencia entre símbolos.
NCO	Oscilador controlado numericamente.
PCI	Interconexión de Componentes Perifericos.
PCIe	Interconexión de Componentes Perifericos express.
QPSK	Modulación por Corrimiento de Fase en Cuadratura.
SDR	Radio Reconfigurable por Software.
SMA	Conector coaxial SubMiniatura version A.
SNR	Relacion Señal a Ruido.
USRP	Periférico Universal de Radio Definido por Software.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El proyecto que se documenta evalúa la plataforma USRP como herramienta útil para la enseñanza de las técnicas de modulación digital. La evaluación consiste en introducir alguna secuencia de datos al sistema (aleatoria, datos extraídos de un archivo, etc.), generar la modulación y demodulación para la transmisión y observar los resultados.

Los sistemas de de comunicaciones digitales implementados en su mayor parte por software se les conocen como Radios Definidos por Software(SDR) ([Mitola, 1992](#)). El sistema se desarrolló dentro de la plataforma Linux, utilizando el software *GNURadio*.

1.1. Antecedentes

Gracias a los avances tecnologicos recientes, han surgido varios esfuerzos por desarrollar plataformas versátiles para la implementación de SDRs. La complejidad de los algoritmos de modulación, codificación, filtrado, etc., los hacen buenos candidatos para ser implementados en DSPs como el C6711 de la Texas Instruments ([Abendroth, 2003](#)).

Existen varias soluciones comerciales que ofrecen un nivel más avanzado y completo para la investigación y desarrollo de aplicaciones de comunicaciones basadas en SDR. Pentek ofrece plataformas basadas en la interfaz PCI y PCIe entre otras ([Inc., 2009](#)). Estas plataformas utilizan FPGAs de Xilinx para implementar los bloques de DDC y DUC, as como también filtros de interpolacin. La compañía ofrece drivers

para Windows y Linux, ofreciendo así mucha flexibilidad de escoger un ambiente adecuado para el desarrollo de la aplicación.

El mundo de *Open Source* también ha realizado avances notorios en este ramo de investigación. El proyecto más sobresaliente es *GNURadio* ([GNURadio, 2009](#)). Este proyecto consiste en una librería extensa con varias funciones matemáticas, así como también funciones para la implementación de algoritmos de procesamiento digital de señales, basada en los lenguajes Python y C++. La librería motivó el desarrollo de un dispositivo de bajo costo, conocido como el USRP por sus siglas en inglés *Universal Software Radio Peripheral*, con el propósito de utilizarlo para la transmisión y recepción de varios tipos de señales generados por *GNURadio* ([LLC, 2009](#)). Este dispositivo está también basado en un FPGA y un par de ADCs y DACs respectivamente. La señal es enviada a la PC por medio del puerto USB utilizando el controlador CY7C68013 de la compañía Cypress. A pesar de ser un sistema *Open Source*, el USRP y *GNURadio* han sido utilizados en diversos campos de investigación y desarrollo como académicos, comerciales, militares y gubernamentales.

1.2. Planteamiento del problema

Los conceptos del área de comunicaciones digitales utilizan teoría matemática que a veces es difícil de visualizar sin una forma de poder utilizar estos conceptos de una manera práctica. Los ambientes de desarrollo, como Matlab, proporcionan la habilidad de poder realizar estudios y prototipos de estos conceptos y sistemas utilizando modelos matemáticos que aproximan el comportamiento real de un sistema de comunicaciones. Físicamente no es posible ver los efectos de la teoría sin una implementación real del sistema y el equipo que se utiliza para lograrlo (analizadores de espectro, antenas, analizadores de sistemas de comunicaciones, DSPs, etc.) son relativamente caros lo cual hace difícil una implementación real.

1.3. Justificación

El estudio de los conceptos de comunicaciones normalmente ha sido dado de una manera teórica. En la mayoría de las instituciones se realizan simulaciones en Matlab o en algún otro ambiente de desarrollo. Estos paquetes proporcionan datos simulados del estudio en cuestión, ya sea la transmisión de alguna señal o el análisis de algún canal de transmisión. El USRP ofrece la oportunidad de llevar a cabo estos conceptos a un ambiente más práctico, es decir, los datos obtenidos del estudio son de los efectos reales de una implementación física de un sistema de comunicaciones. El ambiente de desarrollo *GNURadio* ofrece incluso un ambiente amigable y sencillo de utilizar ya que el lenguaje de programación utilizado, Python, es muy similar al estilo de programación de Matlab.

1.4. Importancia del estudio

El estudio de una plataforma más amigable y más dinámica para el entendimiento de los conceptos de comunicaciones digitales es de gran importancia para el desarrollo académico del alumno que estudia dichos temas. Estos conceptos son normalmente estudiados dentro de ambientes de simulación para ver sus efectos y comprobar de forma analítica la teoría. La habilidad de poder llevar estos análisis teóricos a la práctica ofrece la oportunidad importante de poder visualizar los resultados obtenidos en la simulación en una implementación real donde se puede observar con mayor exactitud los efectos y resultados que se están estudiando. La plataforma USRP ofrece una versatilidad muy amplia para el estudio de sistemas de comunicación digital que fácilmente se pueden llevar a una implementación a mayor escala. Con esto, la importancia de este estudio se vuelve más evidente cuando el alumno que utilice esta plataforma pueda llevar sus conocimientos básicos a la práctica e implementar un sistema de comunicaciones completo de una manera rápida y sencilla.

1.5. Objetivos

Los objetivos del presente proyecto son los siguientes:

- Implementar la modulación y demodulación QPSK en el sistema USRP.
- Graficar la SNR del rendimiento del sistema.
- Cálculo de la tasa de error de bit.
- Cálculo y gráficas de densidad espectral de potencia.
- Diagrama de ojo y de constelación del esquema de modulación.

1.6. Metodología

La metodología a seguir es la siguiente:

- El desarrollo se llevara a cabo en el sistema operativo Linux utilizando el software *GNURadio*.
- Instalación del sistema operativo y el software.
- Validación de la instalación. Ejecución de programas de prueba proporcionados por *GNURadio*.
- Estudio de los bloques de procesamiento de *GNURadio*.
- Experimentos con el sistema USRP.
- Generación de gráficas para medir y visualizar los resultados de los experimentos.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Concepto de señal

Una señal se puede definir como una cantidad que se puede medir a través del tiempo. Esta cantidad puede representar diversas cosas dependiendo de la aplicación. Las señales pueden ser de dos tipos: análogas ó discretas. Las señales análogas, o también conocidas como continuas, se pueden definir como una función de valores reales o complejos, las cuales están definidas dentro de un intervalo de tiempo t . Este intervalo es normalmente infinito aunque también se puede acotar a un intervalo específico, dependiendo del instante de tiempo que se desea medir. Las señales discretas se definen como una función derivada de un conjunto de números acotados a un intervalo específico. Estos números son las muestras que se tomaron de la señal en tiempos discretos. Esta información es almacenada como dato digital para posteriormente ser analizado y / o manipulado. Un ejemplo de una señal continua y discreta se muestra en la figura 2-1.

Una señal puede ser determinística o aleatoria. Se le denomina determinística a una señal la cual no existe ninguna incertidumbre con respecto a su valor dentro de un lapso de tiempo. Las señales determinísticas pueden ser expresadas por ecuaciones matemáticas, tales como $x(t) = 5 \cos(10t)$. No es posible utilizar este tipo de ecuaciones para describir señales aleatorias, también conocidas como procesos aleatorios, aunque si es posible analizarlas utilizando métodos estadísticos y de probabilidad ([Sklar, 2001](#)).

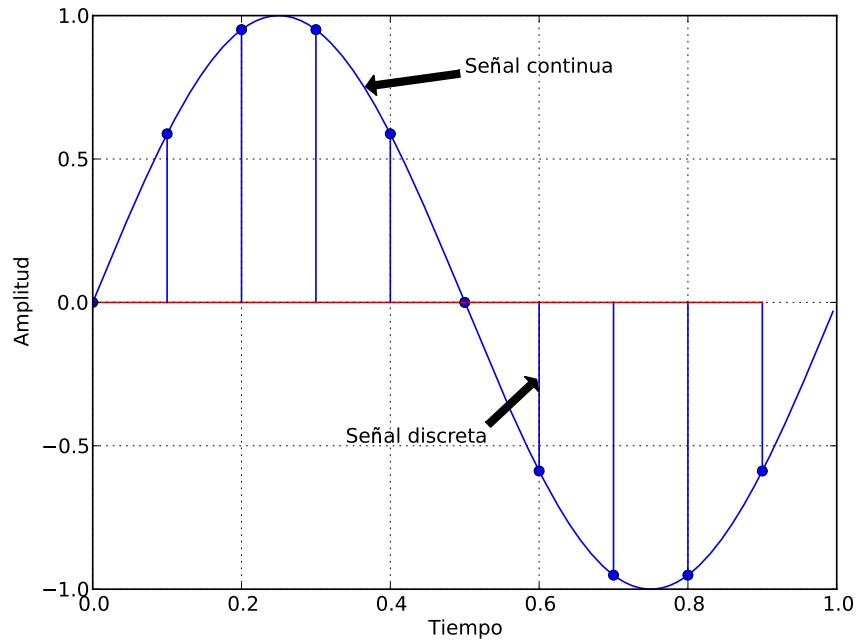


Figura 2-1: Ejemplo de una señal continua y una señal discreta

Las señales también pueden ser periódicas o no periódicas. Se dice que una señal es periódica si existe una constante $T_0 > 0$ tal que la siguiente ecuación se pueda satisfacer:

$$x(t) = x(t + T_0) \quad -\infty < t < \infty \quad (2.1)$$

donde t es el tiempo. El valor más pequeño de T_0 que pueda satisfacer la ecuación (2.1) se le conoce como el periodo de $x(t)$. Una señal a la cual no existe un valor T_0 que satisfaga la ecuación (2.1) se le denomina no periódica (Sklar, 2001).

Algunos ejemplos de varios tipos de señales se muestran en la tabla 2.1.

Variaciones en tiempo y espacio en una dimensión (1D)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Acústicos: Señales sonares, eco de murciélagos y delfines. ■ Ingeniería Electrónica: Señales emitidas por una antena de transmisión. ■ Química: Temperatura de una reacción química. ■ Finanzas: Historial del mercado de acciones. ■ Medicina: Señales de un electrocardiograma.
Variaciones en el espacio de dos dimensiones (2D)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ingeniería de Agricultura: vegetación y evaporación en un campo. ■ Geografía: temperatura de la superficie y mapas de presión. ■ Ingeniería de Tráfico: tasa de accidentes en un día de una ciudad.
Variaciones volumétricas de tres dimensiones (3D)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mecánica de fluidos: perfil de flujo-velocidad de un ala de un avión. ■ Biología: distribución CO₂ de un bioreactor.

Tabla 2-1: Ejemplos de señales

2.2. Sistema de comunicaciones digitales

Los componentes típicos de un sistema de comunicaciones digitales se muestran en la figura 2-2.

La información que se desea enviar es convertida en dígitos binarios en la etapa de Formato de Mensaje. Estos dígitos son agrupados para formar mensajes digitales o símbolos para poder asegurar compatibilidad entre la información y el procesamiento de señales dentro del sistema de comunicaciones digitales. Hasta este punto la información permanece en forma de una cadena de bits. La modulación transforma

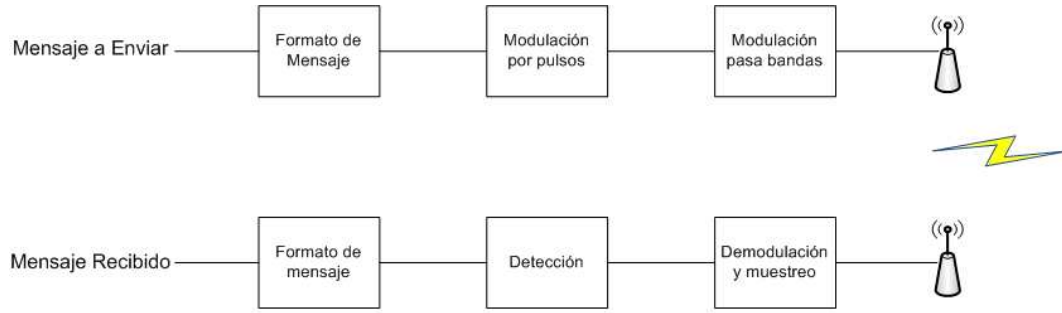


Figura 2-2: Diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones digitales

los símbolos del mensaje en formas de onda compatibles con el canal de transmisión. El bloque modulación por pulsos es importante porque los símbolos deben ser convertidos de una representación binaria a una señal banda base. Este término se refiere a una señal cuyo espectro va desde 0 (o casi 0 o dc) hasta un valor finito, normalmente menos de unos cuantos megahertz. Para una aplicación que involucre la transmisión por RF, el siguiente bloque es requerido cuando el canal no soporta la propagación de señales en forma de pulsos. Para tales casos se requiere la presencia de señales pasa bandas. Este término se refiere a una señal banda base cuya frecuencia es traducida por una señal portadora a una frecuencia mucho mayor que su frecuencia original. La señal recibida puede ser interpretada como

$$r(t) = s_i(t) * h_c(t) + n(t) \quad i = 1, \dots, M \quad (2.2)$$

donde el operador $*$ representa una operación de convolución, $h_c(t)$ representa la respuesta al impulso del canal, $s_i(t)$ es la señal transmitida y $n(t)$ representa un proceso de ruido.

En el lado del receptor, el demodulador restablece $r(t)$ en pulsos banda base óptimamente formados $z(t)$ en preparación para ser detectados. Algunos autores utilizan el término demodulación y detección intercambiable y otros definen la demodulación como el proceso de recuperación de la forma de onda (pulso banda base),

y detección como el proceso de toma de decisión sobre el significado digital de la forma de onda.

2.3. Concepto de modulador

En el campo de las telecomunicaciones, la modulación es el proceso de variar una forma de onda periódica para enviar algún tipo de mensaje. La necesidad de modular una secuencia de datos para ser transmitida es relativa tamaño de la antena. Es posible transmitir una señal sin antes haber sido modulada, pero el tamaño de la antena para poderla transmitir sería muy grande que no sería factible la transmisión. Por ejemplo, las señales de teléfonos celulares. El tamaño de las antenas son típicamente $1/4$ de la longitud de onda ([Sklar, 2001](#)). Si consideramos una señal de 3000Hz acoplándola directamente sin haberla modulado antes, el tamaño de la antena se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 m/s}{3000 Hz} \\ \frac{\lambda}{4} &= 2.5 \times 10^4 m\end{aligned}\tag{2.3}$$

Si la señal se modula antes de enviarla con una portadora o envolvente de mayor frecuencia a la señal que se desea enviar, por ejemplo 900Mhz, el diámetro de la antena será de 8cm. Por esta razón la modulación es un paso esencial en todos los sistemas que involucran transmisión de datos por radio.

Otro beneficio que ofrece la modulación es de poder colocar la frecuencia de la señal en otra donde los requerimientos de filtrado y amplificación, entre otros requerimientos de diseño, puedan ser logrados de una manera mas eficiente. Este es el caso donde por ejemplo, en el receptor, la señal de RF que es recibida es convertida a una frecuencia intermedia (IF) para que el sistema pueda procesarla correctamente.

2.4. Envolvente compleja

La descripción de moduladores y demoduladores en la vida real se ha facilitado por el uso de la notación compleja. Cualquier forma de onda pasa banda $s(t)$ puede ser representada utilizando la notación compleja (Sklar, 2001)

$$s(t) = \text{Re}\{g(t)e^{j\theta(t)}\} \quad (2.4)$$

donde $g(t)$ se conoce como la envolvente compleja, expresada como

$$g(t) = x(t) + jy(t) = \|g(t)\|e^{j\theta(t)} = R(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.5)$$

la magnitud de la envolvente es

$$R(t) = \|g(t)\| = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (2.6)$$

y su fase es

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{y(t)}{x(t)} \quad (2.7)$$

Observando la ecuación (2.4) se dice que $g(t)$ es el mensaje de la información que se desea transmitir en forma compleja y $e^{j\theta t}$ es la envolvente en su forma compleja. El producto de estas dos representa la modulación y $s(t)$, la parte real del producto, es la forma de onda transmitida. Con esto podemos expresar $s(t)$ de la siguiente manera (Sklar, 2001)

$$\begin{aligned} s(t) &= \text{Re}\{(x(t) + jy(t))(\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t)\} \\ s(t) &= x(t) \cos \omega_0 t - y(t) \sin \omega_0 t \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.5. El ruido como factor de degradación de la señal transmitida

El proceso de demodulación consiste en recuperar la información (bits) de la señal transmitida con la menor cantidad de errores posible. Estos errores son causados por el ruido, el cual se puede definir como cualquier distorsión no deseada en la señal. Podemos considerar dos causas principales de ruido. La primera es debido

al filtrado que se emplea en el transmisor, canal y receptor. Si la función de transferencia de estos filtros no es la ideal pueden llegar a causar un fenómeno conocido como interferencia entre símbolos (ISI). La otra causa de degradación de la señal es debido a la interferencia generada por el medio ambiente incluyendo interferencia con otras señales. Existe un fenómeno natural que no se puede eliminar ni controlar denominado *ruido térmico*. Este tipo de ruido es generado por el movimiento térmico de los electrones en cualquier medio conductor. Sus características son que las amplitudes del ruido presentan una distribución gausseana caracterizada de la siguiente manera:

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-a}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.9)$$

donde σ^2 es la varianza de la muestra n . Su función de densidad de probabilidad (PDF) se muestra en la figura 2-3.

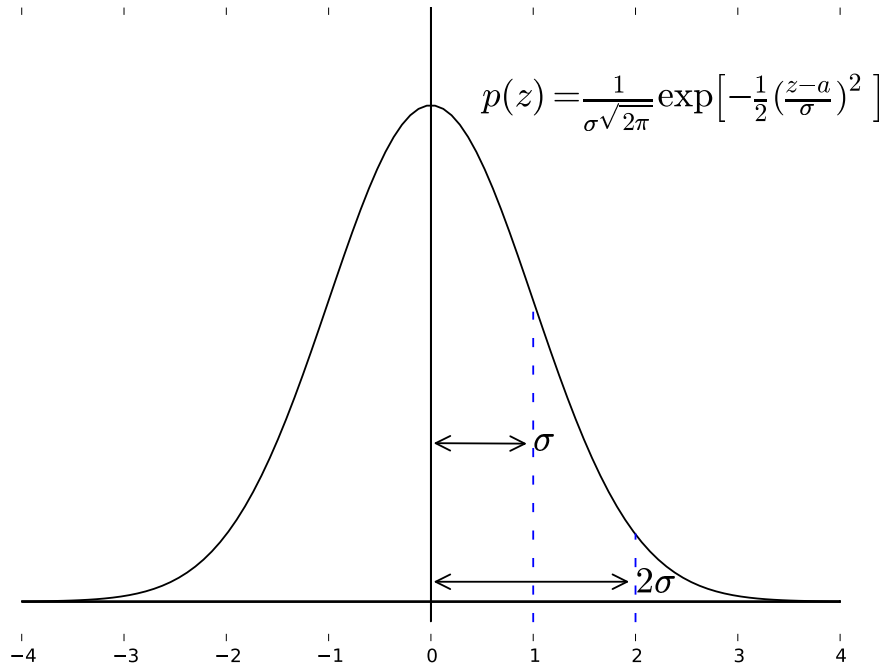


Figura 2-3: Función de densidad de probabilidad de la distribución Gausseano

Otra característica del ruido término es que su distribución de potencia es igual para todas las frecuencias, en otras palabras, su potencia esta uniformemente distribuida a través de todo el espectro. Esta característica le da el nombre ruido blanco.

Este ruido está presente en todos los sistemas de comunicación y recibe el nombre de AWGN, así agrupando todas las características anteriormente mencionadas (A de aditivo, W *white* o blanco y G de Gaussiano).

Si consideramos un sistema de comunicaciones binario que envia un 1 o un 0 en un intervalo de símbolo T

$$s_i(t) = \begin{cases} s_1(t) & 0 \leq t \leq T & \text{binario 1} \\ s_2(t) & 0 \leq t \leq T & \text{binario 0} \end{cases} \quad (2.10)$$

y le agregamos ruido aditivo blanco la señal recibida será

$$r(t) = s_i(t) + n(t) \quad i = 1, 2 \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.11)$$

donde $s_i(t)$ es el símbolo recibido y $n(t)$ es el ruido aleatorio causado por el movimiento de los electrones.

Las características del ruido AWGN son comunmente utilizadas para modelar la interferencia en el proceso de detección y tambien para el diseño de receptores, ya que este tipo de ruido siempre está presente en todos los sistemas de comunicaciones y, por lo tanto, se han desarrollado modelos de canales de transmisión que simulan el comportamiento de este tipo de ruido sobre la señal transmitida. Estos canales de transmisión se llaman canales AWGN y representan un canal donde la única causa de degradación de la señal es el ruido térmico.

2.6. Concepto de demodulador

La demodulación es el proceso inverso de la modulación y consiste en extraer la información que se transmitió de la señal modulada. El método utilizado para

llevar a cabo la recuperación de la información depende del tipo de modulación que se empleó para la transmisión. A los demoduladores también se les llama detectores. Un sistema que puede modular y demodular una señal se conoce como modem, el cual su nombre es una contracción de las palabras modulador y demodulador.

Un sistema típico de para la demodulación y detección de señales se muestra en la figura 2-4.

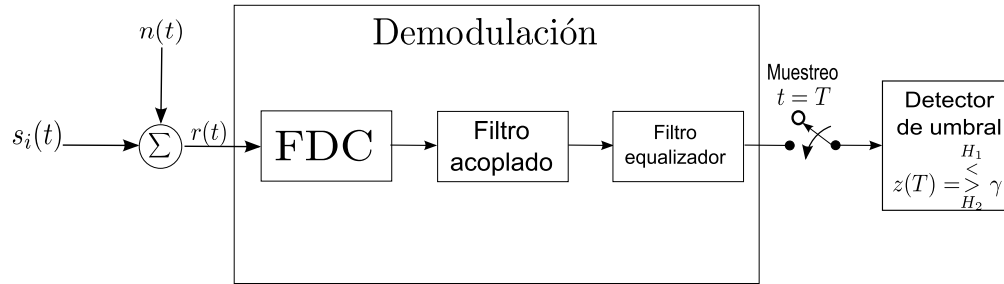


Figura 2-4: Diagrama simple de un demodulador.

Dentro de la etapa de demodulación, el bloque de conversión de frecuencia hacia abajo realiza la operación de mover la frecuencia central de la señal a otra mas baja. Esta nueva frecuencia puede ser 0 (DC) o una intermedia. Este bloque normalmente se emplea para señales de tipo pasa bandas. Su empleo es totalmente opcional ya que se utiliza para acondicionar la frecuencia de la señal a una que el sistema de detección pueda utilizar adecuadamente. El siguiente bloque implementa un filtro acoplado que se utiliza para recuperar los pulsos de banda base con la mejor tasa de señal a ruido (SNR). En algunos casos se utiliza un filtro equalizador para reducir el fenómeno de ISI inducido por el canal y se introduce despues del filtro acoplado. La mayoría de veces es preferible implementar un solo filtro que realice ambas operaciones para que de esa manera pueda compensar las distorciones generadas por ambos, el transmisor y el canal.

Asumiendo que el ruido que contiene la señal es Gauseano, la salida del demodulador en la figura 2-4 entrega la siguiente prueba estadística:

$$z(T) = a_i(T) + n_0(T) \quad i = 1, 2 \quad (2.12)$$

para un sistema binario, donde $a_i(T)$ es la señal deseada y n_0 es el ruido. Como el ruido es un proceso Gauseano aleatorio, $z(T)$ es una vareable Gauseana aleatoria que tendra una media de a_1 o a_2 dependiendo si un 1 o un 0 binario fue enviado. Con esto podemos expresar las funciones de densidad de probabilidad condicionales para cada símbolo de la siguiente manera:

$$p(z|s_1) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - a_1}{\sigma_0} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

y

$$p(z|s_2) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - a_2}{\sigma_0} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

Una representación grafica de estas probabilidades condicionales se muestra en la figura 2-5.

El eje x representa todo el rango de valores posibles que pueden ser recibidos y las distribuciones representan la densidad de probabilidad dado que s_1 o s_2 alla sido transmitido. Debido a que $z(T)$ es un voltaje proporcional a la energia del símbolo recibido, entre mas grande sea la magnitud de $z(T)$ habrá menos errores en el proceso de decisión de símbolos. Esta decisión se realiza tomando la hipotesis resultante de la medicion del umbral dada por la ecuación 2.6(Sklar, 2001):

$$z(T) \underset{H_2}{\overset{H_1}{>}} \gamma \quad (2.15)$$

donde H_1 y H_2 son dos posibles hipotesis binarias e indica que la hipotesis H_1 es la que se escoge si $z(T) > \gamma$ y H_2 se escoge si $z(T) < \gamma$. Esto es equivalente a escoger un 0 o un 1 binario dependiendo si s_1 o s_2 fue enviado.

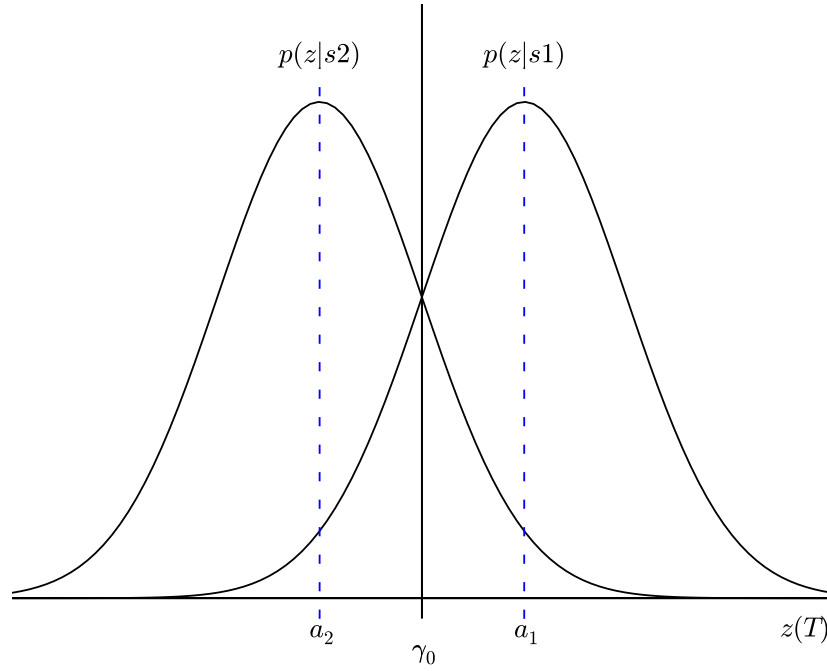


Figura 2–5: Probabilidades condicionales de las funciones $p(z|s_1)$ y $p(z|s_2)$

2.7. Modulación QPSK

Este método de modulación agrupa la información en pares de bits para ser transmitidos por un canal. Cada par representa lo que se denomina un símbolo, es decir, un posible estado que puede tomar la señal modulada. QPSK es derivada de la modulación PSK que es una de las tres principales modulaciones digitales:

- ASK = *Modulación por corrimiento de amplitud*
- FSK = *Modulación por corrimiento de frecuencia*
- PSK = *Modulación por corrimiento de fase*

La modulación PSK utiliza una cantidad finita de cambios de fase derivados de una lista de patrones de bits denominada *alfabeto*. Esta lista se determina de la siguiente manera:

$$M = 2^b \tag{2.16}$$

donde M es el total de elementos en el conjunto y b es la cantidad de bits asignados a cada elemento del conjunto. El tamaño del alfabeto lo determina la aplicación e implica consideraciones en el espacio entre símbolo en el plano complejo y la probabilidad de error de bit, y que un alfabeto muy grande aumenta la probabilidad de errores pero a su vez aumenta la eficiencia espectral de la transmisión.

La modulación PSK tiene la siguiente expresión general:

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(\omega_0 t + \phi_i(t)) \quad (2.17)$$

donde E es la energía por símbolo, T es la duración de cada símbolo, $\omega_i(t)$ es la frecuencia de la portadora y el término $\phi_i(t)$ representa los cambios de fase en la señal. Estos valores son típicamente dados por la siguiente expresión:

$$\phi_i(t) = \frac{2\pi i}{M}; \quad i = 1, \dots, M \quad (2.18)$$

donde M es la cantidad de elementos del alfabeto.

La forma más simple de PSK se llama BPSK. Este esquema utiliza un alfabeto de dos posibles valores separados por 180 grados. Estos valores se pueden observar claramente en el diagrama de constelación mostrado en la figura 2-6. Este diagrama muestra la señal en forma vectorial, proyectada en el plano complejo. La parte real se le denomina I, o componente “en fase” y la parte imaginaria se le denomina Q, o componente en “quadratura”. La señal BPSK se observa como una señal unidimensional, es decir, únicamente tiene proyección en el eje X. Cada símbolo puede modular únicamente un bit, lo cual hace esta modulación ineficiente para aplicaciones que requieran una tasa de transferencia muy alta.

QPSK es otra variación de PSK que utiliza cuatro puntos en el plano complejo y por lo tanto, se considera una señal bidimensional ya que también tiene proyección en el eje Y. Como se mencionó anteriormente, este esquema agrupa los bits en pares por cada símbolo, haciendo esta modulación espectralmente más eficiente que BPSK

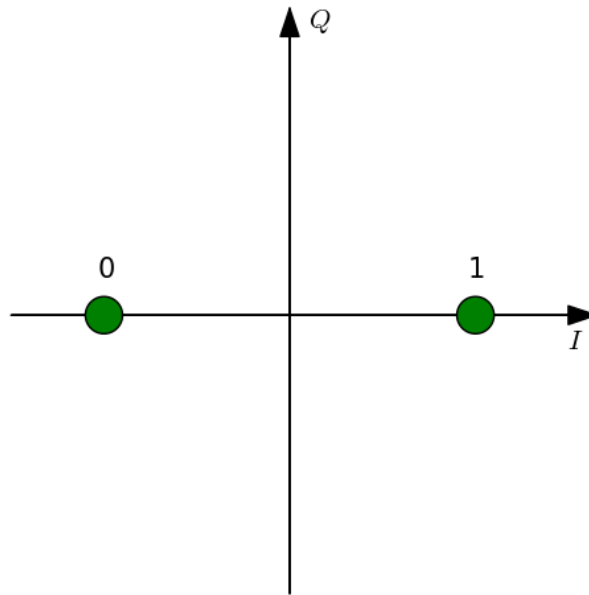


Figura 2-6: Diagrama de constelación para la modulación BPSK

ya que se puede transmitir más información utilizando el mismo ancho de banda. El diagrama de constelación se muestra en la figura 2-7.

La señal transmitida tiene la siguiente forma (Sklar, 2001)

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (2.19)$$

donde $I(t)$ y $Q(t)$ son las señales moduladas y f_0 es la frecuencia de la envolvente.

En el receptor estas dos señales son demoduladas utilizando un demodulador coherente, es decir, un demodulador que sincroniza la fase de su oscilador local con la fase de la del oscilador del modulador. Tal receptor multiplica la señal por separado con una señal seno y coseno para producir los estimados de $I(t)$ y $Q(t)$ respectivamente.

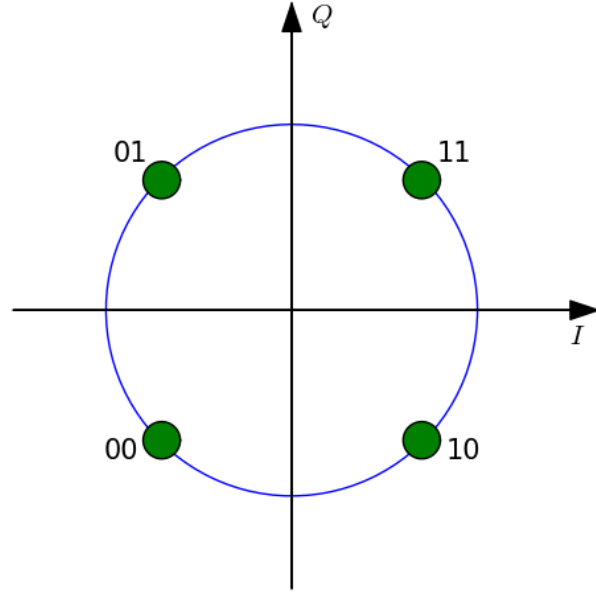


Figura 2-7: Diagrama de constelación de la modulación QPSK

Matemáticamente $I(t)$ puede ser demodulada multiplicando la señal transmitida con una señal coseno

$$\begin{aligned} r_i(t) &= s(t) \cos(2\pi f_0 t) \\ &= I(t) \cos(2\pi f_0 t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t) \cos(2\pi f_0 t) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Utilizando las identidades trigonométricas

$$\begin{aligned} \cos \theta \cos \varphi &= \frac{1}{2} [\cos(\theta + \varphi) + \cos(\theta - \varphi)] \\ \sin \theta \cos \varphi &= \frac{1}{2} [\sin(\theta + \varphi) + \sin(\theta - \varphi)] \end{aligned} \quad (2.21)$$

se puede escribir

$$\begin{aligned} r_i(t) &= \frac{1}{2} I(t) [1 + \cos(4\omega_0 t)] + \frac{1}{2} Q(t) \sin(4\omega_0 t) \\ r_i(t) &= \frac{1}{2} I(t) + \frac{1}{2} [I(t) \cos(4\omega_0 t) + Q(t) \sin(4\omega_0 t)] \end{aligned} \quad (2.22)$$

Aplicando un filtro pasa bajas a $r_i(t)$ se pueden eliminar los términos de frecuencia (los que tienen el término ω_0) dejando únicamente el término $I(t)$. Similarmente se puede multiplicar $s(t)$ por una señal senoidal y luego por un filtro pasa bajas para obtener $Q(t)$.

2.8. Tasa de error de bits QPSK

El estudio de la tasa de error de bits es de gran importancia ya que nos proporciona una medida del rendimiento del sistema de comunicaciones. Esta medida se interpreta en terminos de probabilidad de error del símbolo enviado P_E dado que fue corrompido por el ruido del canal. El ruido se puede definir como un disturbio no deseable en la señal que se está transmitiendo. Este fenómeno siempre existe en un canal de transmisión y generalmente no se puede evitar, por lo que es necesario tomarlo en cuenta durante el diseño de un sistema de comunicación.

2.9. Herramientas de medición de desempeño

Las herramientas que se mencionan en ésta sección proporcionan un panorama completo del rendimiento de un sistema de comunicaciones, ya sea de la etapa de transmisión o recepción y son ampliamente utilizadas para verificar el análisis teorico ó práctico.

2.9.1. Diagrama de ojo

Una manera eficiente de visualizar la calidad de la señal en el receptor es por medio del diagrama de ojo. Este diagrama contiene todas las posibles secuencias de bits que muestran debilidades en el diseño del sistema. Un ejemplo se muestra en la figura 2-8(Foster, 2004).

La forma convencional de generar el diagrama de ojo es por medio de un osciloscopio en modo de persistencia. Cada captura es obtenida mediante un reloj de sincronización obtenida de la misma forma de onda recibida. El modo de persistencia causara que los trazos de la onda se sobre pongan una con la otra hasta formar

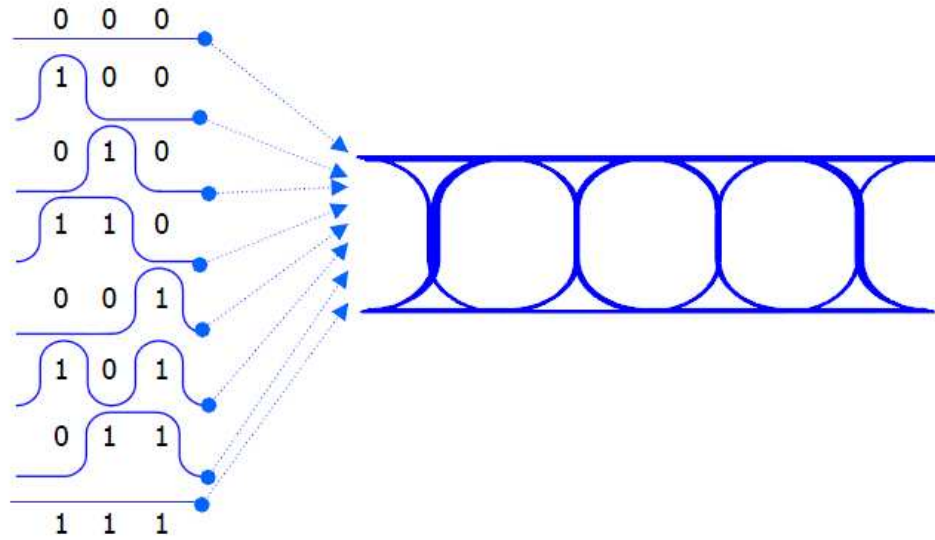


Figura 2-8: El diagrama de ojo formado al sobreponer varias secuencias de bits

el patrón de ojo sobre la pantalla. Los parametros que se pueden medir se muestran en la figura 2-9(Breed, 2005).

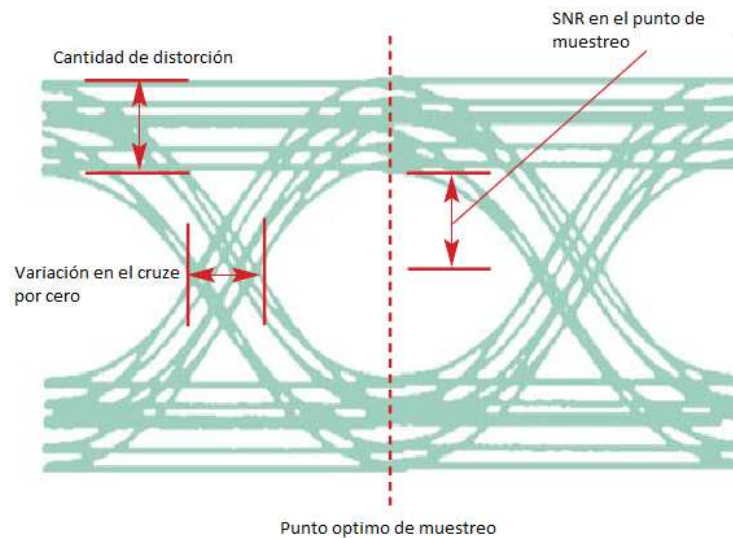


Figura 2-9: Parametros de medición del diagrama de ojo.

La distorsión en el tiempo de muestreo es generada por el fenomeno de ISI. La diferencia en tiempo pico a pico de los cruces por cero se le conoce tambien como “*jitter*”. El momento optimo para iniciar el muestreo de un símbolo es en la parte que esta mas abierta del ojo. Conforme el SNR es mas bajo el ojo comenzara

se comenzara a cerrar haciendo así más difícil y, por consecuencia, más erróneo el muestreo de la señal recibida.

2.9.2. Espectrograma

El espectrograma, también conocido como gráfica de cascada (*waterfall*), muestra las variaciones de la densidad espectral de la señal a través del tiempo. Utiliza tres parámetros para mostrar una imagen representando la distribución espectral: el tiempo, la frecuencia y la amplitud. El eje X representa el tiempo, el eje Y la frecuencia y una escala de colores muestra la intensidad de cada punto en la imagen. Los ejes X y Y pueden ser invertidos para visualizar la imagen de abajo hacia arriba. Un ejemplo de un espectrograma se muestra en la figura 2-10.

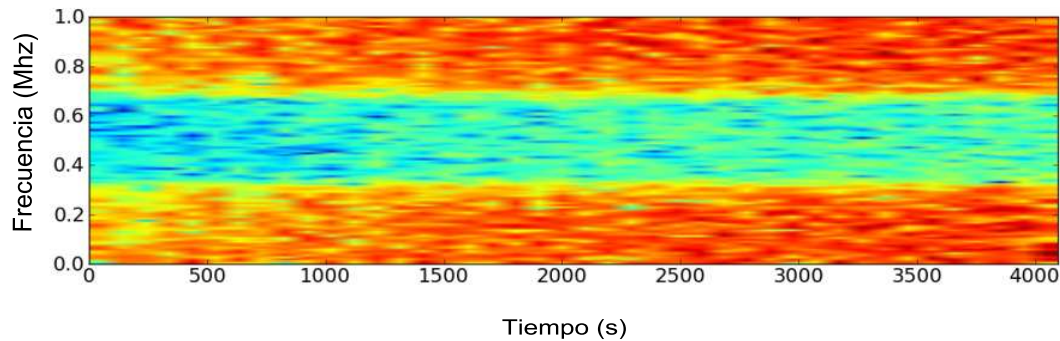


Figura 2-10: Ejemplo de un espectrograma.

2.10. Concepto de radio reconfigurable por software

El concepto del radio definido por software fue primeramente establecido por Joseph Mitola(1992). Normalmente se les llaman SDR por sus siglas en inglés (*Software Defined Radio*). Este tipo de radio consiste en reemplazar los moduladores, filtros, amplificadores, etc., de un sistema de RF típico y reemplazarlos por software. La idea principal es conectar la antena lo más cerca al procesador. Un sistema básico podría consistir en una PC, una tarjeta de sonido y alguna circuitería de RF para acoplar la antena. Un diagrama a bloques del sistema básico de un SDR se muestra en la figura 2-11. Para un sistema receptor SDR lo único que se tiene

que cambiar es el bloque de DAC por un ADC. Gracias al procesamiento digital de señales dentro del procesador, este tipo de radio puede trabajar con diferentes tipos de señales, codificaciones y modulaciones con tan solo cambiar el software. Algunas ventajas que estos sistemas ofrecen son: bajo costo, un factor de tamaño más pequeño y una mayor facilidad de mantenimiento y actualización.

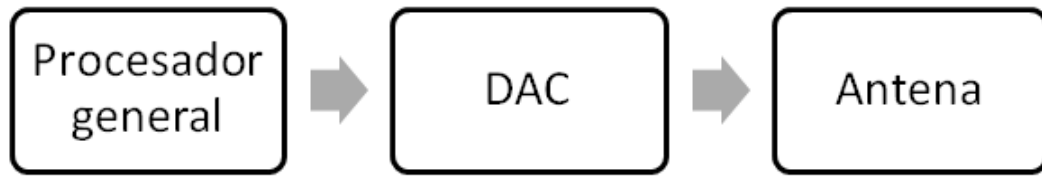


Figura 2–11: Diagrama a bloques de un sistema ideal de SDR

Los requerimientos del procesador general para la implementación de algoritmos que llevan a cabo las tareas de modulación, codificación, etc., son tan grandes que hoy en día aun no hay plataformas suficientemente poderosas para implementar el SDR ideal. Mas sin embargo, los avances tecnológicos de hoy están permitiendo el desarrollo de nuevos procesadores con capacidades suficientemente poderosas para esta aplicación en especial. Algunos procesadores como el OMAP3 de la Texas Instruments ([Instruments, 2008](#)) y los FPGAs Virtex de Xilinx ([Lyrtech, 2009](#)) ofrecen plataformas altamente flexibles y con capacidad suficiente para la implementación de algoritmos sofisticados de modulación y codificación, así como también filtrado entre otros.

Algunas de las áreas donde se aplican los conceptos de los SDRs son por ejemplo en el área militar. El sistema de comunicaciones del ejército militar de Estados Unidos está siendo remplazado por un sistema basado en SDRs con la capacidad de poder establecer un enlace sin importar el tipo de radio y con capacidad de trabajar

con diversas redes de comunicación. La ventaja principal que los líderes militares ven en el uso de SDRs es la habilidad de poder configurar el sistema para utilizar diversas capas de protocolos y formatos sin actualizar el hardware. El programa JTRS (por sus siglas en ingles *Joint Tactical Radio Systems*) es un SDR que permitirá a los soldados poder comunicarse con una amplia cantidad de redes de comunicación así como redes que utilizan arquitecturas viejas (McHale, 2004). El plan de este programa es remplazar el hardware tradicional de los radios utilizados en el ejército militar con dispositivos que puedan emular las capacidades de cualquier radio.



Figura 2–12: Hardware proporcionado por Rockwell Collins para el cluster JTRS (Mchale, 2004)

En la figura 2–12 se muestra el hardware proporcionado al ejército militar por el sector de comunicaciones de Rockwell Collins.

Otro ejemplo de una aplicación en el área académica es el proyecto Hydra de la Universidad de Texas en Austin (Group, 2007). Este proyecto consiste en un sistema de pruebas enfocado a redes que soportan múltiples saltos inalámbricos y donde la red toma ventaja de técnicas sofisticadas como OFDM y MIMO. El sistema se basa en el proyecto de *GNURadio* y su plataforma de desarrollo USRP (LLC, 2009) para la implementación de la etapa de RF y del software. La estructura de este sistema se muestra en la figura 2–13.

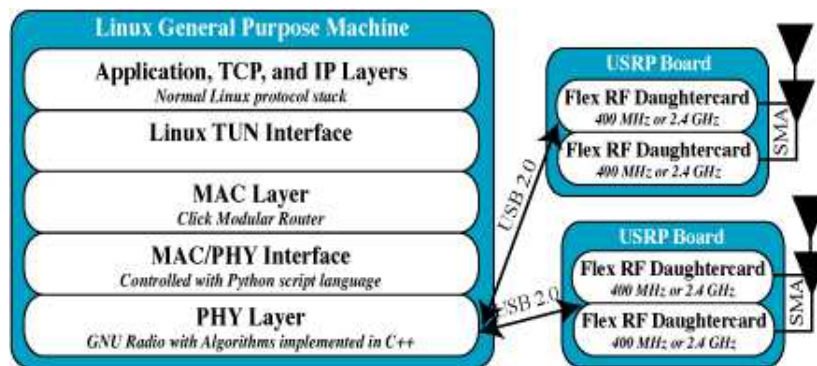


Figura 2-13: Diagrama a bloques de un nodo del sistema Hydra (Wireless Comm Group, 2007)

Capítulo 3

ESTUDIO DE LA PLATAFORMA USRP Y GNURADIO

En este capítulo se aplican los conceptos de la modulación QPSK para analizar el rendimiento de la plataforma USRP. El experimento consta de elaborar un programa que realice la modulación utilizando el lenguaje Python y *GNURadio* bajo el ambiente Linux. Este programa va interactuar con el USRP por medio del puerto USB, intercambiando la información que se transmite y recibe. El análisis será visualizado en la PC utilizando las herramientas que *GNURadio* proporciona.

La transmisión se realizará utilizando las tarjetas LFTX y LFRX. Estas tarjetas proporcionan acceso directo a las salidas del DAC y entradas del ADC respectivamente sin ningún tipo de amplificación y filtrado. Dependiendo la aplicación será necesario acoplar una etapa de RF para acondicionar la señal y poder ser transmitida correctamente.

3.1. Estructura del sistema USRP

El sistema USRP es un dispositivo que permite diseñar radios reconfigurables por software. El dispositivo es solamente una parte de la estructura completa de un SDR. Su función principal es actuar como la sección de frecuencia intermedia de un sistema de comunicaciones.

La figura 3-1 muestra los componentes que forman un sistema de comunicaciones implementado con el USRP. Todo el procesamiento en banda base, es decir, modulaciones, codificaciones, etc., es llevado a cabo en una PC x86. Esta PC contiene el programa Python que realiza todo el procesamiento digital con la señal

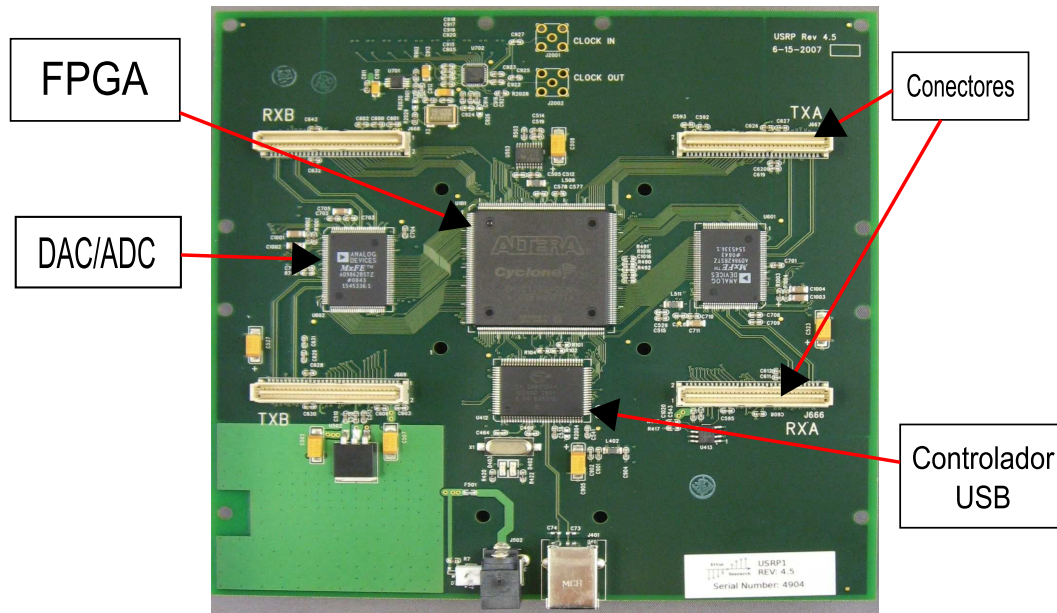


Figura 3-1: Placa principal del USRP.

o señales que se desean trabajar. Esto se lleva a cabo utilizando las herramientas proporcionadas por *GNURadio*.

Los componentes principales del USRP son el FPGA Altera Cyclone EP1C12, los codec AD9862 de alta velocidad, las interfaces de las tarjetas auxiliares y el controlador Cypress FX2 para la comunicación por el puerto USB. La tarjeta cuenta con 4 conectores donde se pueden conectar 2 tarjetas TX y 2 RX o 2 tarjetas RFX (transmisor y receptor en una sola tarjeta auxiliar). Cada tarjeta puede acceder a dos de los 4 ADC/DACs. Si la tarjeta utiliza muestreo real (sin usar IQ) entonces esto permitirá tener 2 secciones de RF independientes, para un total de 4. Si se utiliza muestreo complejo IQ entonces cada tarjeta tendrá una sola etapa de RF, para un total de 2 en todo el sistema. Cada tarjeta auxiliar tiene dos conectores SMA para transmitir o recibir señales y una EEPROM con bus de datos I2C que identifica la tarjeta al sistema. Esto permite que el software en la PC pueda configurar el sistema basándose en la tarjeta que este instalada. Las tarjetas que actualmente soporta el USRP se muestran en la tabla 3.1.

Tarjeta	Descripción	Frecuencia de operación
BasicTX y RX	Transmisor y Receptor para ser utilizados con equipo externo de RF. Sus salidas estan acopladas por un transformador directamente a los ADC/DACs con una impedancia de 50Ω.	1Mhz-250Mhz
LFTX y LFRX	Similar al BasicTX y RX pero las salidas estan acopladas por amplificadores diferenciales en lugar de transformadores. Esto las permite trabajar con frecuencias hasta DC. Tambien cuentan con un filtro pasabajas con frecuencia de corte de 30Mhz.	DC-30Mhz
TVRX	Sistema receptor de VHF y UHF basando en un sintonizador de TV con un ancho de banda de canal de 6Mhz.	50Mhz-860Mhz
DBSRX	Sistema receptor con filtro de canal controlado por software de 1Mhz a 60Mhz.	800Mhz-2.4Ghz
RFX400	TX y RX en una sola tarjeta con un ancho de banda de canal de 30Mhz.	400Mhz-500Mhz
RFX900	TX y RX con 200mW(23dBm) de potencia.	750Mhz-1050Mhz
RFX1200	TX y RX con 200mW de potencia que cubre las bandas satelitales.	1150Mhz-1450Mhz
RFX1800	TX y RX con 100mW(20dBm) de potencia	1.5Ghz-2.1Ghz
RFX2400	TX y RX con 50mW(17dBm) de potencia con un filtro pasa bandas alrededor de la banda ISM(2400-2433Mhz). El filtro se puede desabilitar para utilizar todo el rango de frecuencias.	2.3Ghz-2.9Ghz
XCVR2450	TX y RX que cubre toda la banda ISM asi como tambien algunas bandas japonesas.	2.4-2.5Ghz y 4.9-5.9Ghz
WBX	TX y RX que cubre varias bandas incluyendo televisión, comunicaciones móviles, sensores inalámbricos, etc.	50Mhz-2.2Ghz

Tabla 3–1: Tarjetas auxiliares que soporta el USRP.

El controlador FX2 integra un CPU 8051 con un controlador de USB de alta velocidad que implementa 3 *endpoints* logicos para la comunicación con el FPGA y la PC como se describen en la tabla 3.1. Cada *endpoint* establece una via de comunicación entre el dispositivo USB y el *host*. El endpoint 0 es el de control y es necesaria su implementación para que el dispositivo pueda ser compatible y a su vez, ser certificado por el estándar de USB ([Universal Implementers Forum, 2000](#)). Los endpoints 2 y 6 son de tipo Bulk, que de acuerdo a la especificación del USB, son los que permiten el mayor rendimiento de transferencia (512 bytes por paquete). Estos son utilizados para enviar los datos de la señal al FPGA. El FX2 utiliza una interfaz de propósito genérico (GPIF) para proporcionar un bus de datos al mundo exterior, esto con el propósito de facilitar la interfaz a otros dispositivos. En este caso el GPIF se conecta directamente al FPGA con una tasa de transferencia de 96 MB/sec.

Endpoints	Descripción
0	Control/Status
2	PC \rightarrow FPGA
6	FPGA \rightarrow PC

Tabla 3–2: *Endpoints* implementados por el controlador FX2

El FPGA es el encargado de realizar operaciones de alta velocidad y de reducir la tasa de datos en una más adecuada para que la señal pueda ser transferida por el puerto USB. Para la etapa de RX, la configuración básica contiene dos convertidores digirales hacia abajo (DDC) implementados con filtros CIC (Peine Integradores en Cascada) de 4 etapas y filtros de media banda (*Half-band* o HB) de orden 31. El propósito del DDC es transformar la señal pasa bandas a banda base. Esto se logra centrando su frecuencia en 0Hz, así eliminando la portadora. La estructura del DDC se muestra en la figura 3–2.

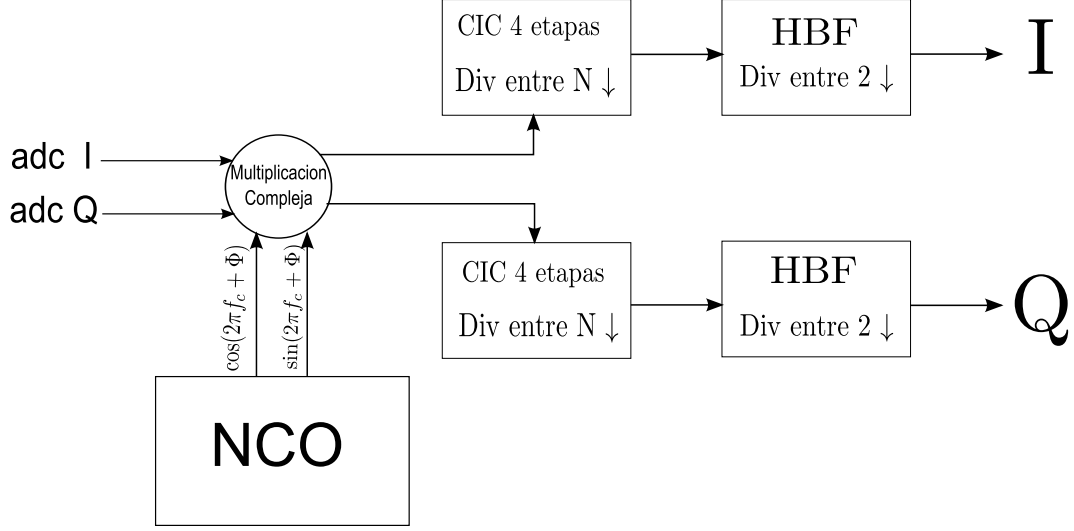


Figura 3–2: Estructura del DDC implementado en el USRP

EL USRP, en su configuración básica, usa dos DDCs, cada uno con 2 entradas. La señal compleja que entregan los ADCs es multiplicada por otra señal con una frecuencia intermedia constante generada por un oscilador controlado numericamente (NCO). La señal resultante se encuentra ahora centrada en 0Hz. Después es introducida al filtro CIC para realizar una decimación por N , donde N es especificado por el usuario desde el programa del usuario. La función de transferencia del filtro CIC es la siguiente ([Donadio, 2000](#)):

$$H(z) = H_I^N(z)H_C^N(z) = \frac{(1 - z^{-RM})^N}{(1 - z^{-1})^N} = \left(\sum_{k=0}^{RM-1} z^{-k} \right)^N \quad (3.1)$$

Donde: H_I^N es la función de transferencia de la etapa integradora

H_C^N es la función de transferencia de la etapa filtro comb

R es la tasa de decimación o interpolación

M = número de muestras por etapa

N = número de etapas por filtro

El USRP implementa este filtro con los siguientes parámetros: $R = \text{variable}$ (4 mínimo), $M = 1$ y $N = 4$. La respuesta a la frecuencia de esta configuración se muestra en la 3-3.

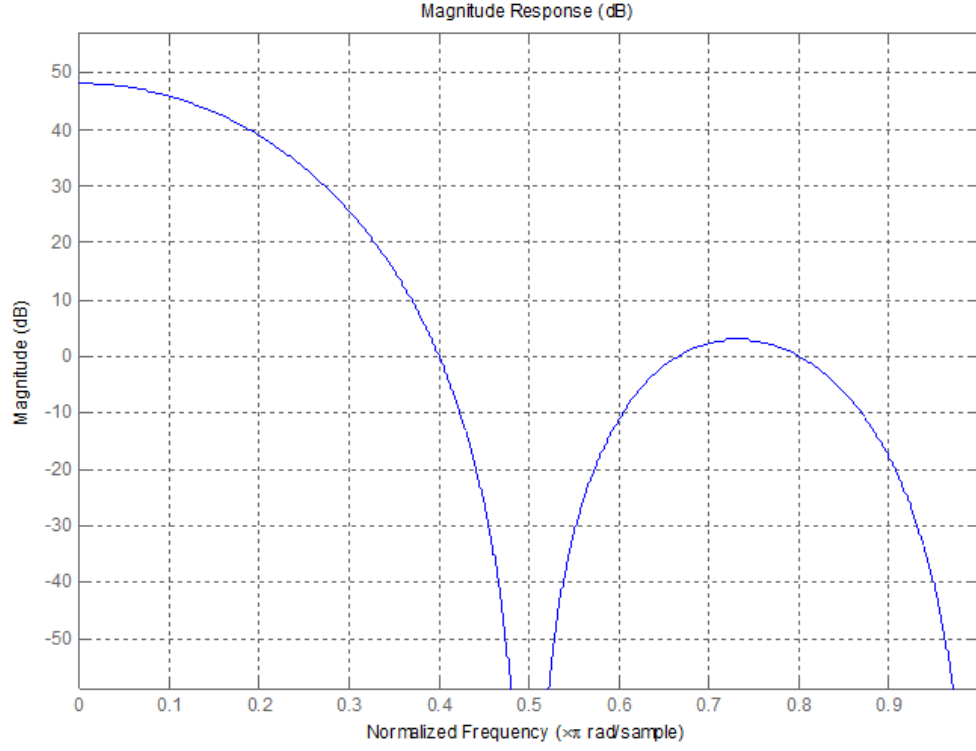


Figura 3-3: Respuesta a la frecuencia del filtro CIC de 4 etapas y $R = 4$

La última etapa del DDC es el filtro HB el cual realiza una decimación de 2 y ayuda a rechazar cualquier banda no deseada por las operaciones previas. La función de transferencia del filtro HB (Nguyen, 2000) es la siguiente:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad (3.2)$$

Estos filtros tienen las siguientes restricciones:

- $N-1$ debe ser par
- $h(n) = h(N - 1 - n)$

La respuesta a la frecuencia es

$$H(e^{j\omega}) = e^{-j\omega N-1/2} H_0(e^{-j\omega}) \quad (3.3)$$

donde $H_0(e^{-j\omega})$ representa la respuesta a la amplitud con valor real.

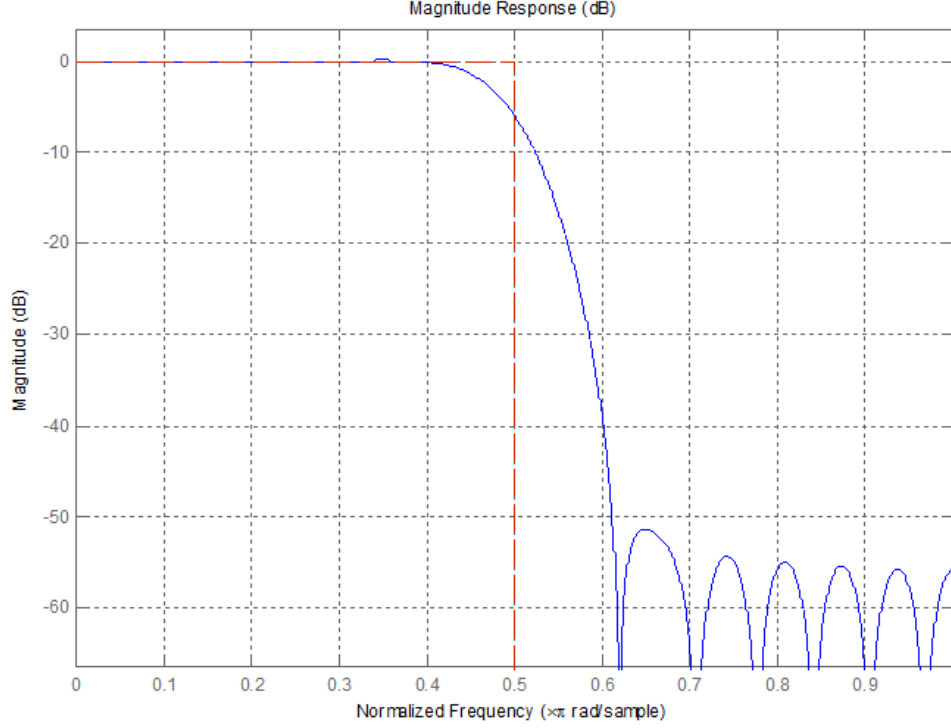


Figura 3-4: Respuesta a la frecuencia del filtro de media banda

Las características del filtro HB de acuerdo al USRP son las siguientes:

- Orden 31
- Decimador 2
- Pasa bajas

En la figura 3-4 se muestra la respuesta a la frecuencia del filtro HB. Existe simetría con respecto a la banda $\pi/2$. Esta es una de las características de estos filtros. Debido a esa simetría la respuesta al impulso es

$$h(n) = \begin{cases} 0, & n = \frac{N-1}{2} = \text{par y diferente a } 0 \\ \frac{1}{2}, & n = \frac{N-1}{2} \end{cases} \quad (3.4)$$

Debido a esta simetría estos filtros son muy eficientes y fáciles de implementar ya que aproximadamente el 50 % de sus coeficientes son 0.

La combinación del filtro CIC y HB dan un factor de decimación mínimo de 8. El ADC tiene una tasa de muestreo de 64Ms/S, por lo tanto, el ancho de banda total será de 32Mhz. Los datos enviados son de 16 bits para I y Q, ósea, 4 bytes por muestra compleja. Esto resulta en un ancho de banda efectivo de 8Mhz (32Mhz/4bytes). El rango de decimación que soporta el USRP es [8, 256].

Para la etapa de TX el proceso es el inverso. El FPGA contiene filtros CIC interpoladores que se encargan de interpolar la señal, elevarla a la frecuencia intermedia y después enviarla a los DACs. El proceso de conversión digital hacia arriba (DUC) está contenido en el chip AD9862 y no en el FPGA como lo es en el proceso de RX. Este chip contiene ambos ADCs y DACs pero únicamente en la etapa del TX realiza algún otro procesamiento sobre la señal. La frecuencia de muestreo de los DACs es de 128MS/s de 14 bits cada uno, dándonos una frecuencia Nyquist de 64MS/s. La salida proporciona 1V pico a una carga diferencial de 50 Ω . Existe un amplificador de ganancia programable (PGA) que puede proporcionar hasta 20dB de ganancia y es programable por software. Las señales del DAC son en base a corriente y vanean entre 0 y 20mA.

3.2. GNURadio

El USRP fue diseñado para ser utilizado principalmente, pero no exclusivamente, por la herramienta de desarrollo *GNURadio*. Esta herramienta es abierta (*Open Source*) y consiste en un sistema de procesamiento de señales implementado a base de bloques que se ligan uno con el otro para formar un sistema completo de comunicaciones. Las aplicaciones que se desarrollan son principalmente implementadas con el lenguaje Python, mientras que las operaciones críticas de procesamiento de señales son implementadas en C++ utilizando las extensiones de punto flotante

del CPU si es que están presentes. Cabe mencionar que aunque la función principal de esta herramienta no es realizar simulaciones, tiene la capacidad de generar sistemas de comunicaciones utilizando datos obtenidos previamente por medio de alguna simulación o generador. Esto es útil cuando no se cuenta con hardware de RF para llevar a cabo la aplicación.

GNURadio no está limitado a trabajar únicamente con el USRP. Debido a la naturaleza abierta de la herramienta, uno puede diseñar su propio bloque que encapsule algún hardware especial. La programación del driver se lleva a cabo en C, es encapsulada con las clases de C++ para implementar el bloque y después es encapsulada nuevamente en Python para ser utilizado en la aplicación general. De esta manera el usuario no se preocupa por los detalles del funcionamiento del hardware, únicamente le proporciona los parámetros adecuados al bloque y este se encarga de establecer la comunicación adecuada.

3.3. Programación en GNURadio con Python

Como se menciona en el capítulo 3.2, la programación se lleva a cabo principalmente en el lenguaje Python. El lenguaje C++ también se utiliza pero únicamente si se desea desarrollar un módulo nuevo o modificar algunos de los que ya existen.

GNURadio es un conjunto de módulos de Python con la capacidad de realizar diversas operaciones de procesamiento digital de señales para el desarrollo de sistemas de radios configurables por software. Es posible mezclar diferentes módulos de otros *frameworks* o librerías junto con los de *GNURadio* para incluir mayor soporte al que se ofrece.

El concepto que se aplica para los programas realizados con esta librería es el de grafos. Cada aplicación cuenta con una serie de nodos o bloques conectados entre sí para crear una cadena completa de RF llamado grafo de flujo. Los bloques se encargan de realizar alguna operación sobre la información que fluye a través de la gráfica y éstos pueden ser operaciones matemáticas, envío de datos a algún puerto,

etc., mientras que las aristas transportan la información entre los nodos. Cada bloque tiene definido una serie de puertos de entradas y salidas las cuales aceptan y entregan un tipo de datos específico. No es posible realizar una conexión entre dos puertos con tipos de datos incompatibles. Un ejemplo de una grafica de flujo sencilla se muestra en la figura 3-5.

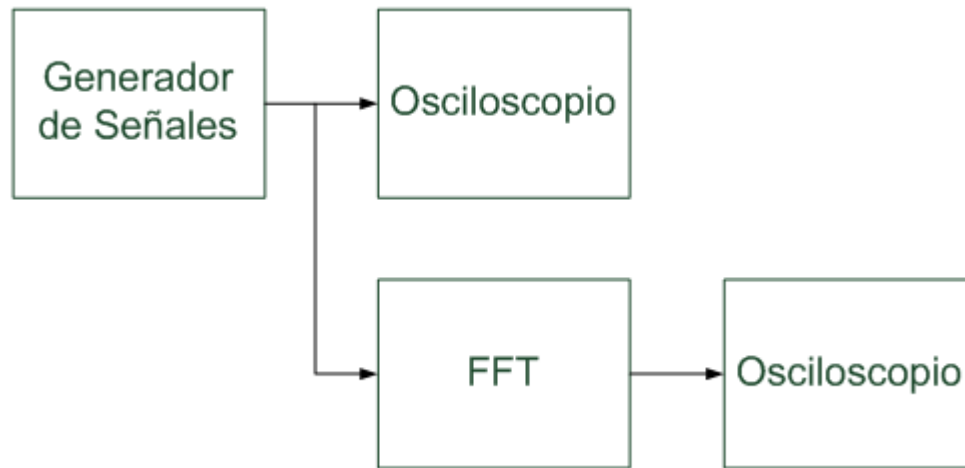


Figura 3-5: Ejemplo de una grafica de flujo en *GNURadio*

La información que viaja a través de las aristas puede provenir de una fuente externa ó interna. Para el caso de las fuentes internas estas generan señales puramente digitales a través de métodos de procesamiento digital de señales. Las fuentes externas primeramente adquieren una señal análoga por medio de alguna interfaz delantera. Esta interfaz se encarga del acondicionamiento de la señal y de su digitalización por medio de un ADC para luego ser procesada por el bloque de *GNURadio*. Estos conceptos se aplican igualmente para bloques de salidas. Estos bloques pueden llevar sus datos a algún archivo, desplegarlos en forma de alguna grafica o sacarlos a través de alguna interfaz por medio de un DAC y luego al mundo exterior. Un ejemplo de un programa que ilustra estos conceptos se muestra en el listado 3.1. Este programa utiliza dos bloques que generan dos señales senoidales independientes a diferentes frecuencias y las entrega a un bloque de audio que representa la tarjeta de

```

from gnuradio import gr
from gnuradio import audio

class my_top_block(gr.top_block):
    def __init__(self):
        gr.top_block.__init__(self)

        sample_rate = 32000
        ampl = 0.1

        src0 = gr.sig_source_f (sample_rate, gr.GR_SIN_WAVE, 350, ampl)
        src1 = gr.sig_source_f (sample_rate, gr.GR_SIN_WAVE, 440, ampl)
        dst = audio.sink (sample_rate, "")
        self.connect (src0, (dst, 0))
        self.connect (src1, (dst, 1))

if __name__ == '__main__':
    try:
        my_top_block().run()
    except KeyboardInterrupt:
        pass

```

Listado 3.1: Ejemplo de programa utilizando *GNURadio*

sonido de la PC donde se está ejecutando el programa, esto en efecto mezcla ambas señales para producir un tono.

El programa se inicia importando los módulos necesarios para la aplicación. Aquí se importa el modulo **gnuradio** y dos de sus submodulos: **gr** y **audio**. Después se declara una clase que se deriva de **top_block**. Todas las clases de *GNURadio* se tienen que derivar de **top_block** o de **hier_block2** ya que estas dos clases actúan como un contenedor para la grafica de flujo. La primera clase actúa como un contenedor para una única grafica y la segunda soporta el desarrollo de graficas jerárquicas.

Los bloques y sus conexiones se definen dentro del constructor de la clase, en este caso es la función **__init__**. Esta línea de código también manda llamar la función **__init__** de la clase de la que se deriva, pasándole los parámetros que sean necesarios (si es que los pide). Esto es necesario para llevar a cabo la inicialización de ambas clases. En las siguientes dos líneas se declaran dos variables para llevar el control del tiempo de muestro y de la amplitud. Las siguientes dos líneas demuestran

la manera de cómo se declaran los bloques de ejecución. Cada bloque está representado por una clase y su inicialización consta en mandar llamar su constructor con los parámetros necesarios para su funcionamiento. Como se puede observar, ambos bloques se encuentran dentro del submodulo `gr` y su constructor se invoca con los parámetros que requieren para generar el tipo de señal que deseamos. Para estos bloques los parámetros son los siguientes en orden: el tiempo de muestreo, una constante que indica el tipo de señal que se desea generar (estas constantes también se encuentran dentro del submodulo `gr`), la frecuencia de la señal y su amplitud. La siguiente línea declara un tercer bloque que es el de audio y representa la tarjeta de sonido de la PC. Los parámetros que necesita son el tiempo de muestreo y el nombre del dispositivo de audio (esto es en caso de que se tenga más de uno en la PC).

Por último las dos siguientes líneas demuestran la manera de cómo hacer las conexiones entre los bloques. Como la clase fue derivada de `top_block` ahora contamos sus funciones para nuestro uso. Una de estas funciones se llama `connect` y se utiliza para conectar cada uno de los bloques. Los parámetros que acepta son clases derivadas de los bloques principales o tuplas con dos elementos, el bloque y un entero. El entero se utiliza para indicar que puerto utilizar para la conexión donde esto es únicamente valido para bloques que acepten más de una conexión a la vez. La numeración de los puertos inicia con cero por lo que la primera conexión lleva la primera señal al puerto 0 y la segunda conexión lleva la segunda señal al puerto 1.

Después de la declaración de nuestro bloque principal, el programa se ejecuta declarando una instancia de nuestra clase, y mandando llamar su función `run`. Esta función también es proporcionada por la clase `top_block`. Cuando este programa se ejecute el resultado debe ser un tono emitido a través de las bocinas de la PC a la frecuencia de las dos señales generadas. La grafica representativa de este programa se muestra en la figura 3-6.

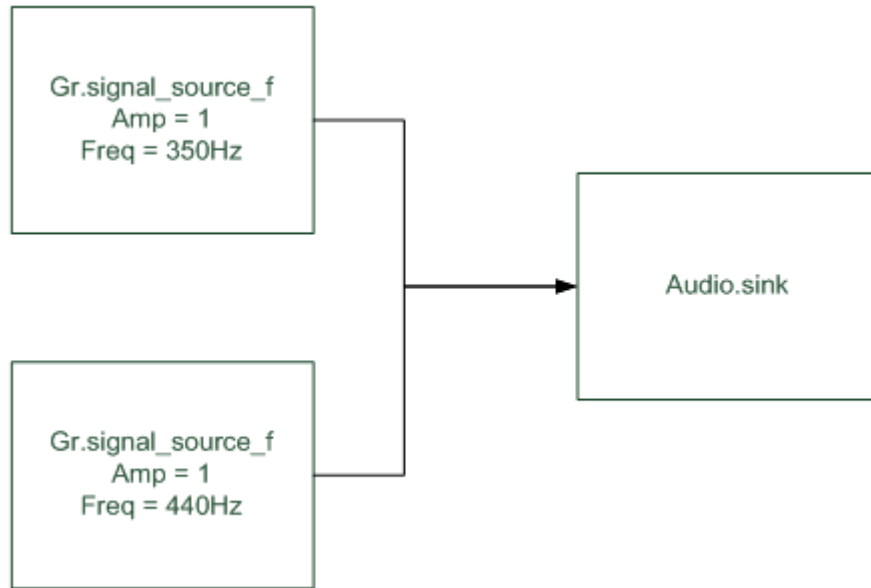


Figura 3–6: Grafica de flujo del programa ejemplo.

3.4. Descripción del experimento

En esta sección se describe la manera en como se llevó a cabo el experimento para la implementación de una transmisión digital utilizando el esquema de modulación QPSK. Las instrucciones para instalar el ambiente de desarrollo se describen a detalle en el apéndice [A](#).

3.4.1. Hardware utilizado

Los componentes que forman la parte de hardware son los siguientes:

- USRP
- Tarjetas auxiliares LFTX y LFRX
- Cable coaxial SMA-SMA
- Cable USB
- Fuente de alimentación

Como se describió en la tabla [3.1](#), las tarjetas LFTX y LFRX tienen un ancho de banda de DC-30Mhz. Las terminales de estas tarjetas son de tipo SMA con una impedancia de 50Ω . El cable coaxial se utilizó para minimizar pérdidas en la

transmisión durante la caracterización del sistema. El cable USB es un cable tipo A-B (conectar estandar A a B). Las especificaciones de la fuente de alimentación para el USRP son 6V @ 4A AC/DC. El sistema es capaz de operar en el rango de 90-260VAC @ 50/60Hz lo cual permite que funcione en diferentes países.

3.4.2. Código fuente de GNURadio

El código fuente de *GNURadio* proporciona varios ejemplos que implementan varios conceptos utilizando los bloques de procesamiento que proporciona el *framework*. Algunos de estos ejemplos son: receptor de FM, decodificador de señales ATSC, captura y análisis de audio, modulación OFDM, etc. La compilación del código fuente genera también la documentación de todos los bloques de procesamiento, el cual es muy útil como referencia mientras se desarrolla cualquier aplicación. La estructura de los directorios que contienen los ejemplos se muestra en la figura 3-7.

El experimento se basó en el ejemplo del directorio `digital`. Este programa implementa un transmisor completo utilizando varias modulaciones digitales como GMSK, BPSK y QPSK y viene en dos versiones: una se maneja a través de una consola de comandos y la otra implementa una interfaz de usuario utilizando la librería QT que ayuda a visualizar de manera gráfica lo que el sistema está recibiendo. El programa utiliza varias técnicas de programación orientada a objetos, así como también estructuración del código de diferentes módulos para separar todos los componentes importantes y poder utilizarlos en otras aplicaciones. La figura 3-8 muestra una gráfica de las principales dependencias entre los módulos de Python que forman parte del ejemplo.

El módulo `benchmark_tx` es el principal y es el que el usuario ejecuta para arrancar la aplicación. `modulation_utils` contiene una función que regresa un diccionario con todos los esquemas de modulación registrados en *GNURadio*. Este diccionario se utiliza para preparar las opciones que se le ofrecen al usuario y así

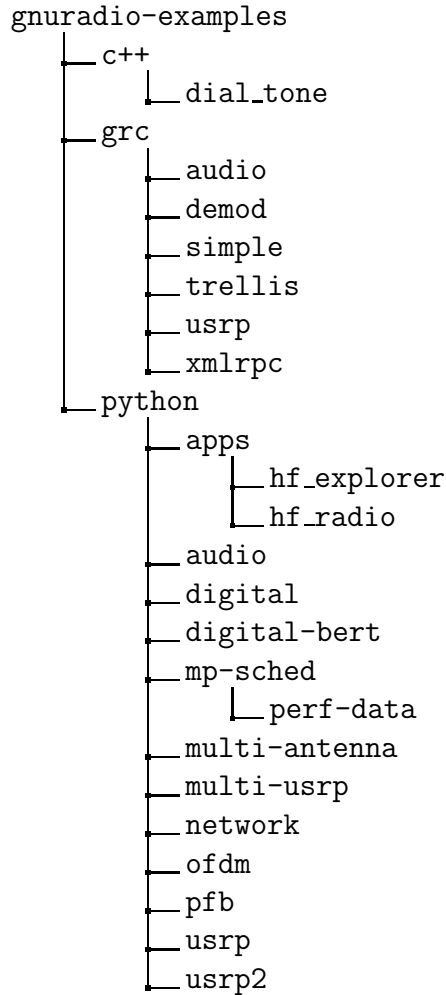


Figura 3-7: Árbol de directorios de los ejemplos que ofrece *GNURadio*

impedir que no seleccione una que no exista. `usrp_transmit_path` encapsula la operación de inicializar el USRP y consiste en enviar los comandos de selección de decimación\interpolación, frecuencia a la que se deben sintonizar las tarjetas auxiliares, el valor del multiplexor que controla las conexiones de los codecs al FPGA, etc. Todas estas operaciones son delegadas a una clase contenida en `usrp_options`. El resultado es un objeto de tipo `usrp_sink` configurado para enviar datos al puerto USB. El módulo `pick_tx_bitrate` se utiliza para calcular una tasa de bits óptima apartir de los parametros muestras por símbolo, decimación\interpolación y bits por símbolo. La tasa de bits se puede especificar tambien y el modulo verificará que se

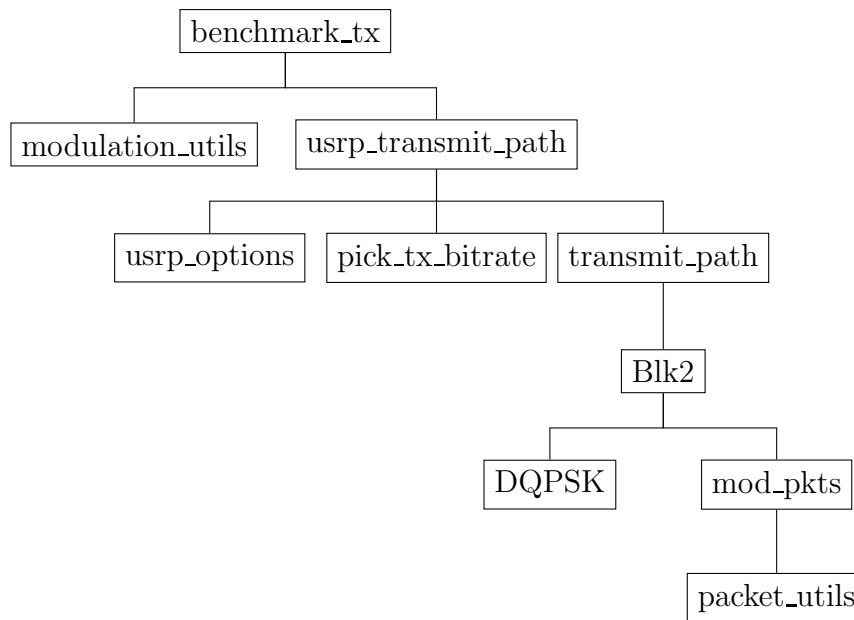


Figura 3–8: Relación de módulos del ejemplo *benchmark* de *GNURadio*

pueda alcanzar con los otros parametros especificados. De no ser asi entonces hará un ajuste a la tasa de bits para poder utilizar correctamente los otros parametros. Si no se especifica ningún parametro entonces el módulo trabajará con un valor default de 500kb/s. El módulo **transmit_path** realiza las operaciones de preparar y crear un objeto que encapsula el esquema de modulación que el usuario seleccionó. Los esquemas de modulación se encuentran dentro del paquete **blk2impl**, el cual se accede por medio del módulo **blk2** y se encarga de importar todo el contenido de **blk2impl** al programa principal. Los dos últimos módulos, **mod_pkts** y **packet_utils** se encargan de realizar la operación de empaquetar los bits que se desean transmitir.

La relación que se muestra en la figura 3–8 es la base para las otras versiones de del mismo ejemplo. Para el receptor la operación es la misma solo que utiliza los módulos **receive_path** y **usrp_receive_path**. También existen versiones que implementan una interfaz grafica utilizando la libreria QT que muestra el espectro de la señal, la constelación recibida, etc.

Capítulo 4

RESULTADOS

APENDICES

Apéndice A

INSTALACIÓN DEL AMBIENTE DE DESARROLLO

El desarrollo de aplicaciones basadas en *GNURadio* en el ambiente Linux es más sencillo y más versátil ya que la mayoría de las librerías externas de las que depende esta herramienta fueron desarrolladas para Linux. Aunque *GNURadio* proporciona soporte parcial/total para otros sistemas operativos como *Windows* y *Mac OSX*, el experimento se realizó en el sistema operativo *Ubuntu*, que es una distribución del sistema operativo Linux basado en una distribución llamada *Debian*. Se optó por esta versión de Linux ya que es la más amigable y fácil de usar pero principalmente se escogió por su habilidad de poder ser instalado dentro de *Windows* como una aplicación normal. Esto evita tener que hacer una partición separada para instalar el sistema operativo. Si se desea quitar es solo cuestión de ir al panel de control de *Windows* y desinstalar *Ubuntu*. Estará en la lista de aplicaciones instaladas.

Para poder llevar a cabo este procedimiento se utilizó un programa especial llamado *Wubi* ([Russo, 2007](#)). Esta aplicación instala el sistema operativo dentro de un solo archivo y agrega una nueva opción al menú de arranque de la PC para poder seleccionarlo aparte del sistema operativo primario. Cuando se ejecuta el programa *Wubi*, se deben especificar las opciones que se muestran en la figura [A-1](#). Se puede dejar el tamaño del archivo generado en su opción default pero se recomienda que mínimo se le asigne 10 gigabytes para tener suficiente espacio para la instalación de librerías que se vayan a requerir para la aplicación, aunque si el usuario desea instalar otras aplicaciones que no son parte de este tema entonces será necesario

incrementar este valor. Se debe especificar un nombre de usuario y la clave para esta cuenta ya que esta será la cuenta principal donde se realizara todo el trabajo. Posteriormente una vez terminando la instalación se pueden crear más usuarios si uno lo desea.

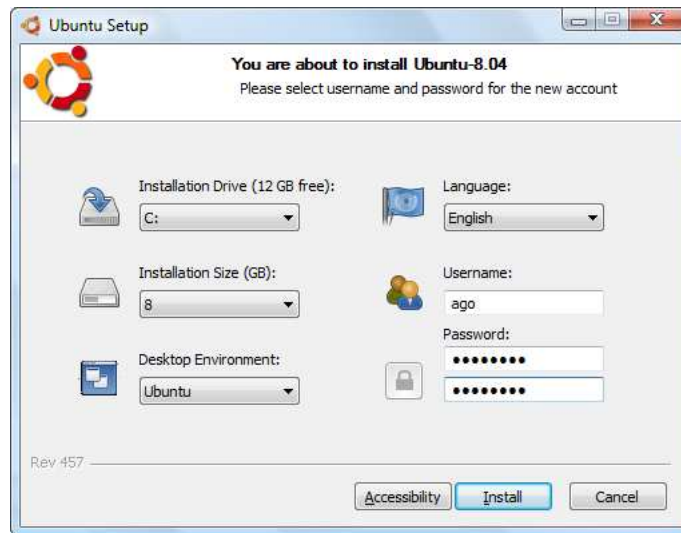


Figura A-1: Opciones del instalador *Wubi*

Una vez que se halla especificado las opciones anteriores se puede entonces iniciar con la instalación. *Wubi* comenzará a bajar de internet la imagen del DVD correspondiente a la distribucin de *Ubuntu* que se especifico.

Cabe mencionar que la instalación puede ser de 32 o 64 bits, dependiendo del tipo de instalación de *Windows* donde se va instalar *Ubuntu*. Si el sistema operativo principal es de 32 bits entonces la instalación también será de 32 bits. Esto se debe tener presente cuando se inicie la instalación de *GNURadio* ya que las librerías de las cuales depende vienen en versiones de 32 y 64 bits.

La imagen mide aproximadamente 700MB. Cuando termine de bajarlo la aplicación comenzará a crear el archivo del sistema operativo y agregara la opción para seleccionarlo en el menú de arranque como se muestra en la figura A-2. Una vez terminado este procedimiento la aplicación le pedirá al usuario que reinicie la PC.

Ahora necesitamos seleccionar la nueva opción del menú de arranque para poder ingresar al sistema operativo *Ubuntu*. El usuario no tiene que hacer nada por su parte ya que la instalación del sistema operativo se lleva a cabo de modo automático. Al terminar se le presentará al usuario que ingrese el nombre de la cuenta y la clave. Esta es la que se especificó en el instalador *Wubi*. Realizando esto nos encontraremos en el escritorio *GNOME* (o *KDE* si se especificó otra distribución como *Kubuntu*) como se muestra en la figura A-3.

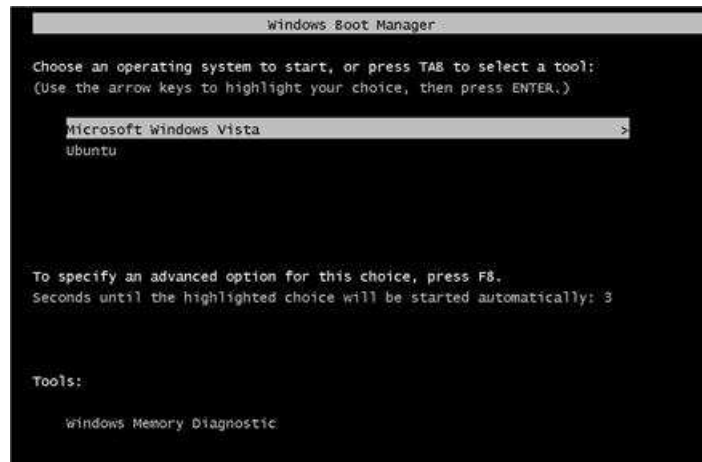


Figura A-2: Menú de arranque con la opción de *Ubuntu*

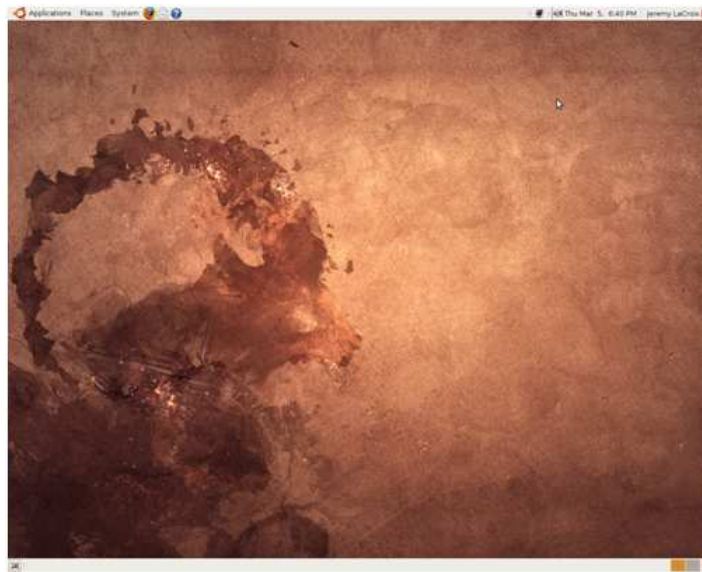


Figura A-3: Escritorio *GNOME* de la distribución *Ubuntu*

El siguiente paso es instalar *GNURadio* y sus dependencias. Todas las dependencias se pueden conseguir utilizando el sistema de instalación de software de *Ubuntu* lo cual hace la instalación más fácil. En versiones anteriores a 9.04 uno tenía que bajar manual mente el código fuente de varias páginas de internet y compilarlo manualmente. Utilizando el sistema Synaptic del sistema operativo se deben instalar las dependencias que se especifican en la tabla A-1.

La única librería que se recomienda que se instale manualmente es *Boost* ya que la más reciente es la versión 1.43 y ofrece muchas mejoras contra la versión 1.38 de Ubuntu. Para instalarla es cuestión de bajar el código fuente de la página www.Boost.org y seguir los siguientes pasos:

1. Descargar el código fuente a un lugar adecuado, abrir una consola e ir al directorio donde se descargo el archivo.
2. Descomprimir el archivo con el siguiente comando:

```
tar xzf boost_1_43_0.tar.gz
```
3. Entrar al directorio nuevo que se creó al descomprimir el archivo y ejecutar el siguiente comando: `./bootstrap.sh`
4. Ejecutar el siguiente comando: `sudo ./bjam install` Se debe proporcionar la clave de la cuenta que estamos usando ya que la instalación requiere privilegios de administrador.

La compilación e instalación puede durar entre 20 y 30 minutos dependiendo de la velocidad de la PC. Este procedimiento compilara e instalara todas las librerías que forman parte del conjunto de *Boost*. Este proceso se puede controlar más detalladamente para que únicamente instale un subconjunto de librerías y así reducir más el tiempo de instalación ya que *GNURadio* no utiliza todo el conjunto completo.

Después de instalar *Boost* se necesita utilizar el sistema *Synaptic* para instalar el resto de las dependencias como se menciono anteriormente. Esta herramienta se encuentra en el menú *System*→*Administration*→*Synaptic Package Manager* y se

Tipo	Elementos
Herramientas de desarrollo que se requieren para compilar el código fuente.	<ul style="list-style-type: none"> ■ g++ ■ subversion ■ make ■ autoconf, automake, libtool ■ sdcc ■ guile ■ ccache ■ SWIG 1.3.31 o mayor ■ git
Librerías requeridas para compilación y funcionamiento de los ejecutables.	<ul style="list-style-type: none"> ■ python-dev ■ FFTW 3.X (fftw3, fftw3-dev) ■ CppUnit (libcppunit y libcppunit-dev) ■ Boost 1.35 o mayor ■ libusb y libusb-dev ■ wxWidgets (wx-common y python-wxgtk) ■ python-numpy ■ ALSA (alsa-base, libasound2, libasound2-dev) ■ Qt4 ■ SDL (libsdl-dev) ■ GSL GNU Scientific Library (libgsl0-dev) 1.10 o mayor
Elementos opcionales	<ul style="list-style-type: none"> ■ QWT 5.0 o mayor ■ QWT Plot3d para QT4 ■ Python-scipy, python-matplotlib, python-tk ■ Doxygen ■ Octave

Tabla A–1: Dependencias requeridas para la instalación de *GNURadio*



Figura A-4: Administrador de software Synaptic

muestra en la figura A-4. En la caja de texto que dice search se puede escribir el nombre de las dependencias para que la búsqueda sea más rápida. Cada que se seleccione una el administrador de paquetes puede notificarle que es necesario instalar otras sub-dependencias. Esto es automático y el usuario no tiene que seleccionarlasm manualmente.

Para llevar a cabo este procedimiento se deben seguir los siguientes pasos:

1. Abrir una consola e ir a un directorio adecuado para descargar el código fuente.
2. Ejecutar el siguiente comando para obtener el código fuente de GIT:

```
git clone http://gnuradio.org/git/gnuradio.git
```

 Esto creará un nuevo directorio llamado *gnuradio*.

3. Entrar al nuevo directorio y ejecutar el siguiente comando:

```
./bootstrap
```

4. Ejecutar el siguiente comando para configurar la instalación:

```
./configure
```

5. Iniciar la compilación con el siguiente comando: **make**

6. Realizar una serie de pruebas para asegurar que la compilación fue exitosa:

```
make check
```

7. Instalar *GNURadio*: `sudo make install`

De acuerdo a la documentación de *GNURadio*, antes de realizar las pruebas que verifican la compilación es necesario ejecutar la siguiente serie de comandos:

1. Copiar el archivo *ld.so.conf* a un directorio temporal para modificarlo:

```
cp /etc/ld.so.conf /tmp/ld.so.conf
```

2. Agregar la ruta donde están instaladas las librerías:

```
echo /usr/local/lib >> /tmp/ld.so.conf
```

3. Borrar el archivo temporal y mover el nuevo a su lugar original:

```
mv /tmp/ld.so.conf /etc/ld.so.conf
```

4. Ejecutar el siguiente comando para aplicar los cambios:

```
sudo ldconfig
```

La razón del procedimiento anterior es que *Ubuntu* utiliza una implementación diferente de la herramienta *libtool* y si la ruta de las librerías no está especificada en el archivo de configuración las pruebas de *GNURadio* van a fallar con errores de que no se encuentran dichas librerías ([GNURadio, 2009](#)).

Para el uso óptimo del USRP es necesario realizar una modificación en el servicio *udev* ya que únicamente permite acceso directo del dispositivo a cuentas con privilegios de administrador. Esto quiere decir que cada que necesitemos ejecutar algún programa que utilice el puerto USB va a ver necesidad de elevar el ejecutable con el comando `sudo`. Para evitar hacer esto cada que se ejecute la aplicación del usuario se aplican los siguientes pasos:

1. Crear un nuevo grupo de usuarios:

```
sudo addgroup usrp
```

2. Anexar la cuenta de usuario que se está utilizando a este nuevo grupo:

```
sudo usermod G usrp a <CUENTA_DE_USUARIO>
```

3. Crear un archivo temporal con las instrucciones que *udev* necesita para agregar este nuevo grupo a los que están permitidos acceder al puerto USB:

```
echo ACTION==add, BUS==usb, SYSFS{idVendor}==fffe,  
SYSFS{idProduct}==0002, GROUP:=usrp, MODE:=0660 > tmpfile
```

4. Modificar los atributos de este archivo para que sea propiedad de root:

```
sudo chown root.root tmpfile
```

5. Mover el archivo temporal al directorio de reglas de *udev*:

```
sudo mv tmpfile /etc/udev/rules.d/10-usrp.rules
```

Es posible aplicar los cambios al ejecutar el siguiente comando: *sudo udevadm controlreload-rules*. Si esto no funciona entonces se necesita reiniciar la PC para que los cambios tengan efecto.

Referencias

Abendroth, S. (2003).

En *A software defined radio front-end implementation*. IEEE DSPEnabled Radio Conference.

Breed, G. (2005). *Analysing signals using the eye diagram* (Artículo Técnico). Summit Technical Media.

Donadio, M. P. (2000, 18 de Julio). *Cic filter introduction* (Artículo Técnico). IEEE.

Foster, G. (2004). *Anatomy of an eye diagram* (Artículo Técnico). SyntheSys Reseach Inc.

GNURadio. (2009). *Gnu radio wiki*. Disponible en <http://gnuradio.org/redmine/wiki/gnuradio>

Group, W. N. C. (2007). *Hydra - a mimo-ofdm multihop testbed*. Disponible en <http://hydra.ece.utexas.edu/>

Inc., P. (2009). *Pentek inc - software defined radio*. Disponible en <http://www.pentek.com/sftradcentral/SFTRadCntrlPrd.cfm#Overview>

Instruments, T. (2008). *Block diagram (sbd) - software defined radio - ti.com*. Disponible en <http://focus.ti.com/docs/solution/folders/print/357.html>

LLC, E. R. (2009). *Ettus research llc*. Disponible en <http://www.ettus.com/>

Lyrtech. (2009). *Small form factor sdr development platforms*. Disponible en <http://www.lyrtech.com/Products/Families/sdr.php?m=2>

McHale, J. (2004). *Software-defined radio and jtrs*. Disponible en <http://www.militaryaerospace.com/index/display/article-display/217738/articles>

- Mitola, J. (1992). *The software radio* (Artículo Técnico). IEEE National Telesystems Conference.
- Nguyen, T. Q. (2000, 18 de Julio). *A "trick" for the design of fir half-band filters* (Artículo Técnico). IEEE.
- Russo, A. (2007). *Wubi - ubuntu installer for windows*. Disponible en <http://wubi-installer.org/>
- Sklar, B. (2001). *Digital communications fundamentals and applications*. Prentice Hall.
- Universal Implementers Forum. (2000, 27 de Abril). *Universal serial bus 2.0 specification* (Especificación Técnica). Universal Implementers Forum.