

**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 *GNU Radio*. 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 . . . . .	20
2.10. Concepto de radio reconfigurable por software . . . . .	22
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 hardware y software . . . . .	37
3.4.1. Hardware utilizado . . . . .	37

3.4.2.	Codigo fuente de GNURadio . . . . .	38
3.5.	Descripción del flujo del software . . . . .	40
3.5.1.	Estructura del transmisor . . . . .	41
3.5.2.	Estructura del modulador DQPSK . . . . .	45
4.	Resultados . . . . .	47
4.1.	Material utilizado . . . . .	47
4.2.	Parámetros utilizados . . . . .	48
4.3.	Taza de error de bits . . . . .	50
4.4.	Espectrograma de la transmisión . . . . .	62
4.5.	Diagrama de ojo . . . . .	64
4.6.	Constelación observada . . . . .	64
5.	Conclusiones . . . . .	65
5.1.	Trabajo futuro . . . . .	65
APENDICES . . . . .		66
A.	Instalación del ambiente de desarrollo . . . . .	67
B.	GNURadio Companion . . . . .	75
Referencias . . . . .		83

## 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. Parámetros de medición del diagrama de ojo. . . . .	21
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. . . . .	36
3-7. Árbol de directorios de los ejemplos que ofrece <i>GNURadio</i> . . . . .	38
3-8. Relación de módulos del ejemplo <i>benchmark</i> de <i>GNURadio</i> . . . . .	39

3-9. Diagrama a bloques del transmisor QPSK. . . . .	41
3-10. Estructura del paquete de datos. . . . .	44
3-11. Estructura del modulador DQPSK de <i>GNURadio</i> . . . . .	45
4-1. Grafo generador de datos modulados para la evaluación del BER. . .	50
4-2. Grafo que simula un canal AWGN . . . . .	53
4-3. Grafo que realiza la demodulación de la señal simulada . . . . .	55
4-4. Respuesta del filtro pre-selector en el receptor para la medición del BER. . . . .	56
4-5. Grafica comparativa del BER para la primera versión de los esquemas DQPSK y DBPSK. . . . .	61
4-6. Grafica comparativa del BER para la segunda versión de los esquemas DQPSK y DBPSK. . . . .	62
4-7. Aplicación en Python que muestra el espectrograma de lo que el USRP esta recibiendo. . . . .	64
A-1. Opciones del instalador <i>Wubi</i> . . . . .	68
A-2. Menú de arranque con la opción de <i>Ubuntu</i> . . . . .	69
A-3. Escritorio <i>GNOME</i> de la distribución <i>Ubuntu</i> . . . . .	69
A-4. Administrador de software Synaptic . . . . .	72
B-1. Pantalla principal de GNURadio Companion . . . . .	76
B-2. Pantalla de propiedades del bloque signal_source . . . . .	77
B-3. Ejemplo de un grafo desarrollado en GRC . . . . .	78
B-4. Pantalla para salvar el trabajo en GRC . . . . .	80
B-5. Ejemplo de un grafo en ejecución . . . . .	80
B-6. Bloque FFT en conjunto con el osciloscopio en GRC . . . . .	81
B-7. Modificación de parametros por medio de bloques variables en GRC .	82

<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> . . . . .		71



## Índice de acrónimos

ADC	Convertidor Analogo a Digital.
AWGN	Ruido Blanco Gaussiano Aditivo.
BER	Taza de error de bits (Bit error rate).
BPSK	Modulación por corrimiento de fase binaria.
CIC	Filtro Peine Integradores en Cascada.
CRC	Comprobación de redundancia cíclica.
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 ([Pentek Inc., 2009](#)). Estas plataformas utilizan FPGAs de Xilinx para implementar los bloques de DDC y DUC, así como también filtros de interpolación. 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 ingles *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 esta 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](#)).

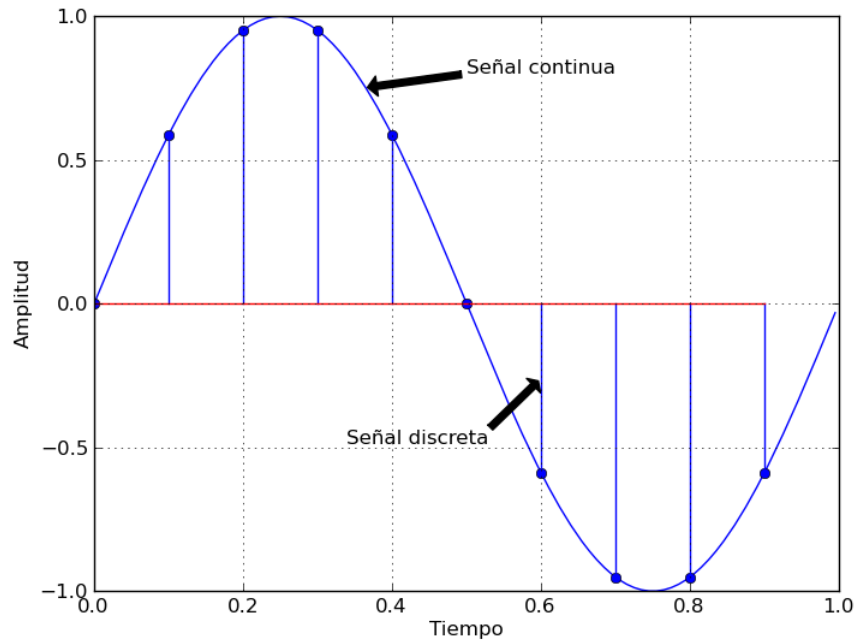


Figura 2-1: Ejemplo de una señal continua y una señal discreta

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

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



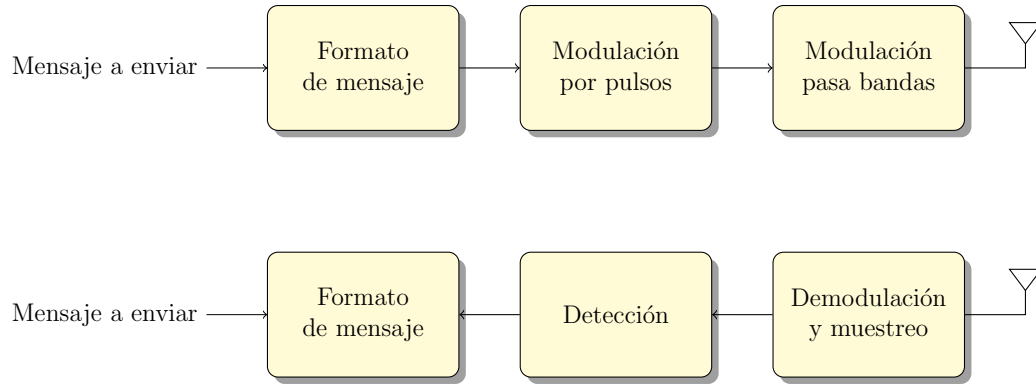


Figura 2-2: Diagrama a bloques de un sistema de comunicaciones digitales

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

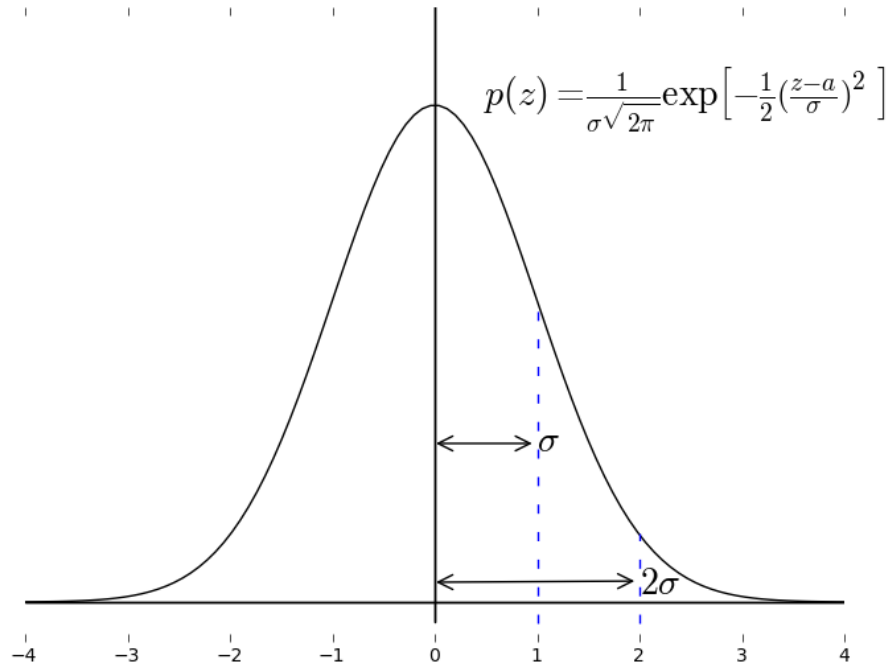


Figura 2-3: Función de densidad de probabilidad de la distribución Gausseano

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

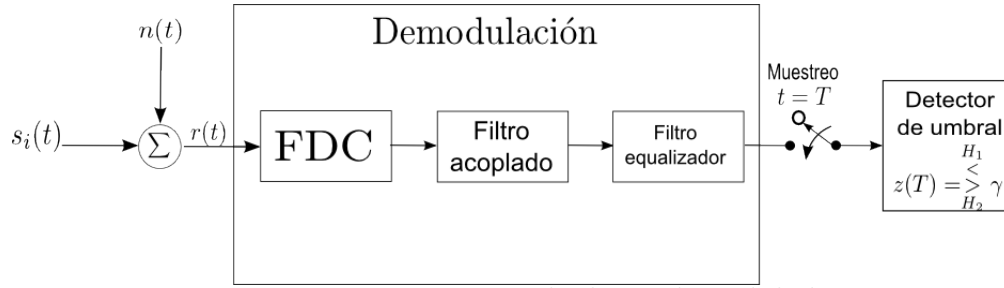


Figura 2-4: Diagrama simple de un demodulador.

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.

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 distorsiones 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.

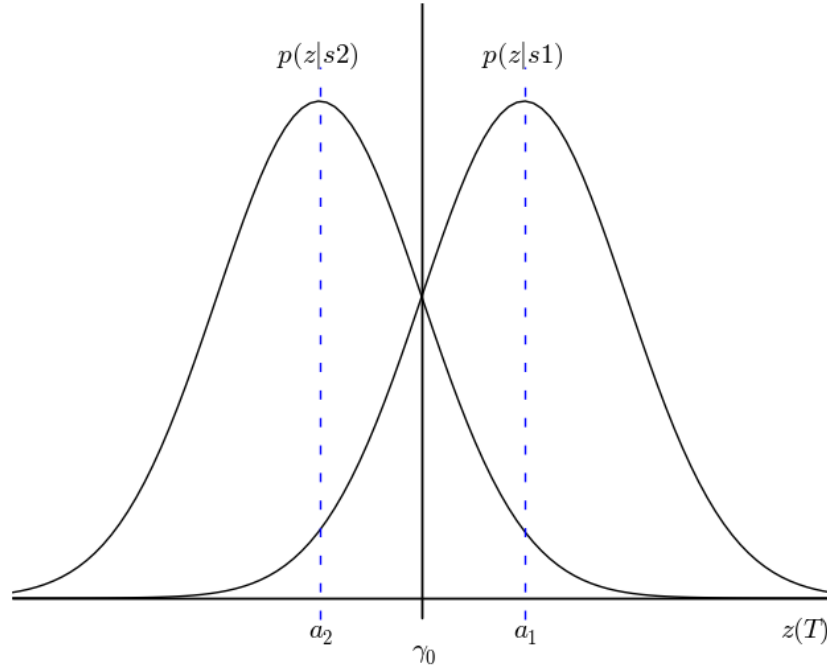


Figura 2–5: Probabilidades condicionales de las funciones  $p(z|s_1)$  y  $p(z|s_2)$

## 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

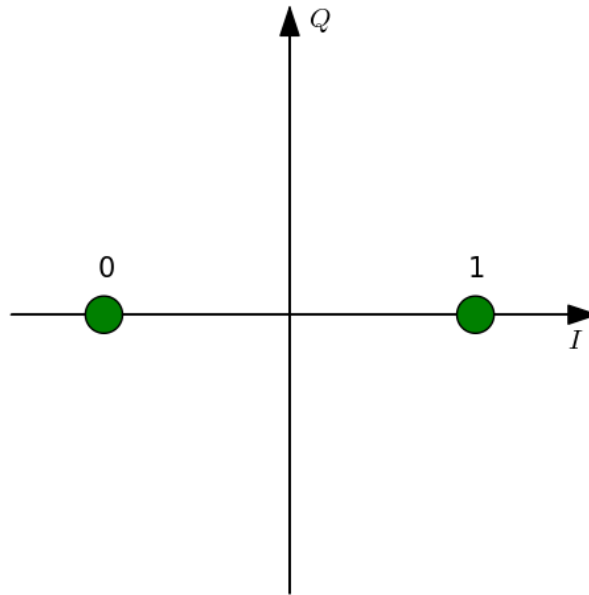


Figura 2-6: Diagrama de constelación para la modulación BPSK

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.

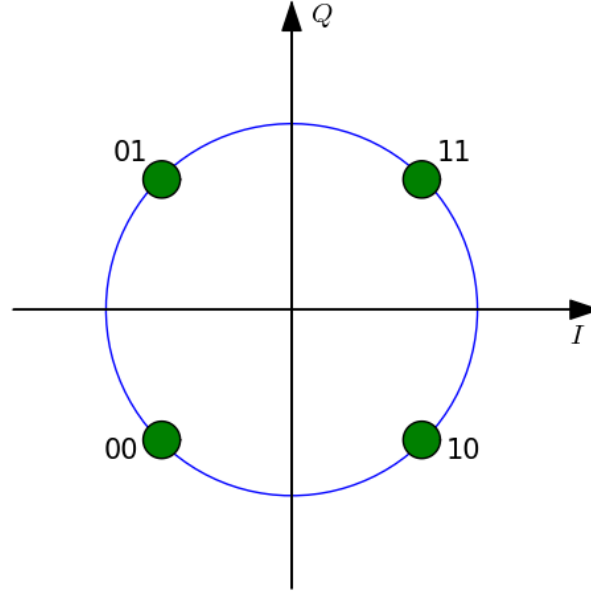


Figura 2-7: Diagrama de constelación de la modulación QPSK

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  $\omega_0$ ) 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

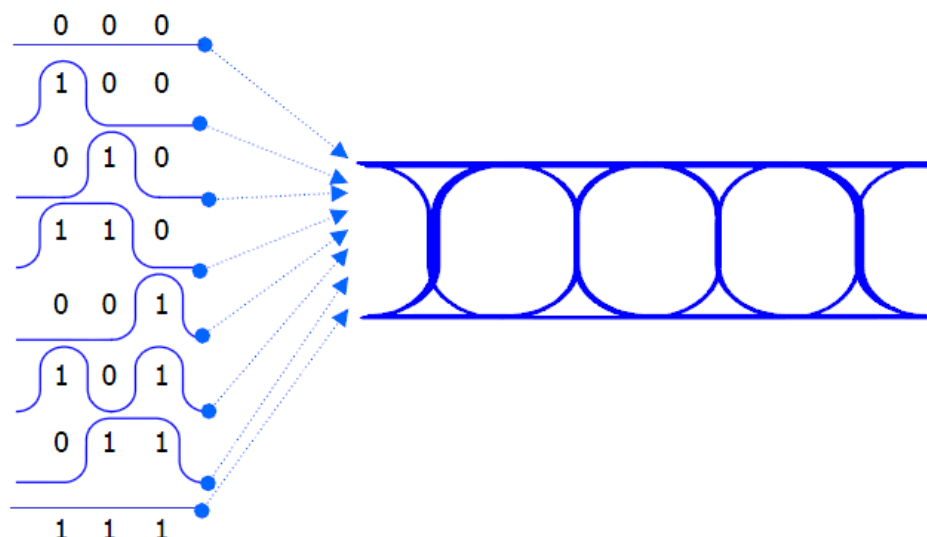


Figura 2–8: El diagrama de ojo formado al sobreponer varias secuencias de bits

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

La distorsión en el tiempo de muestreo es generada por el fenomeno de ISI. La diferiencia 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 a cerrarse haciendo asi mas dificil y, por concecuencia, mas erroneo el muestreo de la señal recibida.

### 2.9.2. Espectrograma

El espectrograma, tambien conocido como grafica de cascada (*waterfall*), muestra las variaciones de la densidad espectral de la señal a través del tiempo. Utiliza tres parametros 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.

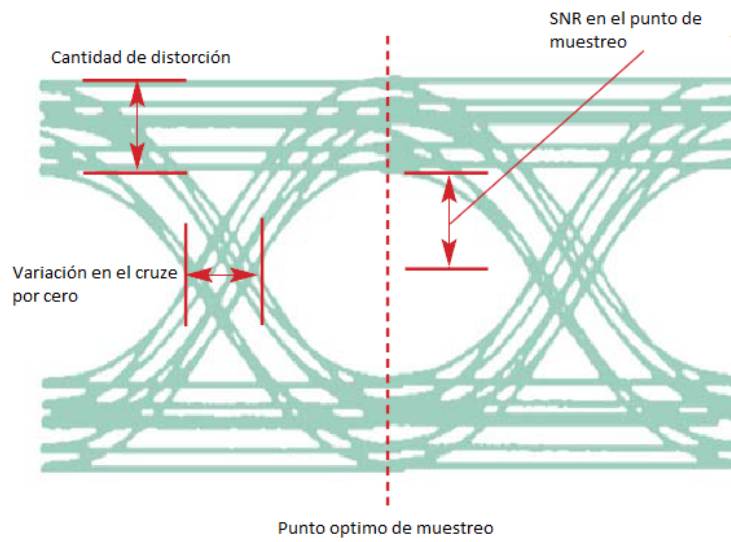


Figura 2-9: Parámetros de medición del diagrama de ojo.

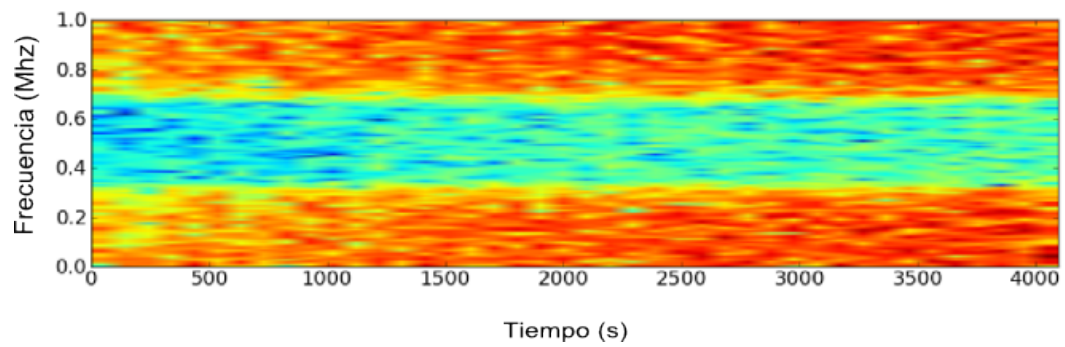


Figura 2-10: Ejemplo de un espectrograma.

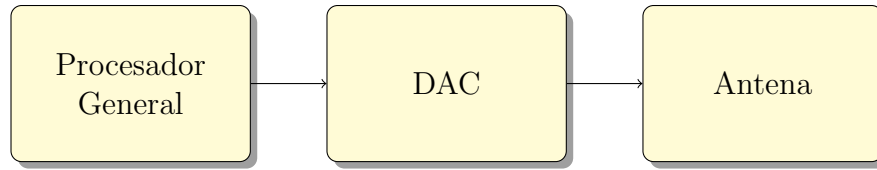


Figura 2–11: Diagrama a bloques de un sistema ideal de SDR

## 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 ingles (*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.

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 ([Texas Instruments, 2008](#)) y los FPGAs Virtex de Xilinx ([Lyrtech, 2009](#)) ofrecen plataformas altamente flexibles y con capacidad suficiente para la



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

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.

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.

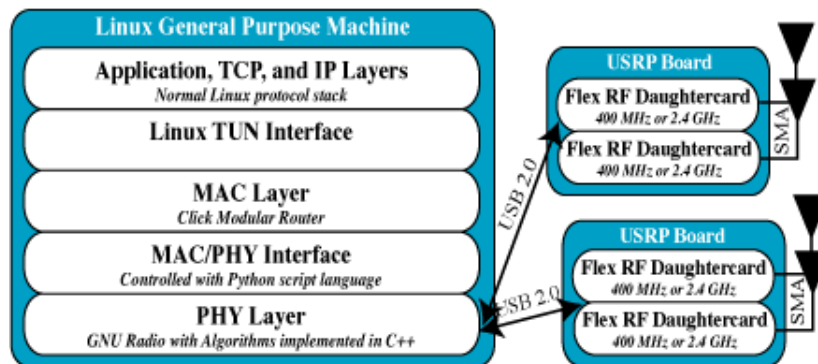


Figura 2-13: Diagrama a bloques de un nodo del sistema Hydra (Wireless Comm Group, 2007)

## 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

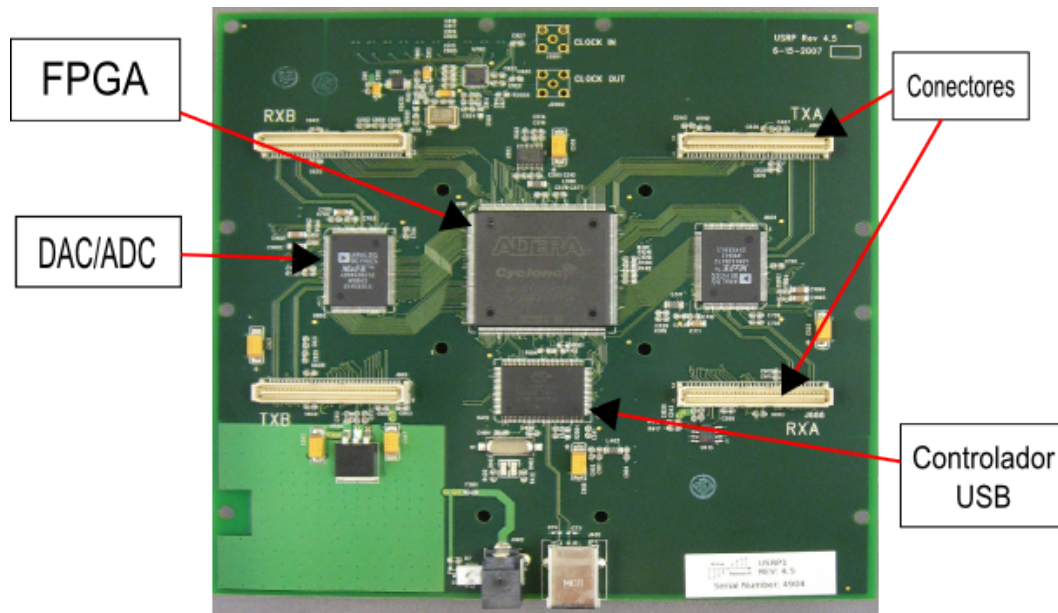


Figura 3-1: Placa principal del USRP.

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 esté instalada. Las tarjetas que actualmente soporta el USRP se muestran en la tabla 3.1.

<b>Tarjeta</b>	<b>Descripción</b>	<b>Frecuencia de operación</b>
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.

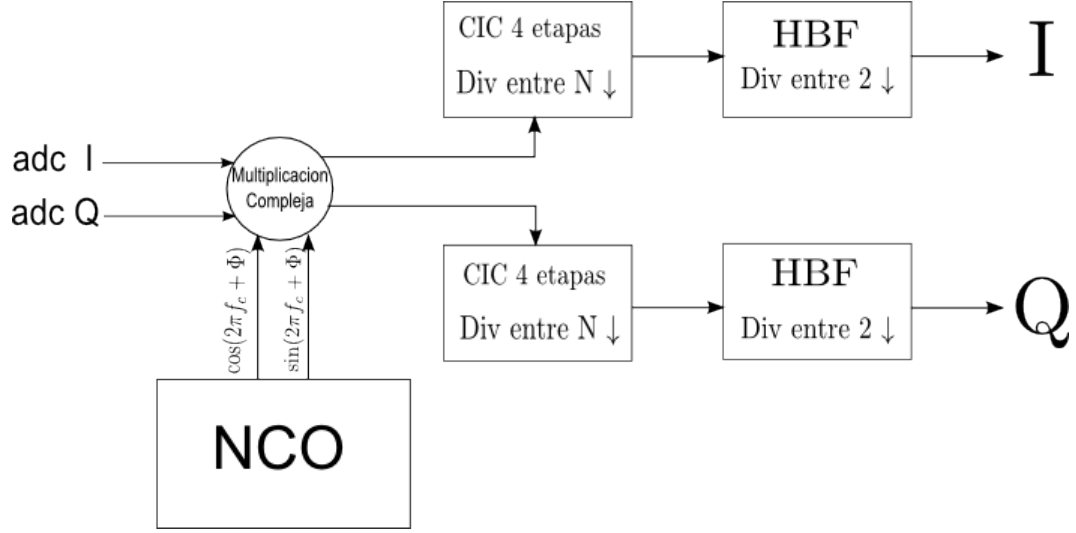


Figura 3–2: Estructura del DDC implementado en el USRP

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.

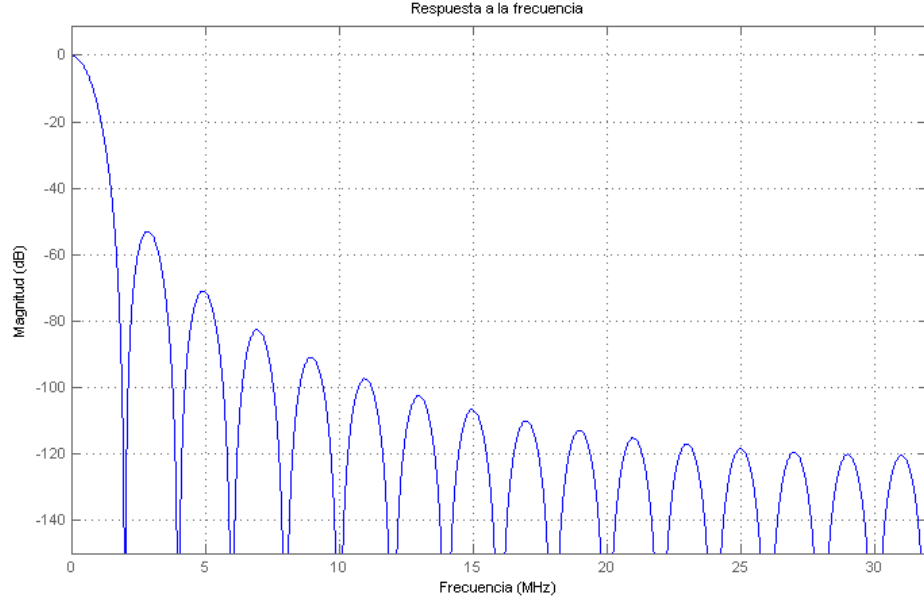


Figura 3-3: Respuesta a la frecuencia del filtro CIC de 4 etapas y  $R = 4$

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.

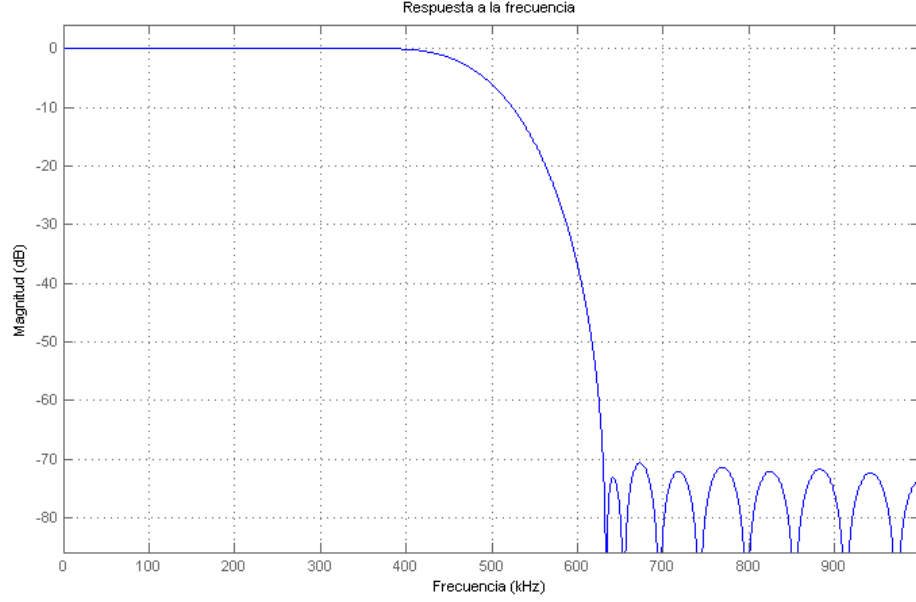


Figura 3-4: Respuesta a la frecuencia del filtro de media banda

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  $50\Omega$ . 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 varean 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 gráfica de flujo sencilla se muestra en la figura 3-5.

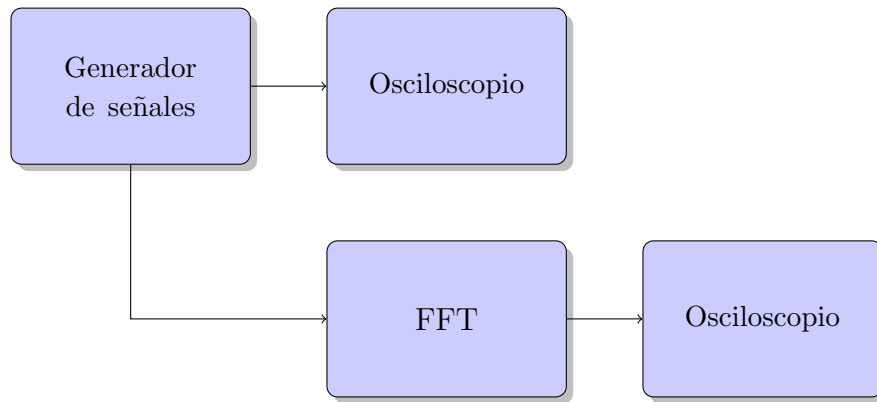


Figura 3-5: Ejemplo de una grafica de flujo en *GNURadio*

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 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

```

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*

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.

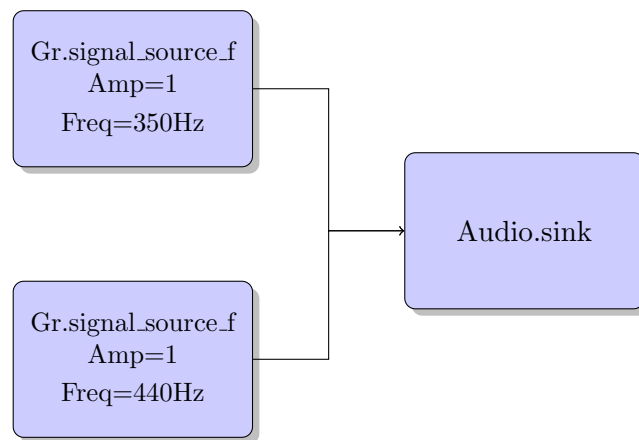


Figura 3–6: Grafica de flujo del programa ejemplo.

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.

### 3.4. Descripción del hardware y software

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 apendice 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  $50\Omega$ . El cable coaxial se utilizó para minimizar perdidas 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 paises.

### 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.

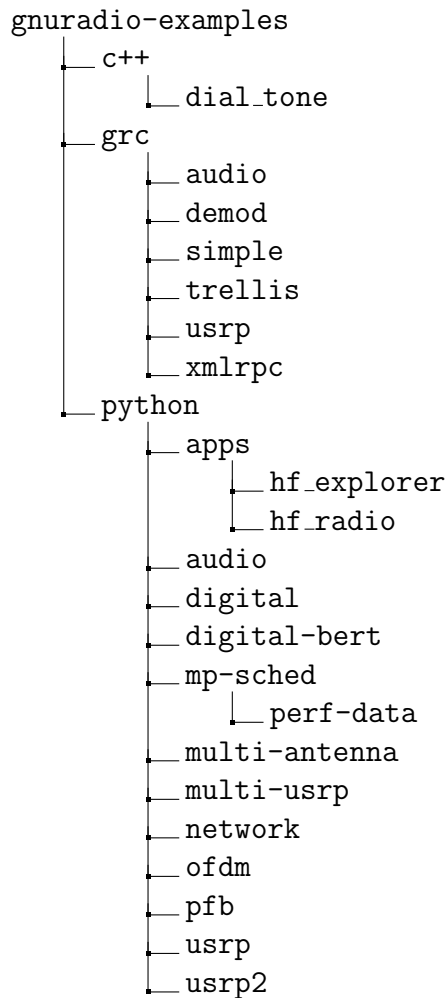


Figura 3-7: Árbol de directorios de los ejemplos que ofrece *GNURadio*

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 grafica lo que el sistema esta recibiendo. El programa utiliza varias tecnicas de programación orientada a objetos, así como también estructuración del codigo 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 modulos de Python que forman parte del ejemplo.

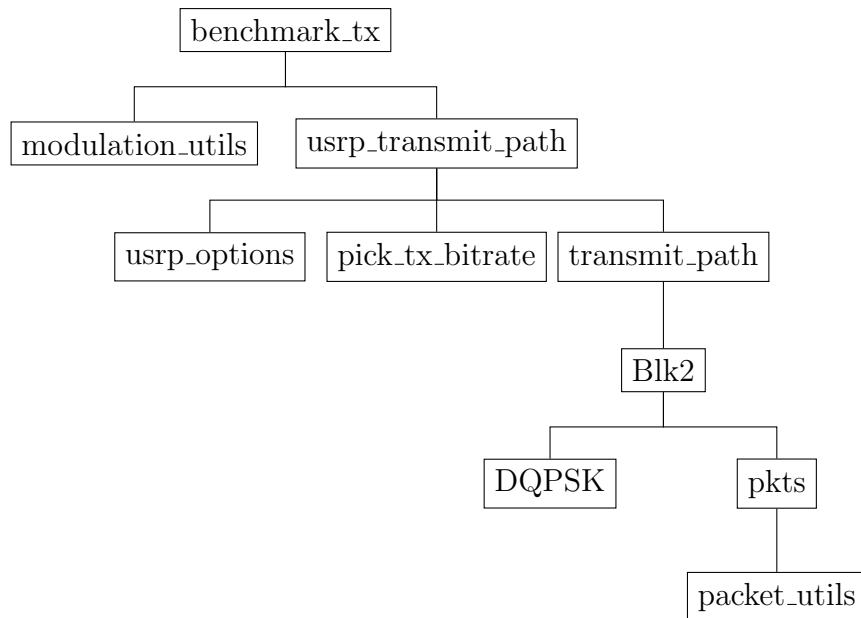


Figura 3–8: Relación de módulos del ejemplo *benchmark* de *GNURadio*

El módulo **benchmark\_tx** es el principal y es el que el usuario ejecuta para arrancar la aplicación. **modulation\_utils** contiene una funcion 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 asi



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 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.

### 3.5. Descripción del flujo del software

La estructura del programa `benchmark_tx.py` muestra un ejemplo de como desarrollar aplicaciones complejas que utilizan varias tecnicas de programación y herramientas que se pueden incorporar al lenguaje Python. El usuario esta libre

de desarrollar aplicaciones mas sencillas que constan de un solo *script* o de varios asociados unos con el otro.

### 3.5.1. Estructura del transmisor

El programa principal `benchmark_tx.py` genera los datos que se van a enviar de dos formas: automáticamente o apartir de un archivo proporcionado por el usuario. En el modo automático (este es el modo default) el programa genera una secuencia consecutiva de caracteres ASCII del tamaño que el usuario especificó. Esta secuencia es enviada a una función de Python que a su vez la envia a el grafo de RF. La estructura general del transmisor se muestra en la figura 3-9.

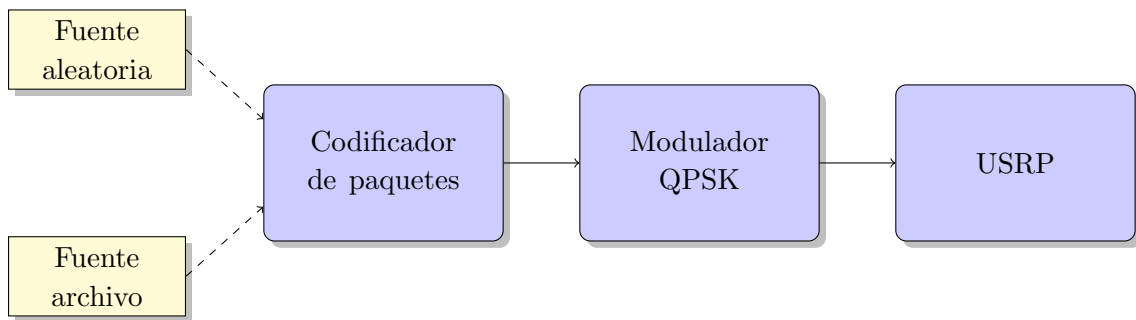


Figura 3-9: Diagrama a bloques del transmisor QPSK.

La declaración del grafo principal se muestra en el listado 3.2. Este grafo consta de un solo bloque que transfiere sus parametros de entrada a un sub-bloque que encapsula las operaciones de inicializacion del USRP.

Todos los bloques son clases Python que se derivan de la clase `top_block`. Esta clase se encuentra dentro del modulo `gr` y se accede a ella utilizando el operador punto. En el constructor se inicializa un nuevo bloque creando una nueva instancia de la clase `usrp_transmit_path`. A esta clase se le pasan los mismos parámetros que

```

class my_top_block(gr.top_block):
    def __init__(self, modulator, options):
        gr.top_block.__init__(self)

        self.txpath = usrp_transmit_path.usrp_transmit_path(modulator,
                                                                options)

        self.connect(self.txpath)

```

Listado 3.2: Declaración del bloque jerárquico principal.

recibió el bloque principal y son el tipo de modulador que se va utilizar y las opciones del programa. La clase `top_block` define un método llamado *connect* para realizar la conexión entre los bloques de la cadena de RF. Como este grafo consta únicamente de un solo bloque, a este método se le pasa solo un parámetro. Este método acepta una cantidad variable de parámetros ya que podemos realizar conexiones entre varios bloques. Esto se mostrará mas adelante.

El grafo de RF está formado por varios bloques jerárquicos, es decir, bloques que encapsulan otros sub-bloques, que conectados entre si, forman un sub-grafo. Esto permite crear nuevos bloques a partir de otros que ya existen. El bloque `usrp_transmit_path` es un ejemplo de un bloque jerárquico. Estas clases se derivan de `gr.hier_block2` y en su constructor se declaran las entradas y salidas que pueda tener. Es posible crear un bloque con entradas y ninguna salida o vice versa. Esto permite crear bloques que aceptan un flujo de datos para ya sea procesarse dentro de ellos unicamente o ser enviados a un puerto de salida o entrada. El constructor de este bloque se muestra en el listado [3.3](#).

Lo primero que se tiene que hacer en este tipo de bloques es definir sus entradas y salidas. Esto se logra invocando el constructor de la clase base `hier_block2` y pasandole los siguientes parámetros: la clase derivada por medio de la palabra clave `self`, una cadena con el nombre del bloque, la definición de entradas y la de salidas. Para definir las entradas y salidas se utiliza la funcion `gr.io_signature()` y se le pasan tres parámetros: número mínimo de puertos, el máximo numero de puertos y

```

class usrp_transmit_path(gr.hier_block2):
    def __init__(self, modulator_class, options):
        gr.hier_block2.__init__(self, "usrp_transmit_path",
                                gr.io_signature(0, 0, 0), # Declaracion de entradas
                                gr.io_signature(0, 0, 0)) # Declaracion de salidas
        if options.tx_freq is None:
            sys.stderr.write("-f FREQ or --freq FREQ or\n"
                             "--tx-freq FREQ must be specified")
            raise SystemExit

        #Inicializacion del USRP
        self._modulator_class = modulator_class
        self._setup_usrp_sink(options)

        tx_path = transmit_path.transmit_path(modulator_class, options)
        for attr in dir(tx_path):
            if not attr.startswith('_') and not hasattr(self, attr):
                setattr(self, attr, getattr(tx_path, attr))

        #conexion de bloques
        self.connect(tx_path, self.u)

```

Listado 3.3: Constructor del bloque transmisor del USRP.

```

class HierBlock(gr.hier_block2):
    def __init__(self, audio_rate, if_rate):
        gr.hier_block2.__init__(self, "HierBlock",
                                gr.io_signature(1, 1, gr.sizeof_float),
                                gr.io_signature(1, 2, gr.sizeof_gr_complex))

        B1 = gr.block1(...)
        B2 = gr.block2(...)

        self.connect(self, B1, B2, self)

```

Listado 3.4: Ejemplo de declaración de entradas y salidas para un bloque jerárquico.

el tamaño de los elementos que entran y salen por los puertos. Un ejemplo de como declarar un bloque con puertos de entrada tipo *float* y de salida tipo *complex* se muestra en el listado 3.4:

Dentro del constructor se crean instancias de los bloques que formarán parte del grafo y por ultimo se realiza la conexión entre ellos. Todas las clases que se derivan de alguno de los bloques, `top_block` o `hier_block2`, etc., contienen un metodo que se llama `connect`. Este metodo recibe una cantidad variable de parametros para realizar la conexión entre los bloques. En el listado 3.4, la conexión se realizó de esta

código de acceso	longitud	información	crc32
------------------	----------	-------------	-------

Figura 3–10: Estructura del paquete de datos.

manera: **entradas**->**B1**->**B2**->**salidas**. Las entradas y salidas son representadas por el parámetro **self**. Para definir bloques que no tienen entradas o salidas es necesario pasarle ceros a todos los parámetros de la función **gr.io\_signature()** como se muestra en el listado 3.3. En este caso el bloque no cuenta con entradas ni salidas, únicamente encapsula un sub-grafo al cual se le delega el trabajo del transmisor.

El bloque **transmit\_path**, del cual se crea una instancia en el listado 3.3, encapsula el grafo que lleva a cabo la modulación de la información que se va transmitir. El modulador en si es un bloque que se encuentra dentro del módulo **blks2** como se muestra en la figura 3–8. Aunque es posible utilizar los bloques moduladores directamente, la aplicación **benchmark\_tx.py** muestra una forma alterna de utilizarlos que consiste en codificar y formatear la información en paquetes antes de ser modulados como se muestra en la figura 3–9. Este proceso se lleva a cabo utilizando la clase **mod\_pkts** del módulo **pkt**. Esta clase envuelve cualquier clase moduladora que se le proporcione y se encarga de codificar y formar paquetes de bits con una estructura específica que permite sincronizar la transmisión y disminuir los errores. La estructura que tienen los paquetes generados con esta clase se muestra en la figura 3–10.

El código de acceso es una cadena de unos y ceros que se puede utilizar para aceptar mensajes que contengan únicamente el código correcto. La clase genera una secuencia pre-definida si no se especifica una. La longitud es lo largo del mensaje junto con el código CRC. La información se anexa junto con el código CRC de 32 bits. Los paquetes se envían al modulador a través de una cola que almacena lo que

se va enviar. La clase moduladora monitorea esta cola y toma el primer mensaje que entro para iniciar con la operación de modulación.

### 3.5.2. Estructura del modulador DQPSK

*GNURadio* contiene varios bloques que definen varios esquemas de modulación digital. El estudio de este trabajo se enfoca en el bloque DQPSK. La estructura del grafo que implementa este esquema se muestra en la figura 3-11.

Los bits individuales de cada byte que van entrando al grafo son descompuestos en grupos de dos ya que cada símbolo en una transmisión DQPSK contiene dos bits. El bloque de mapeo codifica los bits en un alfabeto de tamaño  $M$  donde en este caso es 4 para la constelación QPSK. La codificación utiliza el método de Gray y consiste en hacer que cada valor binario sucesivo difiera únicamente por un bit. Esta codificación es opcional y se puede deshabilitar si no se desea utilizar.

El esquema DQPSK implementa un codificador y decodificador diferencial antes de la modulación y después de la demodulación. Esta codificación tiene dos ventajas. La primera es simplificar el diseño del receptor ya que en lugar de tener una referencia exacta de la fase que se utilizó para enviar la información, ahora se utiliza la diferencia entre dos bits. Esto nos permite realizar una recuperación no coherente

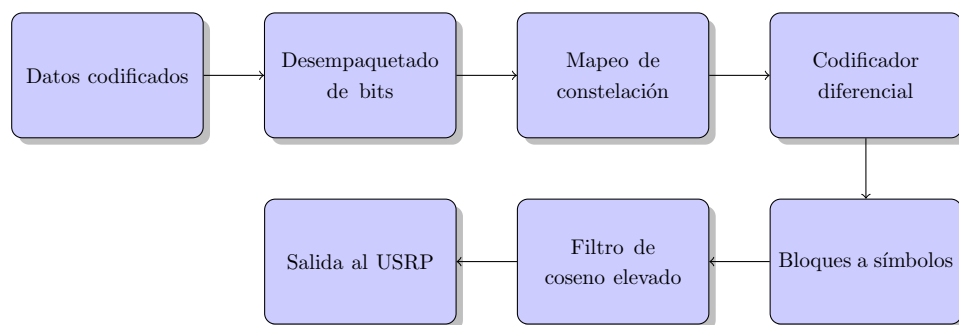


Figura 3-11: Estructura del modulador DQPSK de *GNURadio*

de la información. La segunda ventaja es que ofrece protección contra la inversión de polaridad. Este método nos permite recuperar la información independientemente si este fenómeno sucede o no. Como estamos utilizando dos bits para la codificación, la desventaja principal es que un error causaría errores en dos bits en lugar de uno y por consecuencia aumenta la probabilidad de error de bits. La representación matemática del codificador y decodificador se muestra en las ecuaciones 3.5 y 3.6.

$$e_k = e_{k-1} \oplus b_k \quad \rightarrow \text{codificador} \quad (3.5)$$

$$b_k = e_k \oplus e_{k-1} \quad \rightarrow \text{decodificador} \quad (3.6)$$

donde  $e_k$  es el bit codificado,  $b_k$  es el bit decodificado y el operador  $\oplus$  representa la operación xor.

Los bits son transformados a su representación compleja dependiendo de la constelación que se especificó, para este estudio  $M = 4$ , y luego son introducidos a un filtro de coseno elevado para reducir la cantidad de ancho de banda requerida para transmitirlos y eliminar el efecto de ISI. La respuesta a la frecuencia de este filtro está caracterizada por el parámetro  $\beta$  que especifica la cantidad de ancho de banda mas allá del límite de Nyquist de  $1/2T$  (Sklar, 2001). A este parametro se le llama exceso de ancho de banda. La respuesta a la frecuencia de este filtro se muestra en la ecuación 3.7.

$$H(s) = \begin{cases} 1 & \text{para } |f| < \frac{1-\beta}{2T} \\ \cos^2 \frac{\pi}{4} \frac{2T|f|+\beta-1}{\beta} & \text{para } \frac{1-\beta}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0 & \text{para } |f| > \frac{1+\beta}{2T} \end{cases} \quad (3.7)$$

## Capítulo 4

# RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados del estudio de la plataforma USRP. El experimento consistió en transmitir datos generados de una fuente aleatoria por software y de una fuente fija que consiste en una imagen entre las tarjetas LFTX y LFRX por medio de un cable coaxial. Estos datos son modulados con el esquema DQPSK como esta implementado en *GNURadio* . Después se observaron los resultados utilizando las herramientas proporcionadas por *GNURadio* y el lenguaje Python.

### 4.1. Material utilizado

El material que se utilizó para realizar el experimento fue el siguiente:

- 1 USRP
- Tarjetas LFTX y LFRX
- Cable coaxial con terminales SMA a SMA
- Cable USB
- Computadora laptop con las siguientes características:
  - CPU Intel Core 2 Duo T5550 a 1.83Ghz
  - 4GB memoria DDR2
  - Sistema operativo Ubuntu 10.01

Los programas `benchmark_tx.py` y `benchmark_rx.py` de la carpeta de ejemplos del código fuente fueron utilizados para realizar la transmisión, ya que estos ejemplos son programas completos y maduros que ayudan a ilustrar varias características de la programación con *GNURadio* . Los programas `benckmark_tx2.py`



y `benchmark_rx2.py` tienen la misma estructura que su versión anterior pero estos implementan el modulador y demodulador utilizando la técnica de filtros polifásicos. Esta versión, incluyendo los bloques que implementan estos filtros, fueron incluidos en el código fuente el 23 de Marzo de 2010 y fueron incluidos en este estudio para comparar el rendimiento de ambas versiones.

#### 4.2. Parámetros utilizados

Para ejecutar los ejemplos `benchmark_tx.py` y `benchmark_rx.py` es necesario moverse al directorio donde se encuentran. La ruta es:

```
<dir_donde_esta_el_codigo_fuente>/gnuradio-examples/python/digital
```

Los programas se ejecutan por medio de la consola de texto utilizando la notación `./` para indicar que se va a correr un ejecutable. La sintaxis completa es:

```
./benchmark_tx.py <opciones>
```

donde opciones son algunas opciones que se pueden pasar al programa para controlar su funcionamiento. Para ver todas las opciones que soporta se puede utilizar el siguiente comando:

```
./benchmark_tx.py --help
```

Los opciones que se utilizaron para el transmisor y receptor son los siguientes:

##### TRANSMISOR

- **-m:** Especifica el modulador que se va a utilizar. La opción que se utilizó fue DQPSK y DBPSK. BPSK se utilizó para realizar la comparación entre ambos esquemas.
- **-r:** Especifica la tasa de bits. Se utilizaron varios valores desde 100kbps hasta 10kbps. Este valor depende mucho de la PC que se esté utilizando ya que valores muy altos dependen del rendimiento del CPU.
- **-tx-amplitude:** Especifica la amplitud de la señal generada por el DAC en el USRP. Sus valores van de 0 a 1. Se utilizó el valor default de 0.25.

- **-excess-bw**: Especifica el parámetro  $\beta$  del filtro acoplador de coseno elevado. Su rango de valores es de 0 a 1. Se utilizaron tres valores para el análisis: 0.35, 0.50 y 0.75.
- **-f**: Especifica la frecuencia con la cual se van a sintonizar las tarjetas auxiliares. Para este estudio se estuvo utilizando la frecuencia máxima que soportan las tarjetas LFTX y LFRX que es 30Mhz.
- **-S**: Especifica la cantidad de muestras por símbolo. El valor default es de 2. Se observo que se tuvo un mejor rendimiento con un valor de 4.

## RECEPTOR

- **-m**: Especifica el demodulador que se va utilizar. Igual que en el transmisor se utilizó DQPSK y DBPSK.
- **-gain-mu**: Especifica la ganancia que se utiliza en el lazo de costas para la detección de la fase. Se utilizo un valor de 0.5.
- **-f**: Especifica la frecuencia a la que se sintoniza la tarjeta RX. Se utilizó un valor de 30Mhz.
- **-S**: Especifica la cantidad de muestras por símbolo utilizada en el demodulador. Igual que en el transmisor se utilizo un valor de 4.
- **-r**: Especifica la taza de bits. Se utilizaron los mismos valores que en el transmisor.
- **-excess-bw**: Especifica el parámetro  $\beta$  del filtro acoplador de coseno elevado. Se utilizaron los mismos valores que en el transmisor.

Cabe mencionar que debido a que los dos programas son independientes uno del otro, es necesario igualar algunos parámetros para lograr una transmisión exitosa. Los parámetros **--f**, **-S**, **-r** y **--excess-bw** son un ejemplo de estos parametrós. Todos los parámetros tienen valores default si no se desea modificarlos pero uno de ellos es obligatorio especificarlo y es el de la frecuencia de sintonización **-f**. Si

se ejecutan los programas sin especificar este parámetro, aunque se especifiquen los otros, marcara un error pidiendo que se especifique la frecuencia de operacion.

### 4.3. Taza de error de bits

El análisis de la tasa de error de bits (Bit error rate o BER por sus siglas en ingles) se realizo para ambos modelos de DQPSK proporcionados por *GNURadio*. El programa que se utilizo fue basado en un estudio generado y publicado en la pagina de *GNURadio* sobre una versión mas optima del modulador GMSK. El programa fue modificado para que pudiera analizar y comparar ambos esquemas DBPSK y DQPSK en sus dos versiones: costas/MM y filtros polifasicos.

La estructura del programa está dividida en 3 etapas. La primera etapa genera una señal de una fuente de números pseudo-aleatorios y luego la modula utilizando el modulador que se va a evaluar. Los datos arrojados del modulador son enviados a archivos que se utilizaran como la entrada para las siguientes etapas. El programa define una clase llamada **SigGen** derivada de la clase **top\_block** para definir un grafo de flujo de datos. La estructura del grafo se muestra en la figura 4-1.

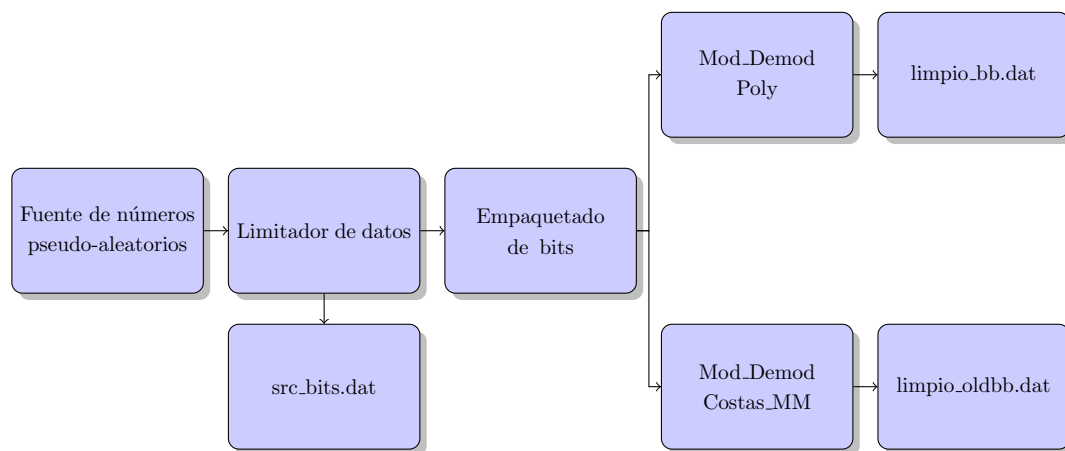


Figura 4-1: Grafo generador de datos modulados para la evaluación del BER.

Los bloques se describen de la siguiente manera:

- **Fuente de números pseudo-aleatorios:** El bloque se genera por medio de la clase `gr.glfsr_source_b`. Esta clase implementa un registro de desplazamiento con retroalimentación lineal en modo Galois. El sufijo “b” indica que el generador entrega valores binarios. El parámetro que se le especifica es el numero de bits de precisión para generar una secuencia de bits de longitud  $2^{N-1}$ , el cual expresa la máxima cantidad de valores que puede generar antes de ciclarse ([Alfke, 1996](#)).
- **Limitador de datos:** Este bloque se genera por medio de la clase `gr_head`, el cual su función es tomar una cierta cantidad de valores en su entrada y descartar todo lo demás. A esta secuencia de valores se le anexa el valor especial *EOF* que especifica el fin del flujo dentro del grafo. Esto causará que el grafo termine su ejecución una vez que este valor se propague a todos los bloques. Sus parámetros el tipo de datos con el que va trabajar y la cantidad de muestras que va dejar pasar de su entrada a su salida.
- **Source\_bits.dat, Limpio\_bb.dat, Limpio\_oldbb.dat:** Estos bloques utilizan la clase `gr.file_sink` para enviar el flujo de datos a un archivo. En este grafo se generan tres archivos para guardar los bits originales y los bits modulados con los dos tipos de moduladores de *GNURadio*. Sus parámetros son el tipo de datos que van a escribir y el nombre del archivo.
- **Empaquetado de bits:** Este bloque se implementa utilizando la clase `gr.unpacked_to_packed_bb`. Se encarga en juntar los bits que entrar y formar bytes completos en la salida. Estos bytes representan la información original.
- **Mod\_Demod Poly y Mod\_Demod Costas\_MM:** Estos bloques representan los moduladores que se evaluaron durante el experimento y se implementan con las clases `blks2.dqpsk_mod` y `blks2.dqpsk2_mod` respectivamente.

El código que implementa este grafo se muestra en el listado [4.1](#).

```

class SigGen(gr.top_block):
    def __init__(self, num_bits=5000, pn_degree=23, xmit_bt=0.25,
                  samp_per_symbol=8):
        gr.top_block.__init__(self, 'SigGen')

        src = gr.glfsr_source_b(pn_degree)
        src_limiter = gr.head(gr.sizeof_char, num_bits)

        bit_packer = gr.unpacked_to_packed_bb(1, gr.GR_MSB_FIRST)
        mod = blks2.dqpsk2_mod(samp_per_symbol, xmit_bt)

        bit_packer_old = gr.unpacked_to_packed_bb(1, gr.GR_MSB_FIRST)
        mod_old = blks2.dqpsk_mod(samp_per_symbol, xmit_bt)

        self.connect(src, src_limiter)
        self.connect(src_limiter, gr.file_sink(gr.sizeof_char, 'src_bits.
        dat'))
        self.connect(src_limiter, bit_packer, mod, gr.file_sink(gr.
        sizeof_gr_complex, 'limpio_bb.dat'))
        self.connect(src_limiter, bit_packer_old, mod_old, gr.file_sink(gr.
        sizeof_gr_complex, 'limpio_old_bb.dat'))

```

Listado 4.1: Código que implementa el grafo generador de señales.

La segunda etapa toma la señal modulada de los archivos y los pasa a través de un grafo que aplica ruido Gaussiano para simular un canal de transmisión AWGN. El grafo se muestra en la figura 4-2.

El grafo toma como entrada característica el valor de la relación de energía de bit a ruido  $E_b/N_0$  que se va utilizar en el análisis. Los bloques se implementan de la siguiente manera:

- **Fuente de datos de archivo:** Este bloque se implementa con la clase `gr.file_source`. Se utiliza para leer el archivo generado del grafo 4-1 que contiene los bits modulados.
- **Fuente de ruido:** Este bloque se implementa usando la clase `gr.noise_source_c`. El prefijo “c” indica que trabaja con datos complejos. La clase acepta dos parámetros de entrada: el tipo de ruido que se quiere generar y la magnitud. El tipo de ruido puede ser una de las siguientes constantes:

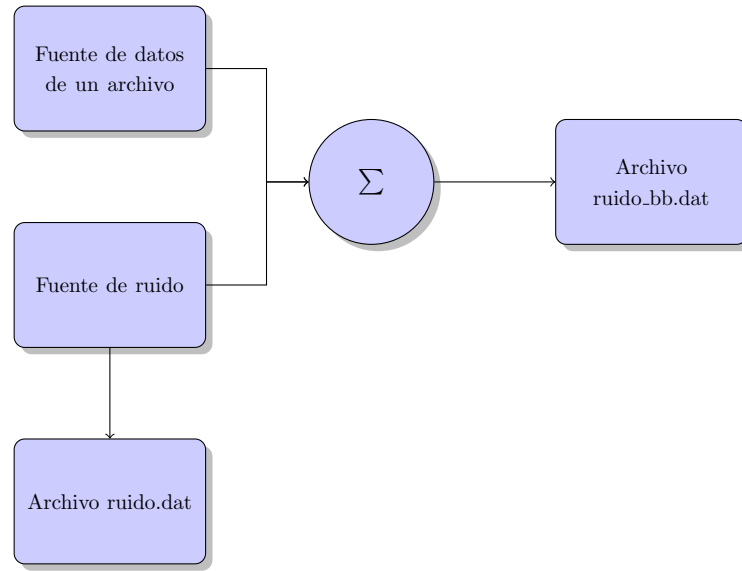


Figura 4-2: Grafo que simula un canal AWGN

- GR\_UNIFORM
- GR\_GAUSSIAN
- GR\_LAPLACIAN
- GR\_IMPULSE

Para simular el canal AWGN se utilizó la constante **GR\_GAUSSIAN**.

- **Archivo ruido.bb.dat y Archivo ruido.dat:** Este bloque usa la clase `file_sink_c` para guardar los datos complejos que representan la señal mezclada con el ruido. El archivo `ruido.dat` guarda los datos que representan el puro ruido sin la señal modulada.

Para determinar la magnitud del ruido el programa primero calcula la potencia promedio del archivo que contiene la señal modulada sin ruido, la energía por bit y por último la magnitud del ruido. La potencia se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$P_{prom} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n) \quad (4.1)$$

```

def get_p_avg_watts(fn, is_complex=False):

    f = open(fn)
    d = f.read()
    num_floats = (len(d)/4)
    d = struct.unpack('f'*num_floats, d)
    if is_complex:
        d = d[::2] #toma la parte real
    d_sq = [x*x for x in d]
    return sum(d_sq)/len(d_sq)

def get_eb_joules(fn, bits_per_sec, is_complex=False):

    p_avg = get_p_avg_watts(fn, is_complex=is_complex)
    return p_avg / bits_per_sec

```

Listado 4.2: Funciones en Python para calcular la potencia y la energia promedio de una señal

La energía por bit se calcula a partir de la potencia como se muestra en la siguiente expresión:

$$E_b = \frac{P_{prom}}{f_b} \quad (4.2)$$

donde  $f_b$  es la tasa de bits en bits por segundo.

El listado 4.2 muestra dos funciones en Python que calculan estos dos parámetros.

El código que implementa el grafo 4-2 se muestra en el listado 4.3.

La tercera etapa realiza la demodulación de las señales capturadas por los grafos anteriores. Esta etapa consiste en leer la señal mezclada con ruido, aplicar un filtro pasa bajas pre-selector para seleccionar la porción del canal que nos interesa, demodular la señal recibida y guardar los datos generados en un archivo para realizar la comparación. La estructura del grafo que realiza esta etapa se muestra en la figura 4.3.

El grafo tiene un parámetro obligatorio y es el demodulador que se va utilizar para el análisis. Los demás son opcionales y establecen los parámetros de muestras por símbolos, símbolos por segundo y los parámetros de ancho de banda para el filtro

```

class NoiseGen(gr.top_block):
    def __init__(self, ebn0_dB, bits_per_sec, samp_per_sec):
        gr.top_block.__init__(self, 'NoiseGen')

        ebn0_ratio = dB_to_ratio(ebn0_dB)

        n0_watts_per_Hz = bertool.get_eb_joules(fn = 'limpio_bb.dat',
            bits_per_sec = bits_per_sec) / ebn0_ratio
        n_mag = sqrt(0.5 * n0_watts_per_Hz * samp_per_sec)
        n_src = gr.noise_source_c(gr.GR_GAUSSIAN, n_mag)
        sig_src = gr.file_source(gr.sizeof_gr_complex, 'limpio_bb.dat')
        adder = gr.add_cc()

        self.connect(sig_src, adder, gr.file_sink(gr.sizeof_gr_complex, '
            ruido_bb.dat'))
        self.connect(n_src, (adder, 1))
        self.connect(n_src, gr.file_sink(gr.sizeof_gr_complex, 'ruido.dat')
        )

```

Listado 4.3: Código que implementa el grafo generador de ruido

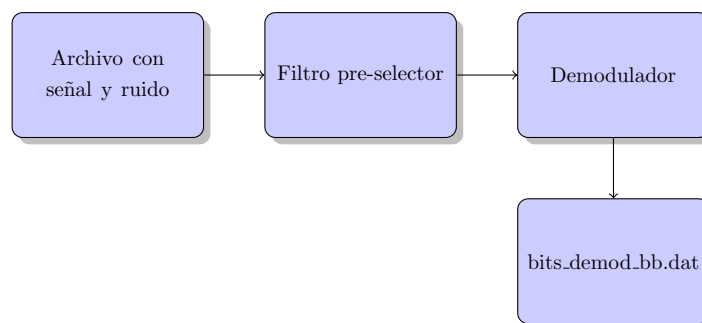


Figura 4-3: Grafo que realiza la demodulación de la señal simulada



pre-selector. Para este análisis se utilizaron los valores por default. Los resultados del filtro se muestran en la figura 4-4.

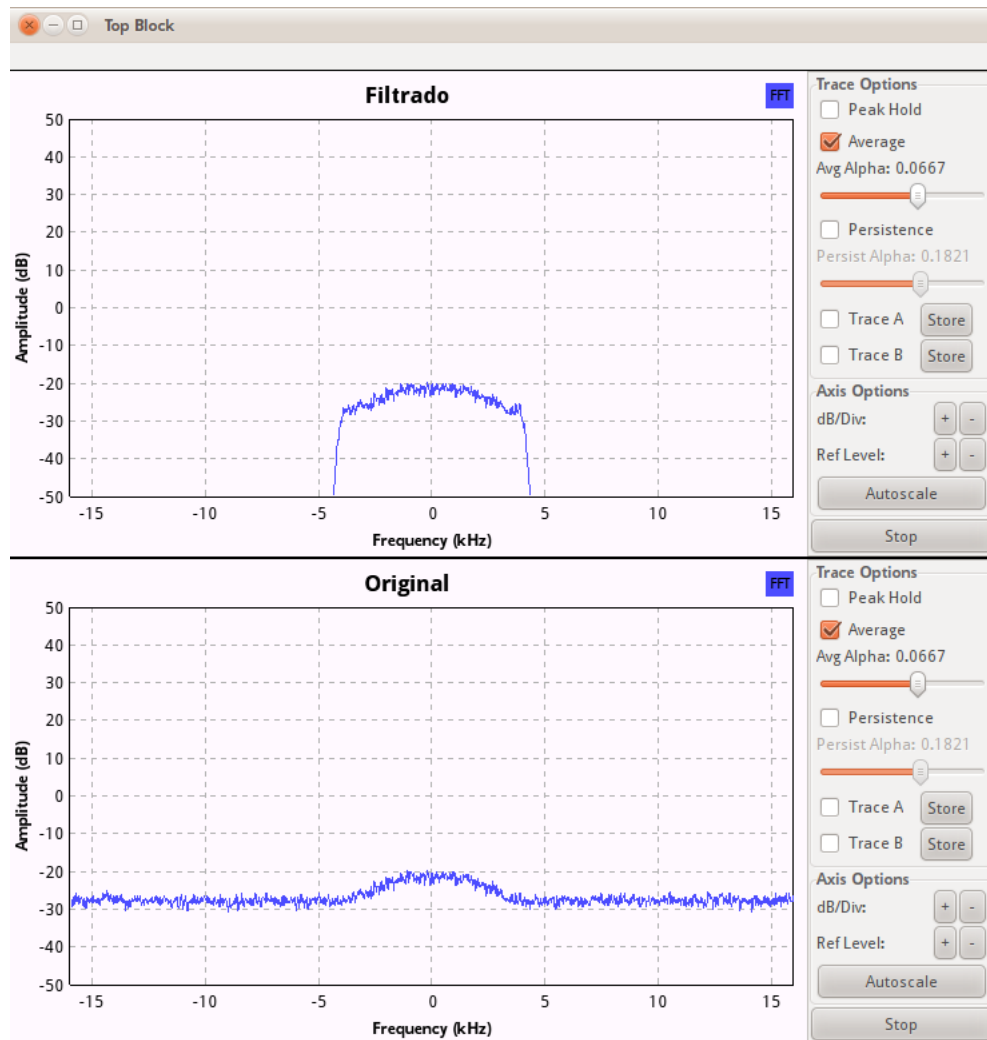


Figura 4-4: Respuesta del filtro pre-selector en el receptor para la medición del BER.

Los bloques del grafo se implementan de la siguiente manera:

- **Archivo con señal y ruido:** La clase `gr.file_source_c` se encarga de leer el archivo generado por el grafo `NoiseGen` para enviarlo al filtro pre-selector.
- **Filtro pre-selector:** El filtro pasa bajas se implementa con una combinación de dos clases: `gr.firdes.low_pass` y `gr.fir_filter_ccf`. El primero se utiliza para generar los coeficientes del filtro a partir de los parámetros de entrada que se le especificuen. Se utilizaron los valores default del ejemplo a

excepción de la ventana. Originalmente utilizaba una ventana de tipo Hamming y se cambió a una ventana Kaiser ya que esta tuvo mejor rendimiento y ayudó a generar una curva de BER más suave. Los parámetros que acepta la clase son la ganancia, la frecuencia de muestreo, la frecuencia de corte, el ancho de la banda de transición y el tipo de ventana. La segunda clase implementa en sí el filtro FIR a partir de los coeficientes generados por la clase `gr.firdes.low_pass`. Sus parámetros de entrada son el factor de decimación y los coeficientes del filtro.

- **Demodulador:** Este bloque representa el demodulador que se está evaluando. En este caso fueron ambos DQPSK y DBPSK en sus dos versiones. Las clases que los implementan se encuentran dentro del paquete `blks2`. Su uso se muestra en el listado 4.5. La clase toma la señal filtrada e inicia el proceso de demodulación y detección. Los resultados son una serie de bits desempaquetados, o sea, bits individuales.
- **Archivo `bits_demod_bb.dat`:** Este bloque usa la clase `gr.file_sink` para escribir a un archivo los bits resultantes del bloque demodulador.

El código que implementa el tercer grafo se muestra en el listado.

El programa principal inicializa los tres grafos y realiza una serie de pruebas para generar la gráfica del BER. La metodología que se siguió fue generar varios valores de  $E_b/N_0$ , desde 12db hasta 2db en intervalos de 0.5db y ejecutar los tres grafos para generar los resultados. Estos resultados se van guardando en un arreglo y posteriormente se grafican. Los parámetros que se utilizaron para la simulación fueron los siguientes:

- **Numero de bits:** 20000
- **Muestras por símbolo:** 7
- **Símbolos por segundo:**  $1e6$
- **Exceso de ancho de banda:** 0.75

```

class Analyser(gr.top_block):
    def __init__(self, bb_src_fn, test_demod, samp_per_sym = 8,
                  sym_per_sec = 1e6, pre_detect_filt_bt = 0.9,
                  filt_transition_ratio = 0.1):
        gr.top_block.__init__(self, 'Analyser')

        self.bb_src_fn = bb_src_fn
        self.samp_per_sym = samp_per_sym
        samp_per_sec = samp_per_sym * sym_per_sec

        bb_src = gr.file_source(gr.sizeof_gr_complex, bb_src_fn)

        pre_detect_filt_bw = sym_per_sec * pre_detect_filt_bt
        pre_detect_filt_taps = gr.firdes.low_pass(1.0, samp_per_sec,
                                                  pre_detect_filt_bw, filt_transition_ratio *
                                                  samp_per_sec,
                                                  gr.firdes.WIN_KAISER, 4.5)
        pre_detect_filt = gr.fir_filter_ccf(1, pre_detect_filt_taps)
        self.connect(bb_src, pre_detect_filt, test_demod)

        self.test_demod_dst_fn = 'bits_demod_bb.dat'
        self.dst = gr.file_sink(gr.sizeof_char, self.test_demod_dst_fn)
        self.connect(test_demod, self.dst)

```

Listado 4.4: Código que implementa el grafo demodulador para el análisis del BER.

El código del programa principal se muestra en el listado 4.5. El programa original se modificó para que pueda evaluar ambos esquemas a la vez.

Los resultados de la primera versión de los esquemas DQPSK y DBPSK se muestran en la figura 4-5.

Los resultados muestran el rendimiento entre los dos esquemas de modulación a diferentes niveles de SNR. Debido a que DQPSK utiliza dos bits por símbolo tiene más probabilidades de generar errores a niveles muy altos de ruido. Para poder lograr niveles confiables de transmisión se requiere más potencia que DBPSK.

La segunda versión de estos esquemas intenta mejorar el BER por medio de la implementación de bancos de filtros polifásicos. La misma metodología se siguió para su análisis y los resultados se muestran en la figura 4-6. Como se puede observar, los filtros polifásicos ofrecen una mejora en el rendimiento de ambos esquemas. A niveles bajos de SNR DQPSK tiene un poco más de tolerancia que la versión anterior para

```

if __name__ == "__main__":
    num_bits = 20000
    samp_per_sym = 7
    sym_per_sec = 1e6
    samp_per_sec = sym_per_sec * samp_per_sym
    print "Samples per second: ", samp_per_sec
    xmit_bt = 0.75
    ebn0s_dB = list(numpy.arange(12.0, 1.999, -0.5))
    recv_bt = 0.9
    recv_filt_transition_ratio = 0.1

    sg = SigGen(num_bits = num_bits, xmit_bt = xmit_bt, samp_per_symbol
                = samp_per_sym)
    sg.run()
    del sg

    dbpsk2_demod_bers = []
    dqpsk2_demod_bers = []
    dbpsk2_delay = None
    dqpsk2_delay = None

    for ebn0_dB in ebn0s_dB:
        print ebn0_dB
        ng = NoiseGen(ebn0_dB = ebn0_dB, bits_per_sec = sym_per_sec,
                      samp_per_sec = samp_per_sec)
        ng.run()
        del ng

        =====
        # Analisis de DQPSK
        =====

        test_dqpsk2_demod = blks2.dqpsk_demod(samples_per_symbol =
            samp_per_sym, excess_bw = xmit_bt)

        a = Analyser(bb_src_fn = 'noisy_qpsk2_bb.dat', test_demod =
            test_dqpsk2_demod, samp_per_sym = samp_per_sym,
            sym_per_sec = sym_per_sec, pre_detect_filt_bt =
            recv_bt,
            filt_transition_ratio = recv_filt_transition_ratio
            )

        a.run()
        a.close()
        del a

        if dqpsk2_delay is None:
            dqpsk2_delay = bertool.get_delay('src_bits.dat', '
            test_demod_dst_bits.dat')
        ber_stats = bertool.get_ber_stats('src_bits.dat', '
            test_demod_dst_bits.dat', dqpsk2_delay)
        dqpsk2_demod_bers.append(ber_stats[0])

```

```

=====
# Analisis de DBPSK
=====

test_dbpsk2_demod = blks2.dbpsk_demod(samples_per_symbol =
    samp_per_sym, excess_bw = xmit_bt)

a = Analyser(bb_src_fn = 'noisy_bpsk2_bb.dat', test_demod =
    test_dbpsk2_demod, samp_per_sym = samp_per_sym,
    sym_per_sec = sym_per_sec, pre_detect_filt_bt =
    rcv_bt,
    filt_transition_ratio = rcv_filt_transition_ratio
    )

a.run()
a.close()
del a

if dbpsk2_delay is None:
    dbpsk2_delay = bertool.get_delay('src_bits.dat', '
        test_demod_dst_bits.dat')
ber_stats = bertool.get_ber_stats('src_bits.dat', '
    test_demod_dst_bits.dat', dbpsk2_delay)
dbpsk2_demod_bers.append(ber_stats[0])

ebn0s_dB.reverse()
dbpsk2_demod_bers.reverse()
dqpsk2_demod_bers.reverse()

fig = p.figure()
p.title(u'Desempeño de DQPSK y DBPSK')
ax = fig.add_subplot(111)
ax.semilogy(ebn0s_dB, dqpsk2_demod_bers, 'b', label = 'DQPSK')
ax.hold(True)
ax.semilogy(ebn0s_dB, dbpsk2_demod_bers, 'r', label = 'DBPSK')
ax.hold(False)

ax.yaxis.grid(True, which = 'minor')
ax.xaxis.grid(True)

p.legend()

p.ylabel('BER')
p.xlabel('Ebn0_dB')
p.show()

```

Listado 4.5: Código Python de la rutina principal del análisis del BER.

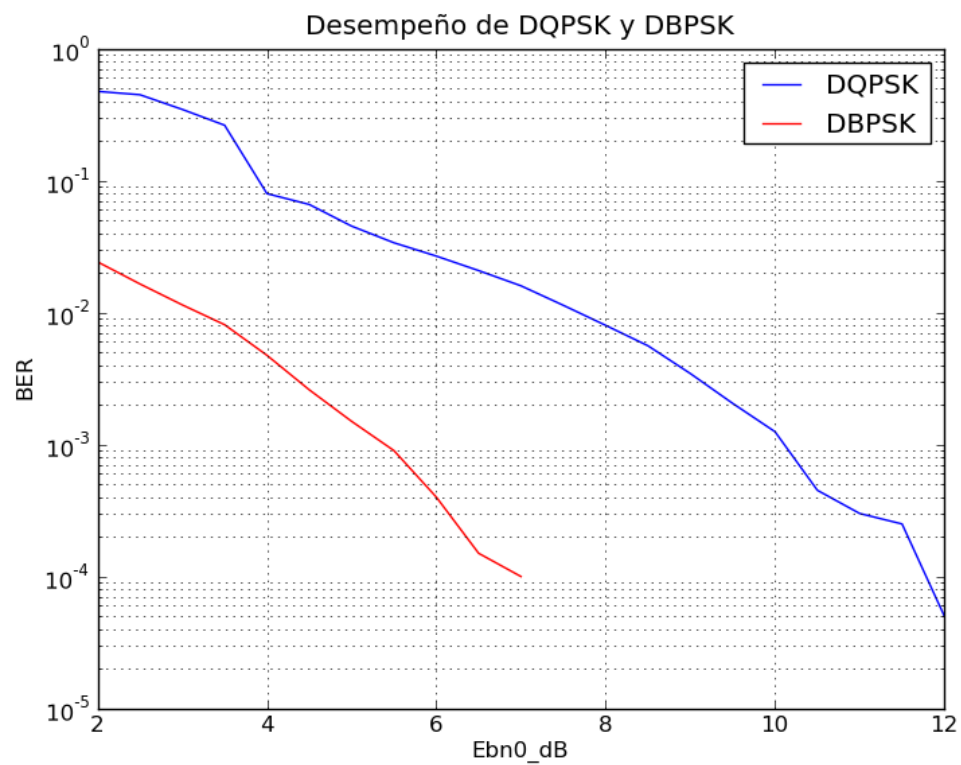


Figura 4-5: Grafica comparativa del BER para la primera versión de los esquemas DQPSK y DBPSK.

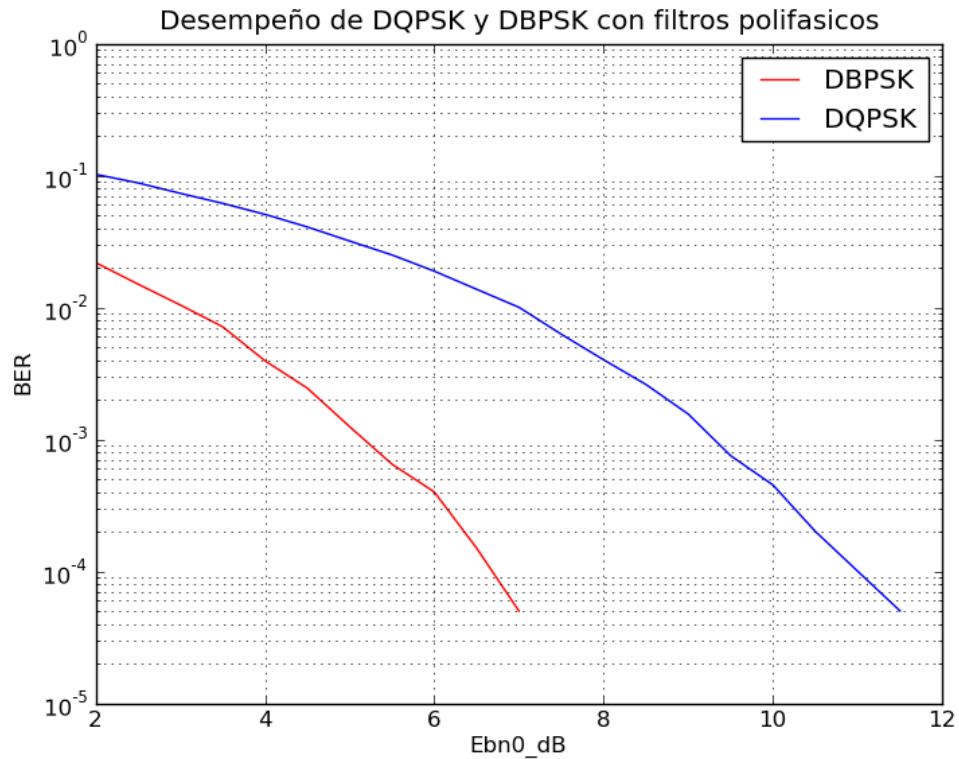


Figura 4-6: Grafica comparativa del BER para la segunda versión de los esquemas DQPSK y DBPSK.

generar errores. Con estos se demuestra el rendimiento del código fuente actual de *GNURadio*.

#### 4.4. Espectrograma de la transmisión

*GNURadio* contiene varias herramientas para visualizar las señales que se transmiten y se reciben. Estas herramientas son programas completos que se pueden utilizar como base para elaborar programas más complejos. Una de estas herramientas visuales es un espectrograma que permite ver la densidad espectral de potencia de una señal que se está recibiendo. La compilación del código fuente instala este programa en `/usr/bin/` para que se pueda acceder a ella de manera global. El programa se llama `usrp_fft.py` y se encuentra originalmente en la carpeta `gr-utils` del código fuente. Este programa se puede acceder desde aquí o bien desde su lugar global por medio de la consola de comandos. El programa proporciona varios parámetros

que permiten que se configure de diferentes maneras dependiendo del uso que se le va dar. Estos parámetros son los siguientes:

- **-w**: Selecciona el USRP que se va utilizar en caso de haber mas de uno conectado a la PC.
- **-R**: Selecciona el lado RX que se va utilizar en el USRP: Lado A o Lado B. Esto lo determina el lugar donde este conectada la tarjeta auxiliar que se va utilizar.
- **-A**: Selecciona la antena que se va utilizar. Esto solo se utiliza con las tarjetas de la serie RFX.
- **-d**: Selecciona el valor de decimacion con el que se configurará el DDC del FPGA. Por default lo configura a 16.
- **-f**: Especifica la frecuencia con la que se sintoniza la tarjeta auxiliar.
- **-g**: Especifica la ganancia con la que se programa el amplificador programable. Los valores son en decibeles.
- **-W**: Activa la opcion de utilizar el espectrograma. Por default la aplicacion actua como un analizador de espectros, desplegando la FFT de la señal recibida.
- **-S**: Activa la opcion de utilizar el osciloscopio.
- **-fft-size**: Especifica el tamaño de muestras que utiliza la FFT. Por default utiliza 1024 muestras.

Este programa se utilizo durante la transmisión de los datos generados por los programas `benchmark_tx.py` y `benchmark_rx.py` para observar la densidad espectral de potencia de la portadora. Las opciones que se utilizaron para configurar el programa fueron las siguientes:

```
usrp_fft.py -f 30M -d 256 -W
```

El espectrograma se muestra en la figura [4-7](#).



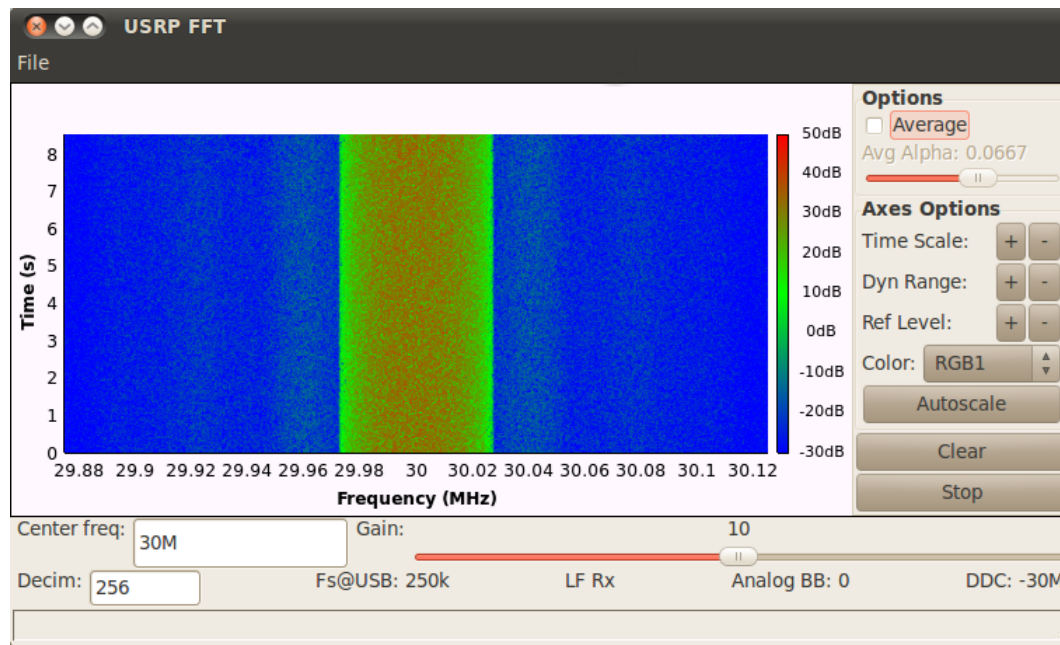


Figura 4–7: Aplicación en Python que muestra el espectrograma de lo que el USRP esta recibiendo.

El espectrograma consiste en una grafica de cascada (waterfall en ingles) que se despliega en forma vertical. El eje Y es el tiempo medido en segundos y la grafica se desplaza hacia arriba. El eje X representa el espectro en Hz. La figura 4–7 muestra la intensidad de la portadora de 30Mhz centrada en la grafica. Los colores tenues a un lado de la barra verde representan las bandas laterales de la portadora. Desde esta aplicación es posible modificar varios parámetros del USRP como la ganancia, la frecuencia y el valor de decimación del DDC. Los ejes también se pueden ajustar por medio de las opciones que aparecen en la derecha de la pantalla (Time Scale, Dyn Range, Ref Level). En este ejemplo la portadora se puede apreciar claramente debido a la ausencia de ruido ya que se utilizo un cable coaxial para la transmisión el cual introduce una cantidad despreciable de ruido.

#### 4.5. Diagrama de ojo

#### 4.6. Constelación observada

## Capítulo 5

# CONCLUSIONES

### 5.1. Trabajo futuro

## 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.

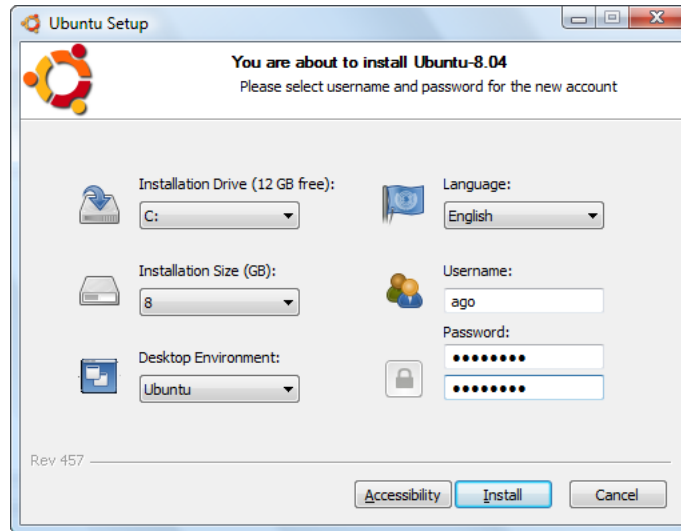


Figura A-1: Opciones del instalador *Wubi*

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 distribución 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.

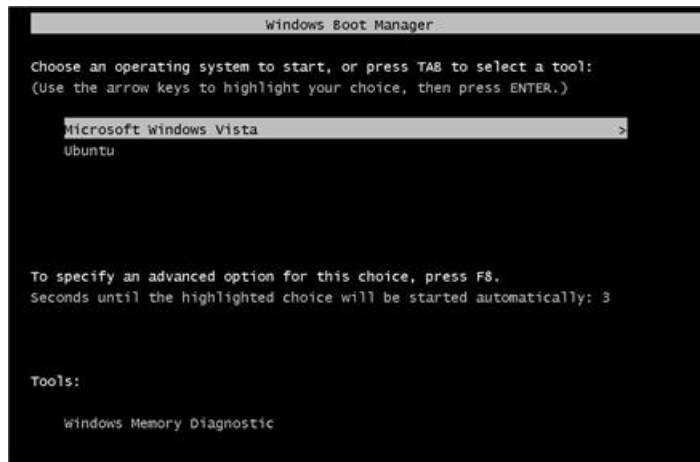


Figura A-2: Menú de arranque con la opción de *Ubuntu*

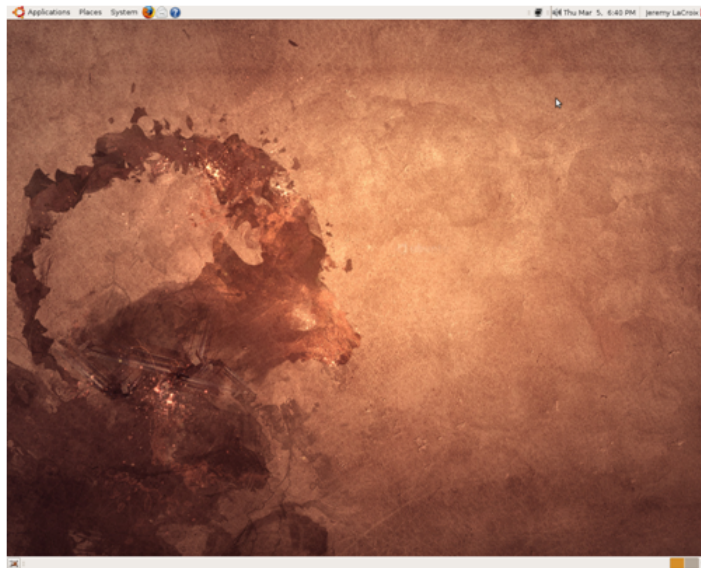


Figura A-3: Escritorio *GNOME* de la distribución *Ubuntu*

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

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



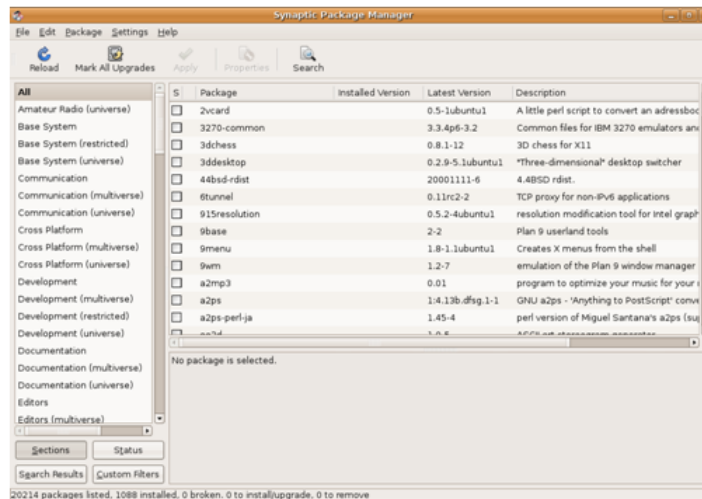


Figura A-4: Administrador de software Synaptic

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 seleccionarl

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 control--reload-rules`. Si esto no funciona entonces se necesita reiniciar la PC para que los cambios tengan efecto.

## Apéndice B

### GNURADIO COMPANION

*GNURadio* incluye una aplicación que facilita el desarrollo de grafos y aplicaciones sencillas de manera grafica, muy similar al software de Simulink de Mathworks. La aplicación genera código en Python a partir del diagrama de bloques que uno define. Es posible manipular y extender el código generado si es que se desea utilizar alguna función que no este incluida en *GNURadio Companion* ([Blum, 2009](#)) (GRC por sus siglas en ingles). Las capacidades de la aplicación son:

- Viene incluido con el código fuente de *GNURadio* . Si se instalan todas las dependencias entonces GRC se instalará junto con *GNURadio* .
- Puede generar código en Python para aplicaciones que utilizan bloques gráficos con la librería WxWidgets, aplicaciones que no utilizan ningún control gráfico y bloques jerárquicos.
- Se pueden definir bloques que actúan como variables o constantes. Otros bloques pueden hacer referencia a ellas e incluir su valor en algún parámetro. También es posible usar bloques variables que definen un control gráfico como barras deslizadoras, botones, etc.
- Cada bloque está definido por un archivo XML que contiene todas sus características (número de puertos, tipo de datos con los que trabaja, parámetros de entrada, etc.). Es posible crear un archivo XML para incluir algún bloque creado por el usuario.
- Los bloques pueden ser deshabilitados dentro de la gráfica sin tener que borrarlos de la aplicación. Estos bloques son ignorados por el generador de

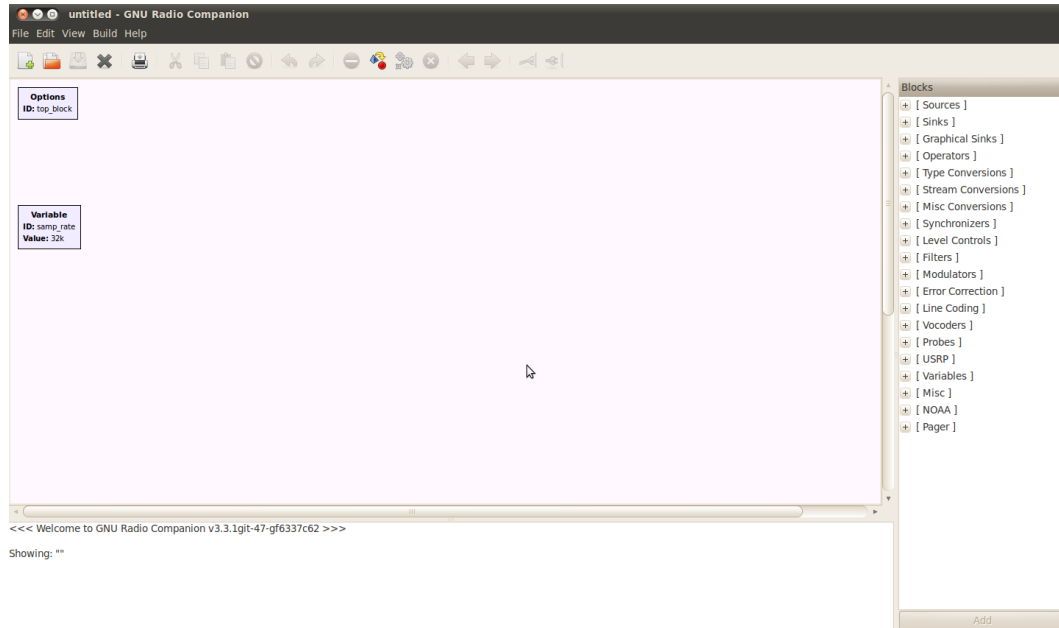


Figura B-1: Pantalla principal de GNURadio Companion

codigo, permitiendo asi una manera mas rapida de realizar cambios en la grafica. Tambien se pueden cortar, copiar y pegar bloques.

Para poder instalar GRC se deben de tener las siguientes dependencias instaladas antes de iniciar la compilación:

- Python 2.5 o mayor (<http://www.python.org/download/>)
- Python-LXML 2.0 o mayor (<http://codespeak.net/lxml/installation.html>)
- Cheetah Template Engine 2.0 o mayor (<http://www.cheetahtemplate.org/download.html>)
- Python-GTK 2.10 o mayor (<http://www.pygtk.org/downloads.html>)

Si estas dependencias se instalan antes de iniciar con la compilación de *GNU-Radio* entonces GRC se instalará automáticamente.

Para iniciar la aplicación se necesita abrir una ventana de consola y escribir el comando `gnuradio-companion`. Inmediatamente aparecerá la ventana que se muestra en la figura B-1.

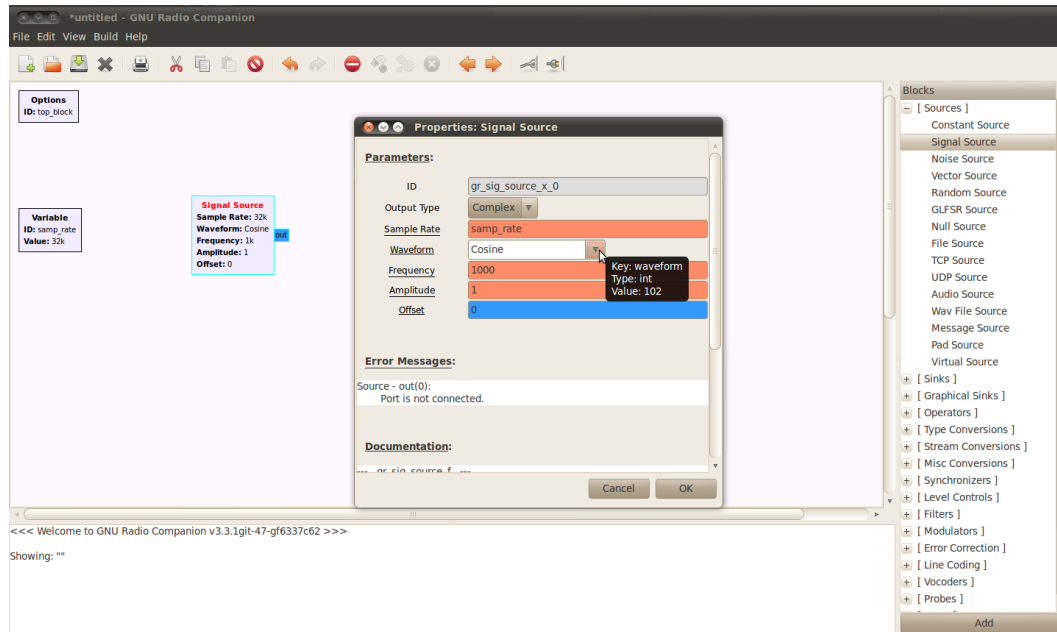


Figura B-2: Pantalla de propiedades del bloque signal\_source

La área de trabajo inicia con dos bloques por default, uno que define las opciones generales del grafo y un bloque que define una variable llamada `sample_time`. Esta variable se puede modificar o borrar según las necesidades del usuario. Del lado derecho se encuentra la lista de las categorías de bloques que soporta GRC. Cada categoría se puede expandir para revelar los diferentes bloques que contiene. Para colocar bloques en el área de trabajo es necesario seleccionar el de interés y arrastrarlo con el mouse a la area de trabajo. De ahí se puede seguir arrastrando para colocarlo en el área que el usuario desee.

Las propiedades de los bloques se pueden obtener haciendo doble click sobre el bloque como se muestra en la figura B-2.

Todos los bloques comparten un parametro en comun y es el ID. Este parametro indentifica al bloque para que otros puedan hacer referencia a el. Se puede aceptar el nombre default que GRC sugiere o bien se puede especificar otro. Los otros parametros son especificos del bloque con el que se esta trabajando. EL bloque

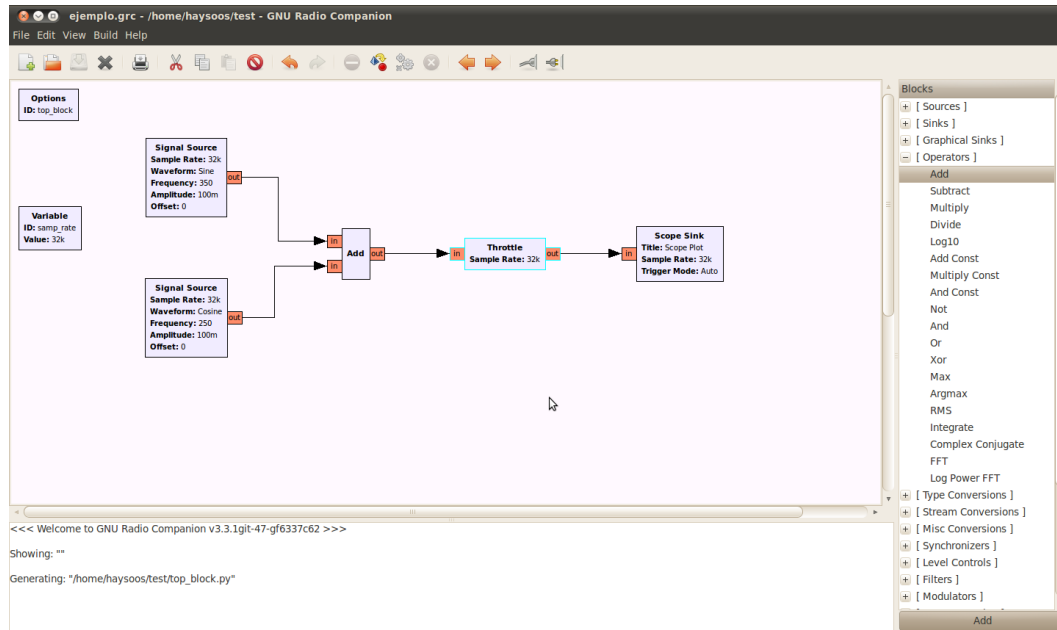


Figura B-3: Ejemplo de un grafo desarrollado en GRC

**signal\_source** de la figura B-2 es un generador de señales que puede generar varios tipos de formas de onda como senoidales, cuadradas, dientes de sierra, etc. Los parametros se describen como sigue:

**Output Type** Especifica el tipo de datos que se va utilizar: Real o Complejo.

**Sample Rate** La taza de muestreo con la que se generará la señal. Aqui se muestra haciendo referencia al bloque que declara la variable `sample_rate`. Esta variable tiene un valor de 32k.

**Waveform** Aqui se define el tipo de señal que se quiere generar.

**Frequency** Este parametro especifica la frecuencia de la señal.

**Amplitude** Este parametro especifica la amplitud de la señal.

**Offset** Especifica un retraso de la señal generada.

En la figura B-3 muestra un ejemplo completo de un grafo que suma dos señales de diferentes frecuencias y muestra el resultado en un osciloscopio.

El ejemplo muestra un requerimiento importante de los grafos que no utilizan fuentes o sinks de hardware como el USRP o la tarjeta de sonido. Los bloques que

hacen referencia a algún hardware limitan automáticamente la velocidad de ejecución del grafo a la velocidad de muestreo del hardware. Como el ejemplo de la figura B-3 no contiene este tipo de bloques es necesario incluir el bloque **Throttle** para limitar la velocidad de ejecución, de lo contrario el grafo se ejecutará a la velocidad máxima del CPU y esto causará que la PC no responda correctamente. Para este ejemplo el bloque hace referencia a la variable `sample_rate` declarada y con esto limita la velocidad de ejecución a la tasa de muestreo que se está utilizando.

El bloque **Scope Sink** es uno de los diversos visualizadores gráficos que permiten observar las señales en diversos puntos del grafo. Este bloque actúa como un osciloscopio con opciones de disparo y modo XY. Otros bloques con los que cuenta GRC para visualizar señales son: analizador de espectros, espectrograma en 2D, histograma y diagrama de constelación.

Si existe un error en alguna de las conexiones, ya sea porque los tipos de datos son incompatibles entre bloques, algunas de las opciones no están correctamente configuradas o falta algún puerto por conectar, estos serán enfatizados de color rojo. Es necesario realizar las correcciones que se piden antes de generar el código y poder ejecutar el grafo.

Para ejecutar el grafo es necesario hacer click en el botón de generar código o en el de ejecutar grafo. Si no se ha grabado el trabajo GRC pedirá que se grabe antes de la ejecución como se muestra en la figura B-4. Una vez realizado esto GRC genera un archivo con código Python y este es el que se ejecuta. La figura B-5 muestra el grafo de la suma de las dos señales ejecutándose y mostrando los resultados en un osciloscopio.

Conforme se vayan anexando bloques visualizadores estos se van agrupando en la misma pantalla de forma vertical. Esto permite visualizar los resultados de una manera más eficiente sin tener que estar cambiando entre diferentes ventanas.



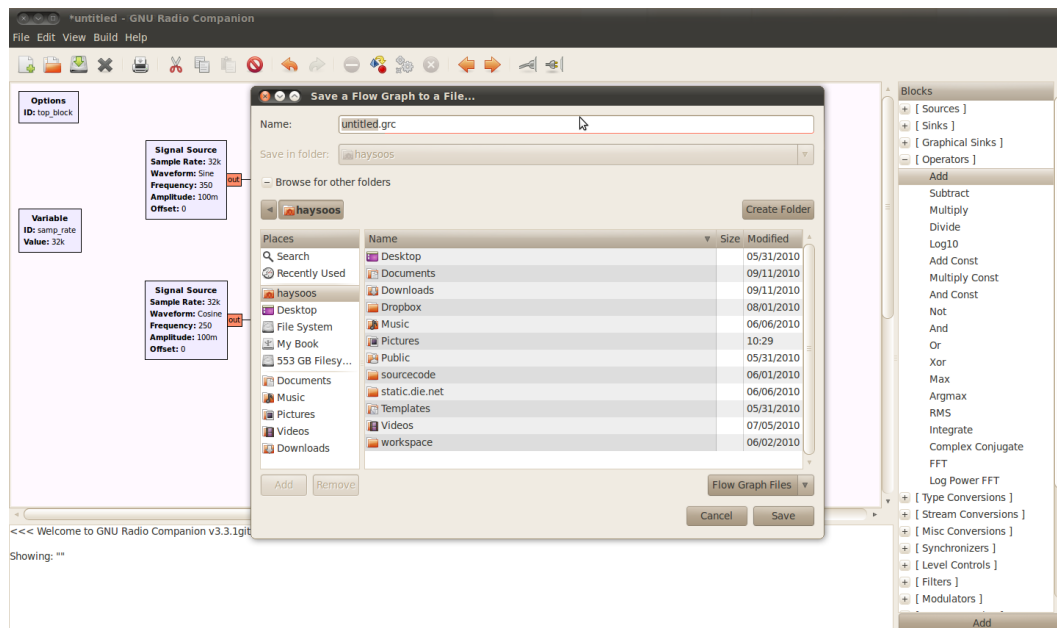


Figura B-4: Pantalla para salvar el trabajo en GRC

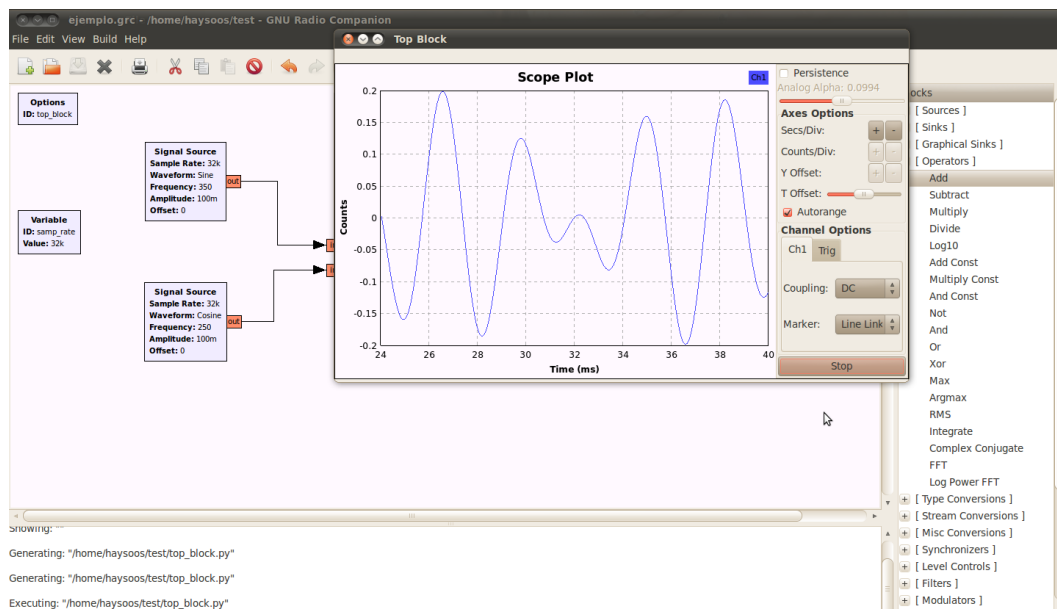


Figura B-5: Ejemplo de un grafo en ejecución

Agregando el bloque FFT al ejemplo obtenemos la pantalla que se muestra en la figura B-6.

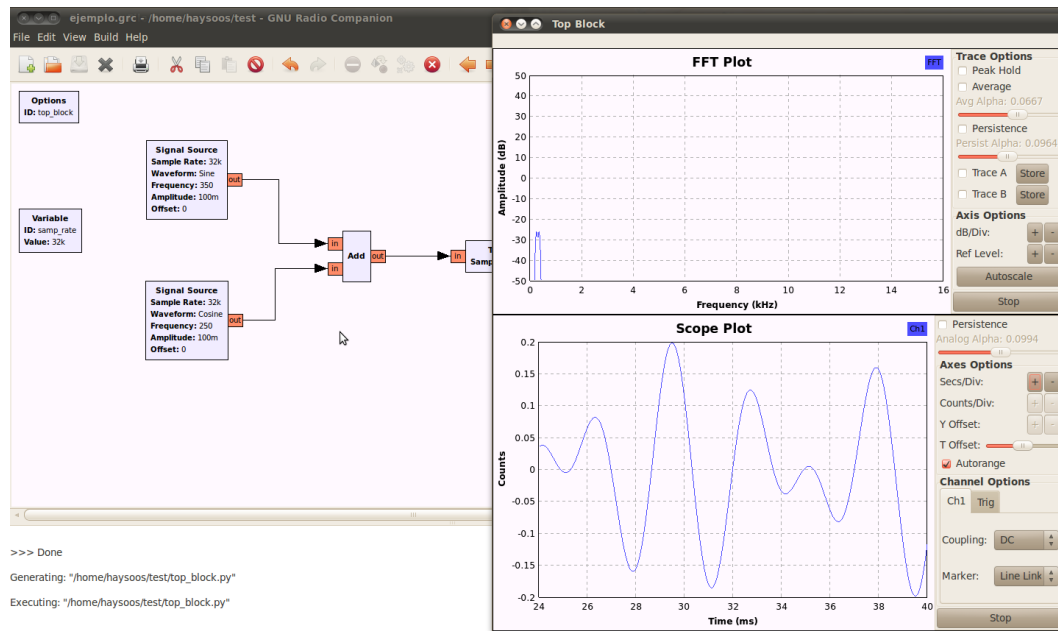


Figura B-6: Bloque FFT en conjunto con el osciloscopio en GRC

Como se menciona al inicio de este apéndice, una de las habilidades de GRC es poder especificar bloques que implementan algún tipo de control grafico como barras deslizadoras. Estos controles se anexas automáticamente junto con los otros controles gráficos y actúan como un bloque con algun valor variable que puede modificar cualquier parámetro del grafo. Para ilustrar esto al ejemplo se anexa un bloque de este tipo con el nombre de amplitud. Al bloque se le especifica un valor default, valor máximo y mínimo y el tipo de dato con el que trabaja. Asignando esta variable a los campos de amplitud de los dos bloques **Signal Source** se puede modificar la amplitud de ambos moviendo la barra deslizadora que aparece en la ventana de visualización como se muestra en la figura B-7.

El ejemplo ilustrado en este apéndice es un solo una pequeña ilustración de las capacidades de *GNURadio Companion*. Los bloques de los generadores de señales se pueden remplazar por bloques que encapsulan algún hardware como tarjetas de

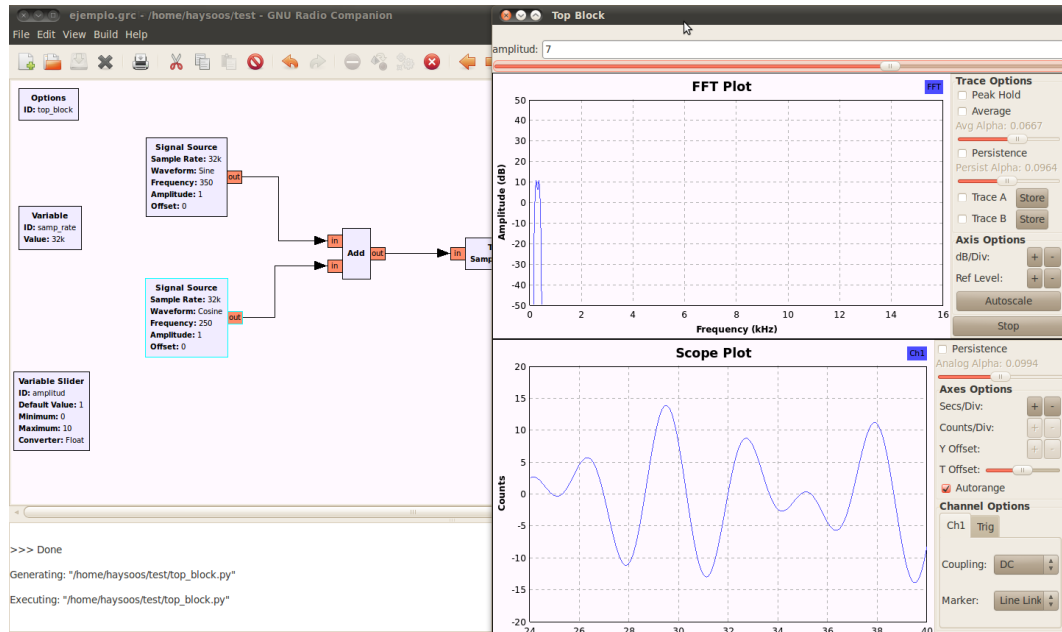


Figura B-7: Modificación de parametros por medio de bloques variables en GRC

audio, el USRP o incluso tarjetas de adquisición de datos, aunque para estas es necesario crear el bloque desde cero y proporcionar los drivers del hardware adecuados. También es posible trabajar con varios filtros como pasa bajas, hilbert y ventanas. GRC en si actúa como una interfaz grafica a los bloques de *GNURadio* facilitando así su uso de una manera más intuitiva. Esto permite una mejor interacción con el software para aplicaciones académicas donde la experiencia con programación no es necesaria.

## Referencias

Abendroth, S. (2003).

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

Alfke, P. (1996). *Efficient shift registers, lfsr counters, and long pseudo-random sequence generators* (Artículo Técnico n.º XAPP 052). Xilinx.

Blum, J. (2009). *Gnuradio companion*. Disponible en <http://gnuradio.org/redmine/wiki/gnuradio/GNURadioCompanion>

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/>

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/military-aerospace-electronics/volume-15/issue-12/features/special-report/software-defined-radio-and-jtrs.html>

- 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.
- Pentek Inc. (2009). *Pentek inc - software defined radio*. Disponible en <http://www.pentek.com/sftradcentral/SFTRadCntrlPrd.cfm#Overview>
- Russo, A. (2007). *Wubi - ubuntu installer for windows*. Disponible en <http://wubi-installer.org/>
- Sklar, B. (2001). *Digital communications fundamentals and applications*. Prentice Hall.
- Texas Instruments. (2008). *Block diagram (sbd) - software defined radio - ti.com*. Disponible en <http://focus.ti.com/docs/solution/folders/print/357.html>
- Universal Implementers Forum. (2000, 27 de Abril). *Universal serial bus 2.0 specification* (Especificación Técnica). Universal Implementers Forum.