



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**Diseño e Implementación del Laboratorio Virtual de Comunicaciones
Analógicas y Digitales de la Universidad del Azuay**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
Ingeniero Electrónico**

Autor:

Oswaldo Andrés Vanegas Guillén

Director:

Edgar Rodrigo Pauta Astudillo

Cuenca, Ecuador

2011

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mis padres Sara y Oswaldo que con su paciencia me han sabido guiar, a mi hermanita Sarita que siempre ha sido mi apoyo y especialmente a Dianita que desde el cielo me acompaña en los momentos más difíciles.

Andrés Vanegas Guillén.

AGRADECIMEINTOS

Al Ing. Edgar Pauta A. por su valiosa guía durante el transcurso del desarrollo del presenta trabajo de graduación.

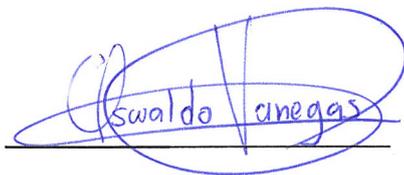
Un agradecimiento especial al Ing. Raúl Segarra y Santiago Orellana de la empresa Data Lights Cía. Ltda., distribuidores de National Instruments, por haberme proporcionado la ayuda necesaria y las herramientas de software y hardware para la realización del presente trabajo de graduación.

290811
Pauta

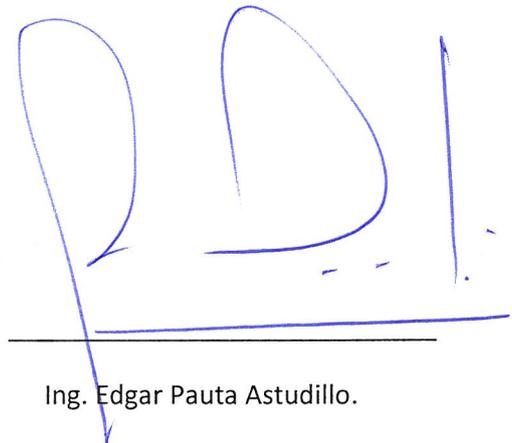
RESUMEN:

“Diseño e Implementación del Laboratorio Virtual de Comunicaciones Analógicas y Digitales de la Universidad del Azuay”

El Laboratorio Virtual de Comunicaciones Analógicas y Digitales es un conjunto de Instrumentos Virtuales desarrollados en software de LabVIEW; en los cuales el docente y alumnos mediante simulaciones podrán observar el comportamiento de las diferentes señales que son utilizadas para la transmisión de señales. Las prácticas cubren los esquemas de modulaciones analógicas y digitales, incluyendo las diferentes fases de digitalización de una señal. Los instrumentos son agrupados en prácticas, las cuales incluyen un documento con la respectiva información teórica e instrucciones del uso del software, además se presenta un cuestionario con preguntas relacionadas a las señales simuladas. /



Oswaldo Andrés Vanegas Guillén



Ing. Edgar Pauta Astudillo.

Director.

290211
Barral

ABSTRACT:

"Design and Implementation of Virtual Laboratory of Analogue and Digital Communications at the University of Azuay"

The Virtual Laboratory of Analogue and Digital Communications is a set of Virtual Instruments developed in LabVIEW, in which the teacher and students through simulations can observe the behavior of the different signals that are used for the information transmission. The practices cover schemes of analog and digital modulations, including the different phases of signal digitalization. The instruments are grouping into practices, which include a document with relevant information about the instructions for use of the software, also provide a questionnaire with related with the simulated signals.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
GLOSARIO.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE SEÑALES Y MEDIDAS ESPECTRALES CON USO DE LABVIEW.....	3
Práctica 1: Introducción al análisis de señales mediante LabVIEW....	4
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Introducción.....	4
1.3 Análisis de Señales.....	4
1.4 Señales Senoidales.....	4
1.5 Análisis en el dominio del tiempo.....	5
1.6 Dominio de la Frecuencia.....	6
1.7 LabVIEW.....	7
1.8 Desarrollo de la práctica de análisis de señales con uso de LabVIEW.....	8
1.9 Ejercicio de Aplicación.....	20
1.10 Conclusiones.....	24
	25
Práctica 2: Introducción a las medidas espectrales.....	
2.1 Objetivos.....	25
2.2 Introducción a la Radio Frecuencia.....	25

2.3 RF Términos y medidas.....	28
2.3.1 Análisis Espectral.....	28
2.3.2 Rango dinámico y resolución de ancho de banda.....	29
2.3.2.1 Resolución de ancho de banda.....	29
2.3.2.2 Piso de ruido.....	30
2.3.2.3 Rango dinámico.....	30
2.3.3 Medidas espectrales.....	31
2.3.3.1 Potencia en banda.....	31
2.3.3.2 Ancho de Banda Ocupada.....	32
2.3.3.3 Potencia del Canal Adyacente.....	33
2.3.3.4 Distorsión Armónica.....	33
2.3.3.4.1 Cálculos de la Distorsión Armónica....	34
2.3.3.5 Mediciones de Potencia Unidades y definiciones.....	35
2.3.3.5.1 Vatios.....	35
2.3.3.5.2 dB.....	35
2.3.3.5.3 dBm.....	36
2.4 Desarrollo de la práctica de medidas espectrales con uso de LabVIEW.....	36
2.5 Ejercicio de Aplicación.....	45
2.6 Conclusiones.....	47
CAPÍTULO 2: MODULACIONES ANALÓGICAS.....	48
Práctica 3: Modulación de amplitud de señales analógicas.....	49
3.1 Objetivos.....	49
3.2 Introducción.....	49
3.3 Principios Modulación de Amplitud.....	49
3.3.1 La envolvente de AM.....	50
3.3.2 Espectro de frecuencias y ancho de banda.....	51
3.3.3 Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación...	53
3.3.4 Distribución de voltaje de AM.....	55
3.4. Tipos de modulación AM.....	57
3.4.1 AM de banda lateral única y portadora de máxima potencia.....	57
3.4.2 AM de banda lateral única y portadora suprimida.....	58

3.4.3 AM de banda lateral única y portadora reducida.....	58
3.4.4 AM de banda lateral residual.....	59
3.5 Desarrollo de la práctica de Modulación de Amplitud con uso LabVIEW.....	59
3.5.1 Comprobación del Instrumento Virtual.....	68
3.6 Ejercicios de Aplicación.....	72
3.7 Conclusiones.....	74
	75
Práctica 4: Modulación de Frecuencia de Señales Analógicas.....	
4.1 Objetivos.....	75
4.2 Introducción.....	75
4.3 Modulación Angular.....	75
4.3.1 Análisis matemático.....	79
4.3.2 Sensibilidad a la desviación.....	81
4.3.3 Formas de onda de FM y PM.....	82
4.3.4 Desviación de fase e índice de modulación.....	84
4.3.5 Desviación de Frecuencia.....	86
4.3.6 Porcentaje de Modulación.....	86
4.3.7 Análisis en frecuencia de las ondas con modulación angular.....	87
4.3.7.1 Modulación mediante una senoidal de frecuencia única.....	87
4.3.8 Ancho de banda para ondas con modulación angular.....	89
4.4 Desarrollo de la práctica de modulación de frecuencia con uso de LabVIEW.....	90
4.5 Ejercicio de Aplicación.....	97
4.6 Conclusiones.....	98
 CAPÍTULO 3: COMUNICACIONES DIGITALES.....	 99
 Práctica 5: Teorema del Muestreo de Señales Analógicas.....	 100
5.1 Objetivos.....	100
5.2 Introducción.....	100
5.3 Muestreo Natural (por compuerta).....	100
5.4 El Solapamiento o Aliasing.....	102
5.5 Desarrollo de la Práctica de Muestreo con uso de LabVIEW.....	104

5.6 Ejercicio de Aplicación.....	111
5.7 Conclusiones.....	113
	114
Práctica 6: Modulación de Amplitud de Pulsos (PAM) y Multiplexión por División de Tiempo (TDM).....	
6.1 Objetivos.....	114
6.2 Modulación de Amplitud de Pulso.....	114
6.2.1 Muestreo natural (por compuerta).....	115
6.2.2 Muestreo instantáneo (PAM plana).....	117
6.2.3 Multiplexión por división del Tiempo (TDM).	120
6.3. Desarrollo de la práctica con uso de LabVIEW.....	124
6.3.1 Instrumento Virtual Modulación de Amplitud de Pulsos....	124
6.3.2 Instrumento Virtual Multiplexión por División de Tiempo de señales “PAM”.....	130
6.4. Ejercicio de Aplicación.....	134
6.5 Conclusiones.....	137
	138
Práctica 7: Modulación por Codificación de Pulsos PCM.....	
7.1 Objetivos.....	138
7.2 Modulación por Codificación de Pulsos.....	138
7.2.1 Muestreo y retención señal analógica.....	139
7.2.2 Cuantificación uniforme y no uniforme.....	141
7.2.3 Ruido de cuantificación.....	142
7.2.4 Cualidades e inconvenientes de PCM.....	143
7.2.5 Ancho de banda en PCM.....	144
7.3 Desarrollo de la práctica de PCM con uso de LabVIEW.	145
7.4 Ejercicio de Aplicación.....	150
7.5 Conclusiones.....	152
 CAPÍTULO 4: MODULACIONES DIGITALES.....	 153
 Práctica 8: Sistemas de Modulación Digitales Binarias Modulación por Desplazamiento de Amplitud ASK.....	 154
8.1 Objetivos.....	154
8.2 Introducción.....	154
8.3 Modulación por cambio de Amplitudes (ASK Amplitude Shift	154

Keying).....	
8.4 Características de la Modulación Digital en el Espectro.....	157
8.4.1 Filtrado del Canal.....	157
8.4.2 Ancho de Banda.....	159
8.5 Errores de Sincronización y Análisis en los Sistemas Digitales.....	160
8.5.1 Jitter.....	160
8.5.2 Medición de Jitter: Diagrama de Ojo y VER.....	161
8.5.3 Diagrama de Ojos.....	163
8.5.4 Ejemplos de Análisis de sincronización de Señales Digitales.....	165
8.5.4.1 Resumen del Diagrama de Ojos.....	167
8.5.5 Eb/ N0.....	167
8.6 Desarrollo de la práctica de modulación por desplazamiento de amplitud Binaria con uso de LabVIEW.	168
8.7 Ejercicio de Aplicación.....	179
8.8 Conclusiones.....	182
	183
Práctica 9: Sistemas de Modulación Digitales Binarias Modulación por Desplazamiento de Frecuencia FSK.....	
9.1 Objetivos.....	183
9.2 Introducción.....	183
9.3 Modulación por desplazamiento de Frecuencia FSK.....	183
9.4 Desarrollo de la práctica FSK con uso de LabVIEW.....	186
9.5 Ejercicio de Aplicación.....	190
9.6 Conclusiones.....	192
	193
Práctica 10: Sistemas de Modulación Digitales Binarias Modulación por Desplazamiento de Fase PSK.....	
10.1 Objetivos.....	193
10.2 Introducción.....	193
10.3 Modulación por desplazamiento de Fase PSK.....	193
10.4 Desarrollo de la práctica PSK con el uso de LabVIEW.....	196
10.5 Ejercicio de Aplicación.....	200
10.6 Conclusiones.....	202
	203
Práctica 11: Sistemas de Modulación Digitales M-arias Modulación de	

Amplitud de Cuadratura QAM	
11.1 Objetivos.....	203
11.2 Introducción.....	203
11.3 Modulación de Amplitud de Cuadratura QAM.....	204
11.3.1 Representación Geométrica QAM.....	204
11.3.2 Ancho de Banda de QAM.....	205
11.4 Desarrollo práctica QAM con uso de LabVIEW.....	206
11.5 Ejercicio de Aplicación.....	212
11.6 Conclusiones.....	214
CONCLUSIONES	215
RECOMENDACIONES	216
BIBLIOGRAFÍA	217
ANEXOS	218

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Designaciones de Bandas de Radio Frecuencia (RF).....	26
Tabla 2.2: Designación de Bandas de Microonda.....	26
Tabla 2.3: Aplicaciones y Asignaciones de Frecuencia en Estados Unidos de Norteamérica.....	27
Tabla 3.1: Lista de Controles del Instrumento Virtual.....	60
Tabla 3.2: Lista de Indicadores del Instrumento Virtual.....	61
Tabla 3.3: Valores Controles paso 2.....	68
Tabla 4.1: Funciones de Bessel de primera Clase.....	89
Tabla 4.2: Componentes de frecuencias de FM.....	96
Tabla 6.1: Listado de Frecuencias de la Señal “PAM” resultantes en el “VI”...	128
Tabla 7.1: Relación Señal Ruido diferentes niveles de Cuantificación.....	143
Tabla 8.1: Definiciones alternativas de Ancho de Banda.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Representación en el dominio del tiempo de una onda senoidal de frecuencia única.....	6
Figura 1.2: Representación en el dominio de la frecuencia (espectro) de una onda senoidal de frecuencia única.....	7
Figura 1.3: Representación de un Instrumento Virtual en LabVIEW.....	8
Figura 1.4: Ventana de Inicio de LabVIEW.....	9
Figura 1.5: Instrumento Virtual en Blanco. Izquierda Panel Frontal. Derecha Diagrama de Bloques.....	9
Figura 1.6: Instrumento Virtual para el análisis de Señales.....	10
Figura 1.7:m Paleta de Controles del Panel Frontal.....	11
Figura 1.8: Sub Paleta de Controles Numéricos.....	12
Figura 1.9: Sub Paleta de Indicadores Gráficos.....	13
Figura 1.10: Diagrama de Bloques del Instrumento Virtual para el análisis de señales.....	13
Figura 1.11: Diagrama de Bloques del paso 10.....	14
Figura 1.12: Paleta de Funciones.....	15
Figura 1.13: Ventana de Configuración Simular Señal.....	16
Figura 1.14: Diagrama de Bloques Paso 13.....	17
Figura 1.15: Funciones Expresas de Análisis de Señales.....	17
Figura 1.16: Pantalla de Configuración de la función de Medidas Espectrales.....	18
Figura 1.17: Diagrama de Bloques pasó 16.....	19
Figura 1.18: Funciones de Control de Ejecución.....	19
Figura 1.19: Diagrama de Bloques del paso 18.....	20
Figura 1.20: Izquierda Representación de una señal senoidal en el dominio del tiempo. Derecha Representación de una señal senoidal en el dominio de la frecuencia.....	21
Figura 1.21: Paso A.....	22
Figura 1.22: Paso C.....	23
Figura 2.1: Representación de la señal suma que es la adición de tres componentes de frecuencia, f_0 , $2f_0$, $3f_0$	28
Figura 2.2: Los efectos de la RBW sobre el espectro de una señal que posee tres componentes distintas de frecuencia.....	29
Figura 2.3: Señales, Espurios y Ruido.....	31

Figura 2.4: El pico centrado a 25MHz tienen un ancho de banda ocupada de 15MHz para B=99.....	32
Figura 2.5: Medición de la Potencia de Canal Adyacente.....	33
Figura 2.6: Distorsión Armónica.....	34
Figura 2.7: Panel Frontal de la practica.....	37
Figura 2.8: Pantalla de configuración señal a simular.....	39
Figura 2.9: Señal de Entrada en el dominio del tiempo del analizador de espectro.....	40
Figura 2.10: Panel Frontal del analizador de espectro simulado.....	41
Figura 2.11: Espectro de Frecuencia señal sinusoidal.....	41
Figura 2.12: Espectro de Frecuencia señal sinusoidal con mayor rango dinámico.....	42
Figura 2.13: Señal de Entrada en el dominio del tiempo del analizador de espectro.....	43
Figura 2.14: Analizador de espectro con una señal digital de entrada.....	44
Figura 2.15: Ancho de banda ocupado de la señal digital.....	45
Figura 3.1: Formas de Onda de Amplitud Modulada (AM).....	51
Figura 3.2: Espectro de frecuencias de una onda AM DSBFC.....	52
Figura 3.3: Relación entre coeficientes modulación m, Em y Ec.....	54
Figura 3.4: Sistema AM- SSBFC.....	58
Figura 3.5: Sistema AM-SSBSC.....	58
Figura 3.6: Sistema AM-SSBRC.....	59
Figura 3.7: Sistema AM-VSB.....	59
Figura. 3.8: Panel frontal del ejercicio.....	60
Figura.3.9: Diagrama de Bloques del ejercicio.....	62
Figura. 3.10: Diagrama de Bloques del paso 3.....	62
Figura. 3.11: Configuración de la función expresa simular señal.....	63
Figura. 3.12: Diagrama de Bloques paso 4.....	63
Figura. 3.13: Diagrama de Bloques paso 7.....	64
Figura. 3.14: Diagrama de Bloques paso 8.....	65
Figura. 3.15: Diagrama de Bloques paso 9.....	65
Figura. 3.16: Diagrama de Bloques paso 10.....	66
Figura. 3.17: Configuración de la Función de Medidas Espectrales.....	67
Figura. 3.18: Diagrama de Bloques paso 11.....	67
Figura. 3.19: Portadora de 200Hz.....	69
Figura. 3.20: Portadora modulada en amplitud índice de modulación 0.5.....	69

Figura. 3.21: Portadora modulada en amplitud índice de modulación 0.5.....	70
Figura. 3.22: Panel Frontal del Instrumento.....	71
Figura. 3.23: Efecto de la sobre modulación en AM.....	72
Figura 4.1: Onda con modulación angular en el dominio de la frecuencia.....	77
Figura 4.2: Cambio de fase a través del tiempo en la modulación de ángulo..	78
Figura 4.3: Cambio de frecuencia a través del tiempo en Modulación de ángulo.....	79
Figura 4.4: Modulación FM y PM.....	83
Figura 4.5: Panel Frontal del Ejercicio.....	90
Figura 4.6: Señal FM (rojo) Señal Mensaje Bandabase (negro).....	91
Figura 4.7: Señal FM y Señal Mensaje Bandabase con frecuencias similares.	92
Figura 4.8: Señal FM y Señal Mensaje Bandabase con desviación de frecuencia máxima.....	93
Figura 4.9: Señal FM y Señal Mensaje Bandabase con desviación de frecuencia mínima.....	93
Figura 4.10: Espectro de Potencia Señal FM.....	94
Figura 4.11: Espectro de Frecuencias de una señal FM.....	95
Figura 4.12: Panel Frontal paso b.....	96
Figura 4.13: Resultado del paso b.....	97
Figura 5.1: Esquema simplificado de un sistema de muestreo.....	101
Figura 5.2: Señales utilizadas en el sistema de muestreo.....	101
Figura 5.3: Representación de Amplitud versus Frecuencia de las frecuencias Aliasing, fa, producida debido al “aliasing back” de la señal original de 70MHz.....	103
Figura 5.4: Panel Frontal de la Práctica 5.....	104
Figura 5.5: Representación de una señal muestreada con una frecuencia de muestreo pequeña.....	105
Figura 5.6: Representación en la frecuencia de la señal original y la adquirida (muestreada).....	106
Figura 5.7: Representación en la frecuencia de la señal original y la adquirida (muestreada).....	107
Figura 5.8: Representación en el tiempo de la señal original y la adquirida (muestreada).....	108
Figura 5.9: Representación en el tiempo de la señal original y la adquirida (muestreada).....	108

Figura 5.10: Representación en la frecuencia de la señal original y la adquirida (muestreada).....	109
Figura 5.11: Representación en el tiempo de la señal original y la adquirida (muestreada).....	109
Figura 5.12: Representación en la frecuencia de la señal original y la adquirida (muestreada).....	110
Figura 6.1: Señal PAM con muestreo natural.....	116
Figura 6.2: Espectro de magnitud de la PAM (muestreo natural).....	117
Figura 6.3: Espectro de magnitud de la PAM (muestreo natural).....	118
Figura 6.4: Espectro de una forma de onda PAM (muestreo plano).....	119
Figura 6.5: (a) Señal Banda Base y PAM (b) TDM de dos señales.....	121
Figura 6.6: Diagrama de Bloques de un sistema TDM.....	122
Figura 6.7: Señal PAM TDM.....	122
Figura 6.8: Diagrama de Bloques de un receptor TDM.....	123
Figura 6.9: Panel Frontal del Modulador PAM.....	124
Figura 6.10: Señal de Mensaje (Original).....	125
Figura 6.11: Señal de Forma Cuadrada utilizada modulador “PAM”.....	126
Figura 6.13: Espectro de la Señal “PAM” Resultante.....	127
Figura 6.14: Señal “PAM” Filtrada.....	129
Figura 6.15: Señal Original (Roja), resultado “PAM Filtrada” (Amarilla).....	129
Figura 6.16: Panel Frontal Instrumento Virtual “TDM PAM”.....	130
Figura 6.17: Señales “TDM PAM” paso 2.....	131
Figura 6.18: Señales “TDM PAM” en el dominio de la Frecuencia.....	132
Figura 6.19: Señales PAM obtenidas antes del Filtrado.....	133
Figura 6.20: Señales PAM obtenidas después del Filtrado.....	134
Figura 7.1: Proceso de PCM.....	139
Figura 7.2: Proceso de Muestreo.....	140
Figura 7.4: Cuantificación Uniforme.....	141
Figura 7.5: Cuantificación No uniforme.....	142
Figura 7.6: Señal Cuantificada y Error de Cuantificación.....	143
Figura 7.7: Panel Frontal Modulador PCM.....	145
Figura 7.8: Señal de mensaje pasa banda (Izquierda), Señal Muestreada (Derecha).....	147
Figura 7.9: Señal Cuantificada (Negra) versus Señal Muestreada (Roja).....	147
Figura 7.10: Señal de Error.....	148
Figura 7.11: Trama de Bits.....	149

Figura 7.12: Comprobación Señales PCM.....	150
Figura 8.1: Modulación Binaria ASK (OOK).....	155
Figura 8.2: Densidad Espectral de Potencia ASK.....	156
Figura 8.3: Constelación de ASK (OOK).....	157
Figura 8.4: Filtro Coseno Alzado en el dominio del tiempo (i) y en el dominio de la frecuencia (d).....	158
Figura 8.5: Anchos de Banda que ocupan un canal Digital.....	159
Figura 8.6: Ejemplo de Jitter.....	161
Figura 8.7: El diagrama de ojo.....	162
Figura 8.8: Ejemplo de Diagrama de Ojos.....	163
Figura 8.9: Jitter y Errores de Voltaje visto desde un diagrama de ojos.....	164
Figura 8.10: Ancho y Alto de un Diagrama de Ojos.....	165
Figura 8.11: Captura de un Diagrama de Ojos real.....	166
Figura 8.12: Diagrama de ojo.....	167
Figura 8.13: Panel frontal practica ASK.....	168
Figura 8.14: Señal ASK en el dominio del tiempo.....	170
Figura 8.15: Diagrama de constelación de ASK.....	171
Figura 8.16: Densidad Espectral de Potencia de ASK.....	172
Figura 8.17: Ubicación de los cursores para obtener el ancho de banda de ASK.....	173
Figura 8.18: Diagrama de ojos del sistema ASK.....	174
Figura 8.19: Diagrama de ojos para el análisis del sistema ASK.....	174
Figura 8.20: Señal ASK en el dominio del tiempo con presencia de AWG.....	176
Figura 8.21: Densidad Espectral de Potencia del sistema ASK en presencia de ruido AWG y Filtrado de coseno alzado.....	177
Figura 8.22: Diagrama de constelación del sistema ASK en presencia de ruido AWG y Filtrado de coseno alzado.....	178
Figura 8.23: Diagrama de ojo del sistema ASK en presencia de ruido AWG y Filtrado de coseno alzado.....	178
Figura 9.1: Modulación Binaria FSK.....	184
Figura 9.2: Modulación Binaria FSK en el dominio de la Frecuencia.....	185
Figura 9.3: Resumen Modulación Binaria FSK en el dominio de la Frecuencia.....	185
Figura 9.4: Constelación de FSK.....	186
Figura 9.5: Panel Frontal del modulador FSK.....	187
Figura 9.6: Formas de onda de FSK.....	188

Figura 9.7: Densidad espectral de potencia de FSK.....	189
Figura 9.8: Densidad espectral de potencia de FSK.....	190
Figura 10.1: Modulación Binaria PSK.....	194
Figura 10.2: Modulación Binaria PSK en el domino de la Frecuencia.....	195
Figura 10.3: Resumen Modulación Binaria PSK en el domino de la Frecuencia.....	195
Figura 10.4: Constelación de PSK.....	196
Figura 10.5: Panel frontal VI PSK.....	197
Figura 10.6: Señales PSK en el domino del tiempo.....	198
Figura 10.7: Densidad espectral de potencia de PSK.....	199
Figura 10.8: Diagrama de Constelación de PSK.....	200
Figura 11.1: Espacio de Señales 8 QAM.....	205
Figura 11.2: Resumen del VI.....	207
Figura 11.3: Panel frontal practica QAM.....	207
Figura 11.4: Ventana del paso 2.....	208
Figura 11.5: Sistema QAM en el dominio del tiempo.....	209
Figura 11.6: Diagrama de constelación del sistema 4-QAM.....	210
Figura 11.7: Densidad espectral de potencia de 4-QAM.....	211
Figura 11.8: Diagrama de ojo de 4-QAM.....	212

GLOSARIO

ADC	Conversión Análogo-Digital.
AM	Amplitud modulada.
ASK	Modulación por desplazamiento de amplitud.
BW	Ancho de banda.
DSB	Doble banda lateral.
FM	Frecuencia modulada.
FSK	Modulación por desplazamiento de frecuencia.
IF	Frecuencia intermedia.
NI	National Instruments.
PSK	Modulación por desplazamiento de fase.
PXI	Extensión del bus PCI para aplicaciones de instrumentación.
QAM	Modulación de amplitud en cuadratura.
RF	Radio frecuencia.
RFSA	Analizador de señales de radio frecuencia.
SSB	Banda lateral única.
VI	Instrumento Virtual.

Vanegas Guillén Oswaldo Andrés
Trabajo de Graduación
Ing. Edgar Rodrigo Pauta Astudillo
Octubre del 2011

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL DE COMUNICACIONES ANALÓGICAS Y DIGITALES DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY

INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como objetivo principal ser una guía para el uso de los instrumentos virtuales desarrollados para el laboratorio de comunicaciones de la Universidad del Azuay. Este documento abarca la guía de las once prácticas realizadas en el software de LabVIEW de la empresa National Instruments.

Cada práctica posee un "VI" (Instrumento virtual), y un documento guía que permitirá al docente y estudiante interpretar cada una de las partes que componen dichos programas, además de una sección de ejercicios donde el estudiante tendrá que poner en práctica sus conocimientos adquiridos, para responder las preguntas o analizar las señales que se presenten en los "VI".

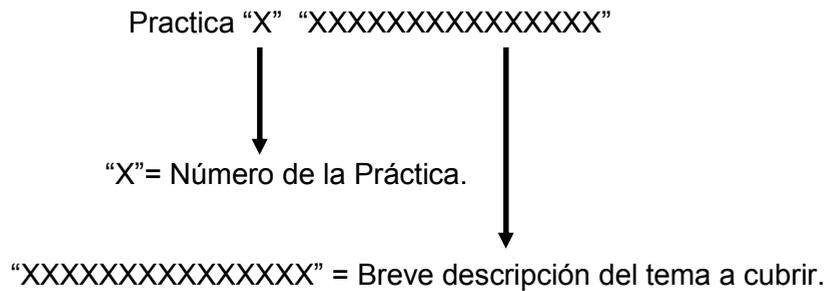
Las prácticas serán proporcionadas por el instructor a su criterio y se encuentran almacenadas digitalmente en un DVD que será entregado conjuntamente con este documento como ANEXO 1.

Existirán dos versiones del documento, el que aquí se presenta, el cual será el manual de prácticas del instructor, que contiene los ejercicios resueltos y un documento para el estudiante el cual tendrá los ejercicios en blanco para que se pueda desarrollar las actividades planteadas.

Los temas cubiertos son los siguientes:

- Introducción al entorno de programación de NI LabVIEW.
- Introducción al análisis de señales y medidas espectrales.
- Sistemas de Comunicaciones Analógicas.
- Sistemas de Comunicaciones Digitales.

EL DVD proporcionado como ANEXO 1, contiene las once prácticas, ordenadas mediante carpetas con la siguiente nomenclatura:



Cada carpeta contiene dos subcarpetas las cuales contienen:

- Documento: Documento en formato PDF, con la guía de práctica.
- Instrumento Virtual: Programa con extensión "*.vi", que representa al "VI", que será utilizado en la práctica.

Como requerimiento, las computadoras donde se realicen las prácticas, necesitaran tener instalado:

- Windows XP, Vista o 7
- Adobe Acrobat o cualquier programa lector de archivos PDF.
- LabVIEW Developer System 2010 o superior con los siguientes toolkits:
 - Math Script Toolkit 2010.
 - RF Measurements Toolkit 2010.
 - RF Modulation Toolkit 2010.

CAPÍTULO 1:

Introducción al análisis de señales y medidas espectrales con uso de LabVIEW.

PRACTICA 1

Tema: Introducción al análisis de señales mediante LabVIEW

1.1 Objetivos

- a. Introducir al lector en el entorno de programación de LabVIEW y sus funciones de análisis de señales.
- b. Repasar los conceptos básicos de análisis de señales.

1.2 Introducción

A continuación se presentara los parámetros básicos de programación en LabVIEW para la resolución de problemas. Se creara un instrumento virtual que generara una forma de onda, se utilizaran algunas funciones de análisis de señales y se creara las representaciones graficas de la forma de onda en el dominio del tiempo y frecuencia.

1.3 Análisis de Señales

Cuando se diseñan los sistemas de comunicaciones, con frecuencia se tiene que analizar y pronosticar el funcionamiento del mismo con base en la distribución de potencia y la composición de frecuencias de la señal de información. Esto se realiza mediante un proceso matemático llamado análisis de señales. Aunque todas las señales en las comunicaciones no son ondas senoidales o cosenoidales de una sola frecuencia, muchas de ellas si lo son, y las que no lo son se pueden representar con una combinación de funciones seno o coseno.

1.4 Señales senoidales

El análisis de señales implica la realización del análisis matemático de frecuencia, longitud de onda y valor de voltaje de una señal. Las señales eléctricas son variaciones de voltaje, o corriente, respecto al tiempo, que se pueden representar

por una serie de ondas seno o coseno. La descripción matemática de una onda de voltaje o de corriente con frecuencia única es:

$$v(t) = V \text{ sen}(2\pi ft + \Theta)$$

$$i(t) = I \text{ sen}(2\pi ft + \Theta)$$

Donde:

$v(t)$ = Voltaje de la onda senoidal, variable respecto al tiempo t .

$i(t)$ = Corriente de la onda senoidal, variable respecto al tiempo t .

V = Voltaje máximo (volts).

f = Frecuencia (hertz).

Θ = Desplazamiento de fase (radianes).

I = Corriente máxima (amperes).

$2\pi ft = \omega$ Velocidad angular (radianes por segundo).

Las formulas anteriores son para una onda repetitiva, de una sola frecuencia. A esta forma de onda se le llama onda periódica, porque se repite con rapidez uniforme, es decir, cada ciclo sucesivo de la señal es exactamente el mismo tiempo y tiene exactamente las mismas variaciones de amplitud que en cualquier otro ciclo, cada ciclo tiene exactamente la misma forma. Las ondas periódicas se pueden analizar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. De hecho, con frecuencia se hace necesario pasar del dominio del tiempo al de la frecuencia y viceversa cuando se analiza el funcionamiento de un sistema.

1.5 Análisis en el dominio del tiempo

Un osciloscopio normal es un instrumento de dominio del tiempo. La pantalla del tubo de rayos catódicos es una representación de la amplitud de la señal de entrada del tiempo, y se le suele llamar forma de onda de la señal. En esencia, una forma de onda de la señal muestra la forma y la magnitud instantánea de la señal con respecto al tiempo, pero no necesariamente indica el valor de la frecuencia. Con un osciloscopio, la desviación vertical es proporcional a la amplitud de la señal total de entrada, y la deflexión horizontal es una función del tiempo (frecuencia de barrido). La Figura 1.1 muestra la forma de onda de una señal senoidal de frecuencia única de f hertz con amplitud máxima de V volts.

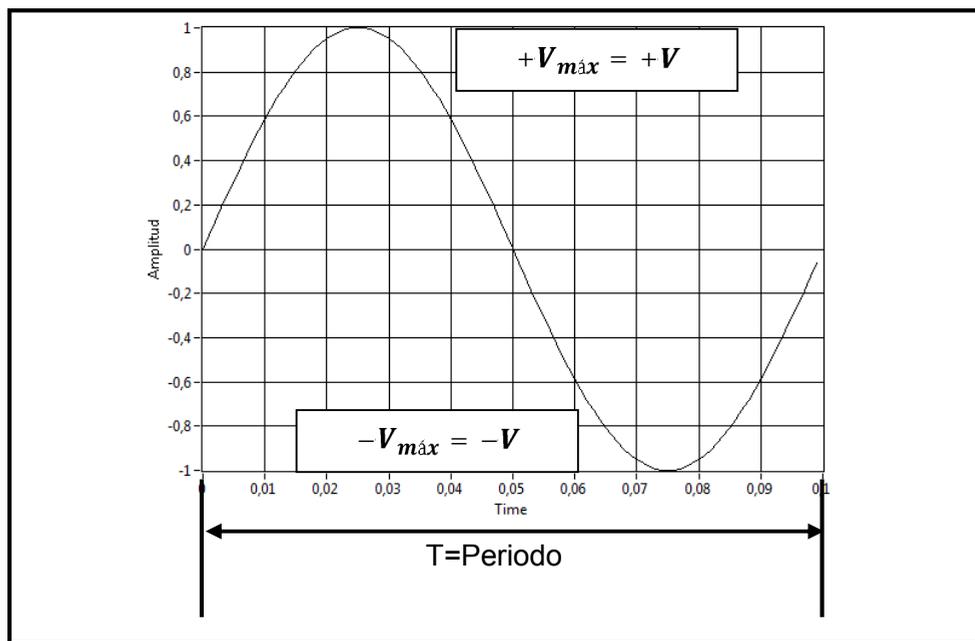


Figura 1.1. Representación en el dominio del tiempo (forma de onda de la señal) de una onda senoidal de frecuencia única.

1.6 Dominio de la Frecuencia

El analizador de espectro es un instrumento de dominio de la frecuencia. En esencia no se despliega ninguna forma de onda en la pantalla. En vez de lo anterior se muestra una gráfica de amplitud contra frecuencia (la cual se conoce como espectro de frecuencia). En un analizador de espectro, el eje horizontal representa la frecuencia y el eje vertical representa la amplitud. En consecuencia, existirá una deflexión vertical para cada frecuencia que está presente en la entrada. Cada frecuencia que está presente en la forma de onda de entrada reproduce una línea vertical en la pantalla (éstas son los componentes espectrales). La deflexión vertical (altura) de cada línea es proporcional a la amplitud de la frecuencia que representa. Una representación en el dominio de la frecuencia de la onda muestra el contenido de la frecuencia, pero no indica necesariamente la forma de la onda o la amplitud combinada de todas las componentes de entrada en un instante específico de tiempo. La Figura 1.2 muestra el espectro de frecuencia de una señal senoidal de frecuencia única cuya amplitud pico es V volts y la frecuencia es f hertz.

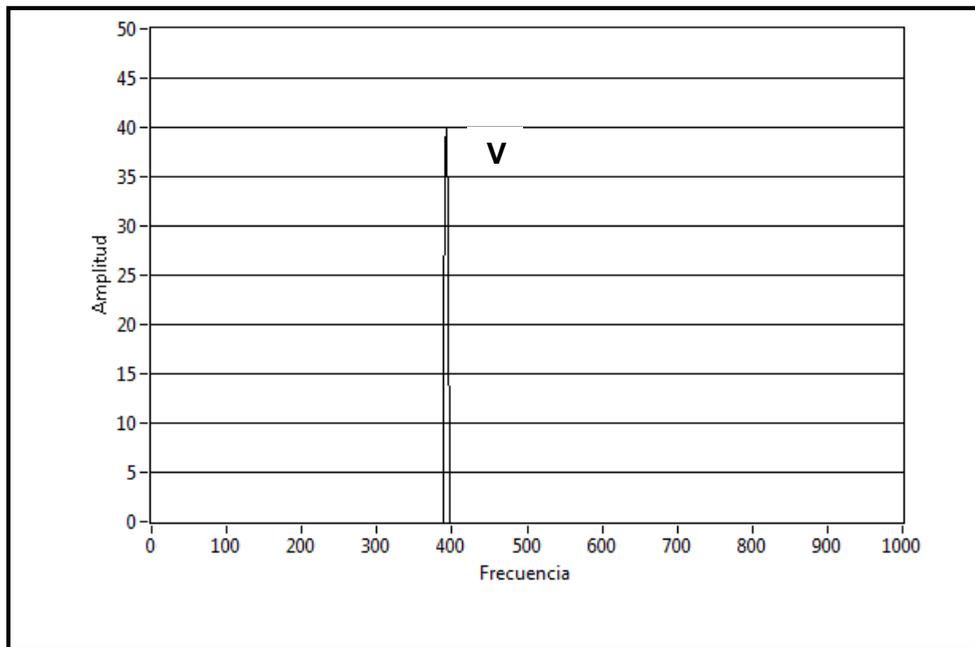


Figura 1.2. Representación en el dominio de la frecuencia (espectro) de una onda senoidal de frecuencia única.

1.7 LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica usado por ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos y cables que parecen un diagrama de flujo. Además ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual.

En el transcurso de estas prácticas de comunicaciones se utilizara esta herramienta por su naturaleza intuitiva de diseño de instrumentos virtuales, además los educadores y estudiantes pueden diseñar, generar prototipos y desplegar sus sistemas de comunicaciones de una manera fácil y rápida. Ver Figura 1.3.

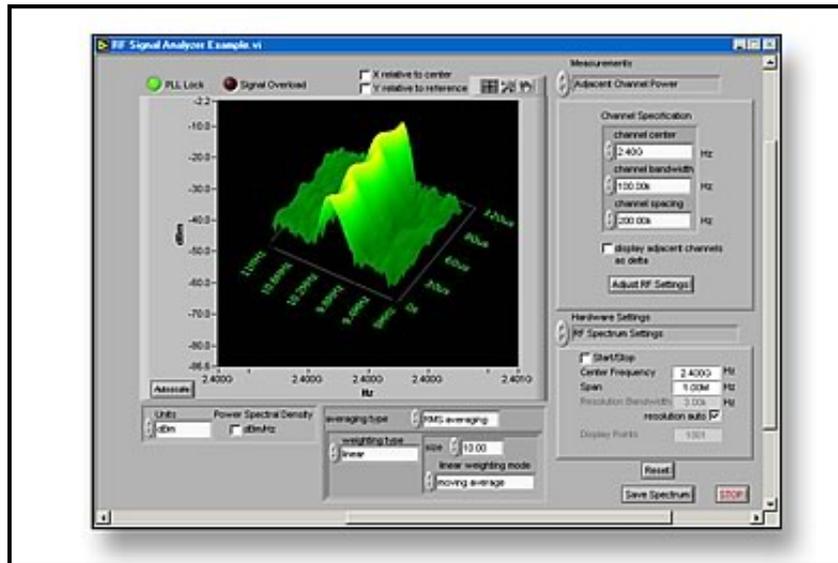


Figura 1.3. Representación de un Instrumento Virtual en LabVIEW.

1.8 Desarrollo de la práctica con uso de LabVIEW

A continuación se guiará en la construcción del instrumento virtual que nos permitirá realizar el análisis de la señal senoidal de frecuencia única.

1. Crear un nuevo instrumento virtual (*VI), los programas realizados en LabVIEW tienen esta denominación por su parecido de su panel frontal a un instrumento real. Para realizar esta tarea ubicarnos en el botón Inicio \ Todos los programas\ National Instruments\LabVIEW 2010\LabVIEW.exe.

2. Seleccionar en la ventana el icono  Blank VI (Instrumento Virtual en Blanco) parte superior izquierda de la ventana. Ver Figura 1.4.

* Virtual Instrument (Instrumento Virtual).

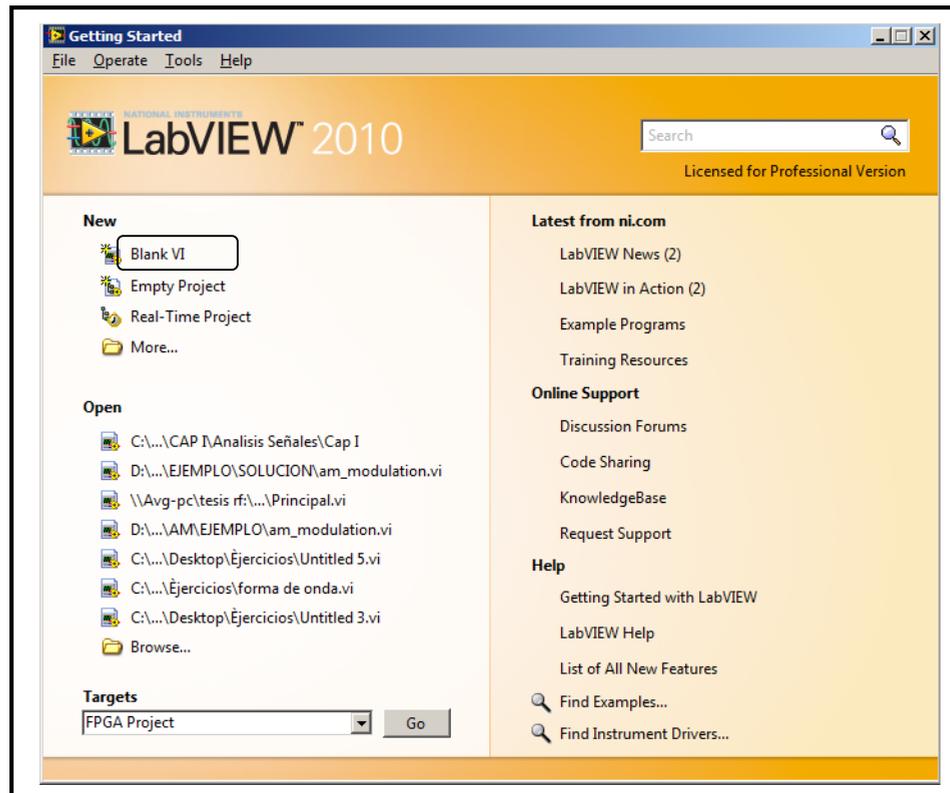


Figura 1.4. Ventana de Inicio de LabVIEW.

3. Al culminar el paso dos se desplegaran dos ventanas que corresponden a:

- a. Panel Frontal. Figura 1.5 Izquierda.
- b. Diagrama de Bloques. Figura 1.5 Derecha.

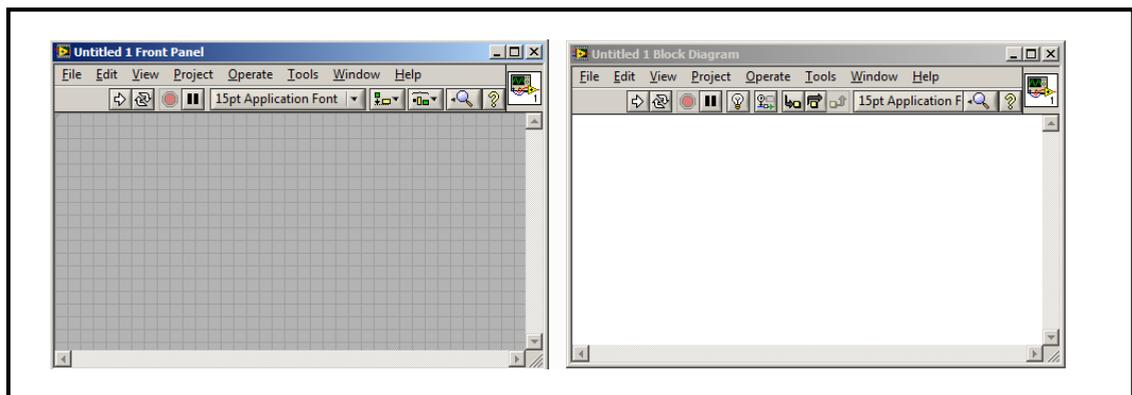


Figura 1.5. Instrumento Virtual en Blanco. Izquierda Panel Frontal. Derecha Diagrama de Bloques.

El Panel Frontal es utilizado para interactuar con el usuario cuando el programa se encuentre corriendo. Los usuarios pueden controlar el programa, cambiar entradas, y ver datos actualizados en tiempo real.

El Diagrama de Bloques es donde el usuario ingresara el código fuente o algoritmo que controlara el programa.

Como practica número uno se diseñara el algoritmo mediante diagrama de bloques en ayuda de los iconos que son herramienta de LabVIEW.

4. En la siguiente practica se hará la presentación para el análisis de señales, para lo cual diseñamos en el panel frontal los controles e indicadores de formas de onda con el propósito de obtener una señal sinusoidal en el dominio del tiempo y de la frecuencia así como los indicadores de frecuencia y amplitud para lo cual seguimos los siguientes procedimientos. Figura 1.6.

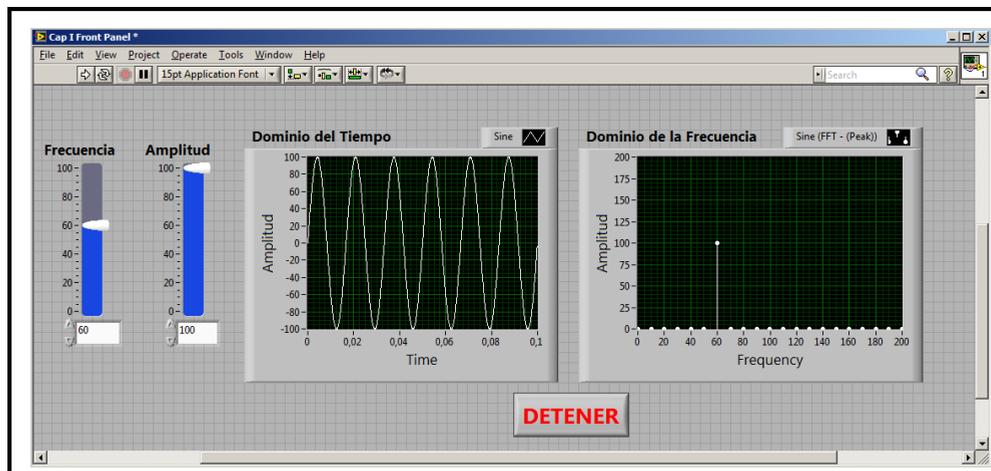


Figura 1.6. Instrumento Virtual para el análisis de Señales.

Para construir el panel frontal de la Figura 1.6 se deben agregar los controles e indicadores que se encuentran en la paleta de controles. Para desplegar esta paleta se debe pulsar el botón derecho del ratón sobre el panel frontal.

La paleta de controles contiene Controles e Indicadores como se indica en la Figura 1.7 que pueden ser ubicados sobre el panel frontal para crear la interfaz de usuario. Un **control** es un objeto del panel frontal que sirve como fuente de información, obteniendo esta información del usuario vía el panel frontal y enviándolo al código en el diagrama de bloques.

Un **indicador** es un objeto del panel frontal que sirve como receptor de información, obteniendo los resultados o datos desde el código en el diagrama de bloques y desplegado esta información en el panel frontal.

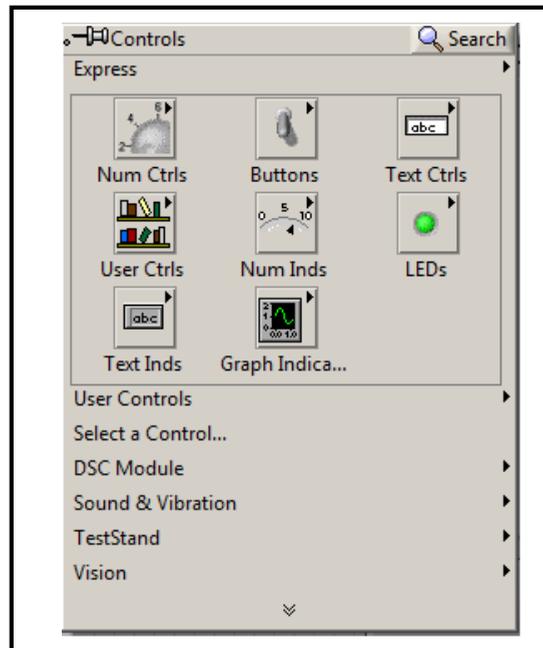


Figura 1.7. Paleta de Controles del Panel Frontal.

5. Desde la paleta de controles, seleccionamos la sub paleta de controles numéricos, Figura 1.8 con el ratón seleccionamos un control “Pointer Slide” y lo arrastramos hacia el panel frontal. Sobre la misma podemos cambiar la etiqueta con el nombre apropiado, para el presente caso lo llamaremos Amplitud. Este control numérico nos permitirá variar la amplitud de la onda senoidal.

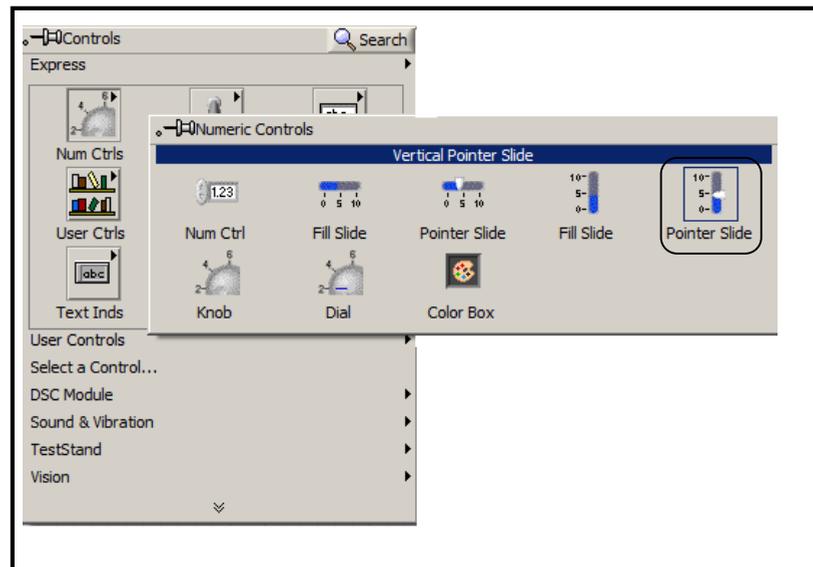


Figura 1.8.Sub Paleta de Controles Numéricos.

6. Procedemos luego a crear un nuevo control numérico, con la etiqueta de Frecuencia que nos permitirá modificar la frecuencia de la onda senoidal, para lo cual seguimos exactamente el paso 5.

7. A continuación desde la barra de controles seleccionamos la paleta de indicadores Gráficos Figura 1.9. A continuación seleccionamos con el ratón el indicador grafico con la etiqueta waveform graph (grafico de forma de onda) y lo ubicamos sobre el panel frontal. Modificamos la etiqueta de este indicador con el nombre de Grafica en el dominio del tiempo.

El Waveform Graph es un indicador que acepta un arreglo de valores de datos y dibuja todo el arreglo. Esto se diferencia al Waveform Chart, que va graficando continuamente, agregando los nuevos puntos en el grafico.

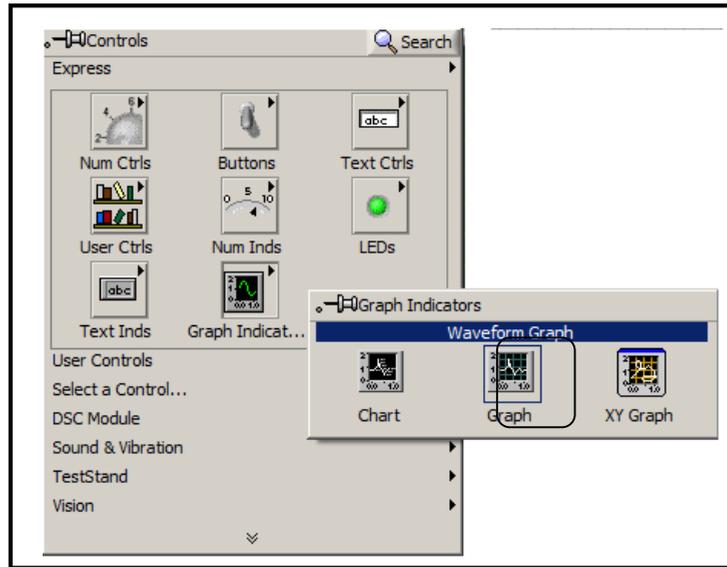


Figura 1.9.Sub Paleta de Indicadores Gráficos.

8. Repetimos el paso 7, con el propósito de de construir un gráfico que representara la señal en el dominio de la frecuencia, de igual manera modificamos la etiqueta con el nombre Dominio de la Frecuencia.

9. El siguiente paso es la generación del código fuente del instrumento virtual, para lo cual pasamos a trabajar en diagrama de bloques como se muestra en la captura de pantalla la Figura 1.10

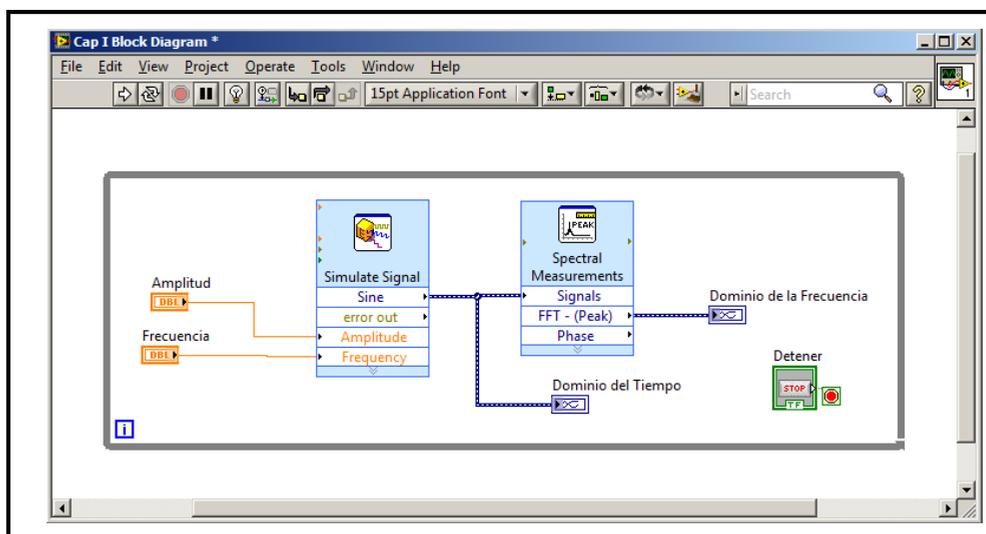


Figura 1.10.Diagrama de Bloques del Instrumento Virtual para el análisis de señales.

10. Para iniciar la construcción del código fuente nos ubicamos en el diagrama de bloques del instrumento virtual, en este punto se observarán cuatro nodos, que representan a los correspondientes cuatro objetos que se encuentran creados en el panel frontal. Figura 1.11.

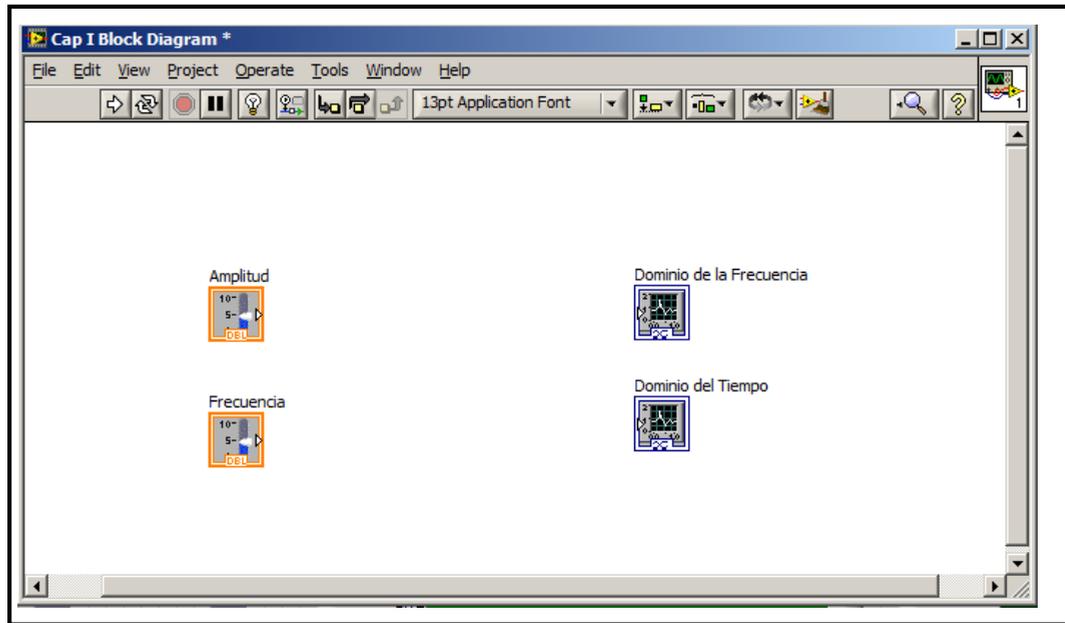


Figura 1.11. Diagrama de Bloques del paso 10.

11. Para generar la forma de onda senoidal pulsamos el botón derecho del ratón sobre el diagrama de bloques, en lo cual se desplegará la paleta de funciones, seleccionamos en la sub paleta de funciones "Express\Entradas" y seleccionamos la función Simular Señal Figura 1.12 y la arrastramos sobre el diagrama de bloques.

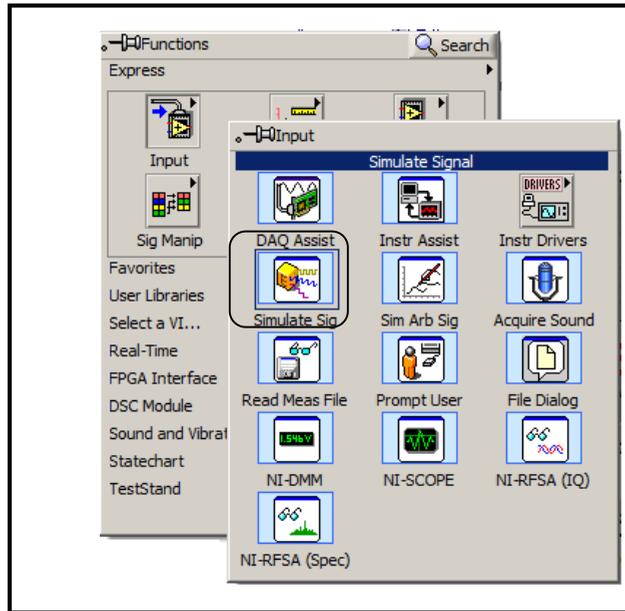


Figura 1.12. Paleta de Funciones.

Al ubicar la función de “Simular señal” se desplegará una ventana de configuración rápida, la cual nos permitirá configurar los parámetros que se pueden observar en la Figura 1.13.

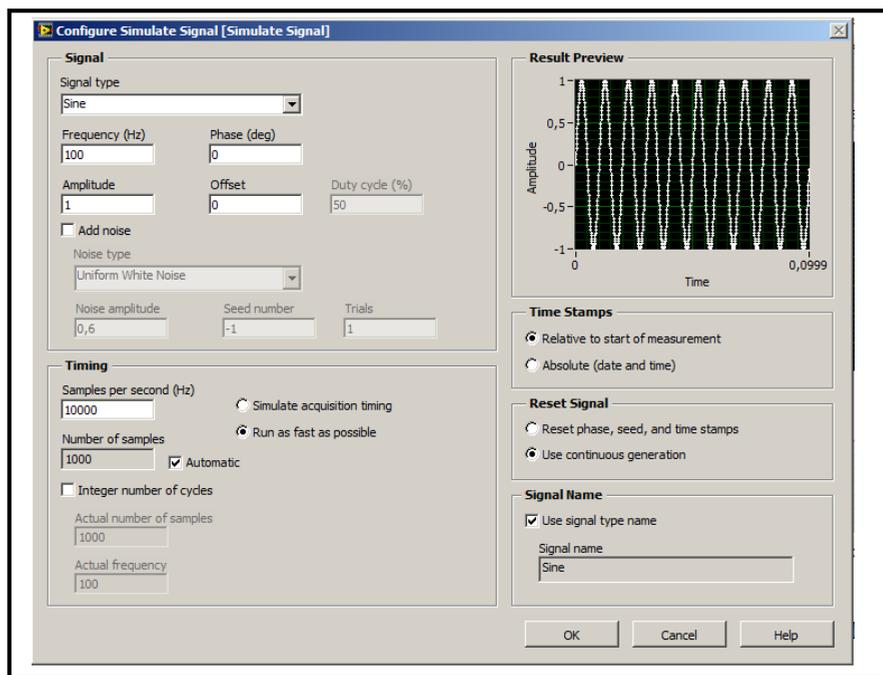


Figura 1.13. Ventana de Configuración Simular Señal.

Los parámetros más importantes que se necesitan para esta práctica son las siguientes:

- **Tipo de Señal (Signal Type).** Pestaña de configuración del tipo de señal a simular entre la que tenemos:
 - Senoidal.
 - Triangular.
 - Rectangular.
 - Diente de Sierra.

- **Frecuencia (Frequency).** La frecuencia de la señal a simular en hertz. Este valor puede ser constante o variable a través de un control en el panel frontal.

- **Fase (Phase).** La fase de la señal a simular en grados. . Este valor puede ser constante o variable a través de un control en el panel frontal.

- **Amplitud (Amplitude).** La amplitud de la señal a simular. Este valor puede ser constante o variable a través de un control en el panel frontal.

- **Desplazamiento (Offset).** El desplazamiento DC de la señal a simular. Este valor puede ser constante o variable a través de un control en el panel frontal.

- **Agregar Ruido (Add Noise).** Pestaña que permite agregar ruido a la señal.

- **Amplitud Ruido (Noise Amplitude).** La amplitud del ruido que se agregara a la señal a simular.

- **Muestras por Segundo (Samples per Second).** Es la frecuencia de muestreo en muestras por segundo de la onda simulada en hertz.

- **Numero de Muestras (Number of Samples).** Numero de muestras en la señal simulada.

Se configurara la función “simular señal” (Simulate Signal) ajustando los valores como se indican y se aceptaran los cambios, como se indica en la Figura 1.13.

13. A continuación se procederá al cableado de las entradas y salidas de la función Expresa que posee la etiqueta Sine (Seno) al indicador gráfico de “forma de onda” con la etiqueta en el “dominio del tiempo”, así mismo procederemos a cablear las

entradas hacia los controles de Amplitud y Frecuencia, como se puede observar en Figura 1.14.

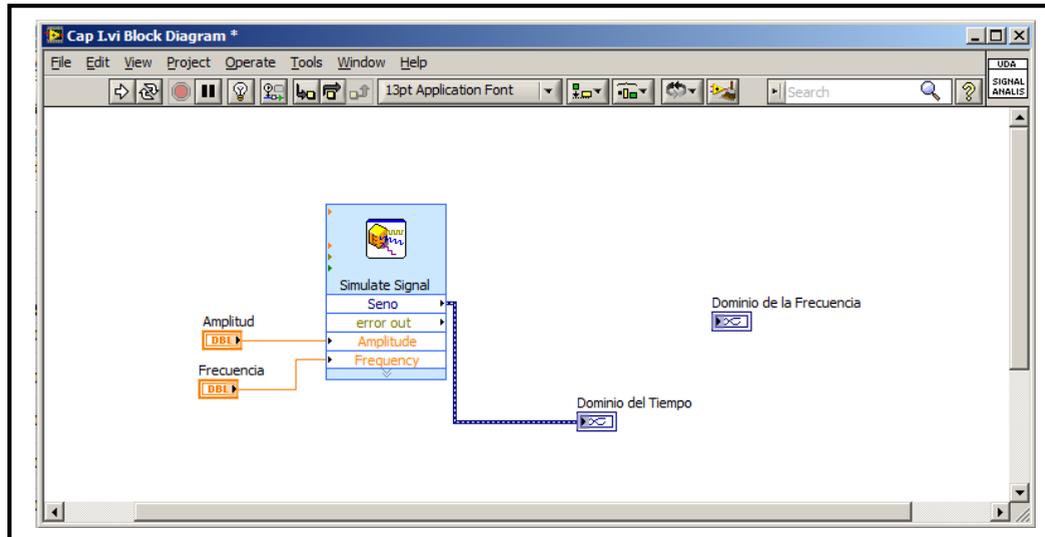


Figura 1.14. Diagrama de Bloques Paso 13.

14. Para poder observar la forma de onda simulada en el dominio de la frecuencia, debemos realizar la conversión de la señal que posee la presentación en el dominio del tiempo. Para efectuar esta conversión realizaremos la transformada “rápida de Fourier”. Para lo cual nos dirigiremos al menú de funciones del diagrama de bloques pulsando el botón derecho del ratón, y pulsamos sobre la categoría que tiene como etiqueta Análisis de Señales y seleccionamos la función con el nombre de “Mediciones Espectrales”. Figura 1.15.

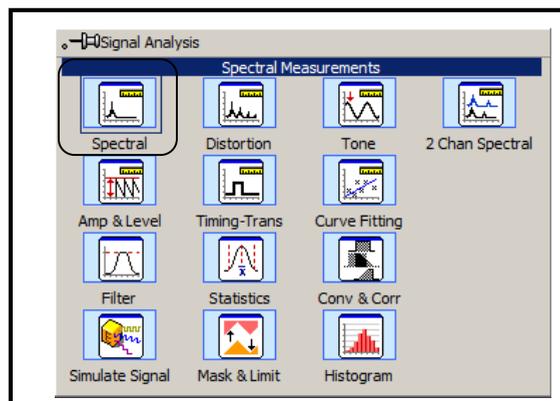


Figura 1.15. Funciones Expresas de Análisis de Señales.

15. Al ubicar la función de Medidas Espectrales se desplegara una ventana de configuración rápida la cual nos permitirá seleccionar los parámetros de medición; pudiendo observar la señal con diferentes representaciones en la frecuencia.

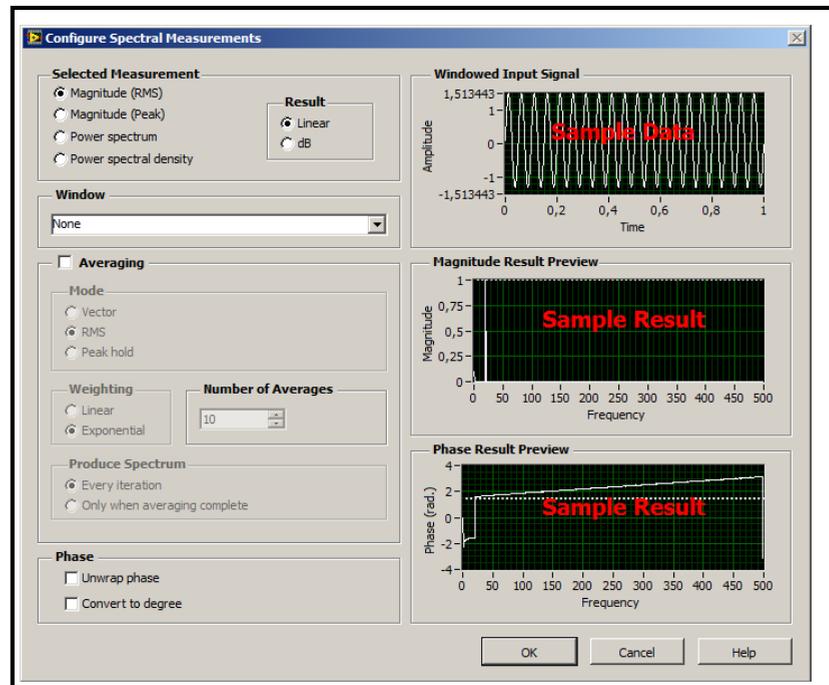


Figura 1.16. Pantalla de Configuración de la función de Medidas Espectrales.

Los parámetros configurados en la presente práctica en la función “medidas espectrales” son las siguientes:

- Medición Seleccionada: Magnitud RMS(Valor cuadrático medió).
- Resultado: Lineal.
- Ventana: Ninguno.

16. A continuación se procederá al cableado de la salida de la función “Expresa Medidas Espectrales” con la entrada del indicador de forma de onda grafico que posee la etiqueta de Dominio de la frecuencia. Figura 1.17.

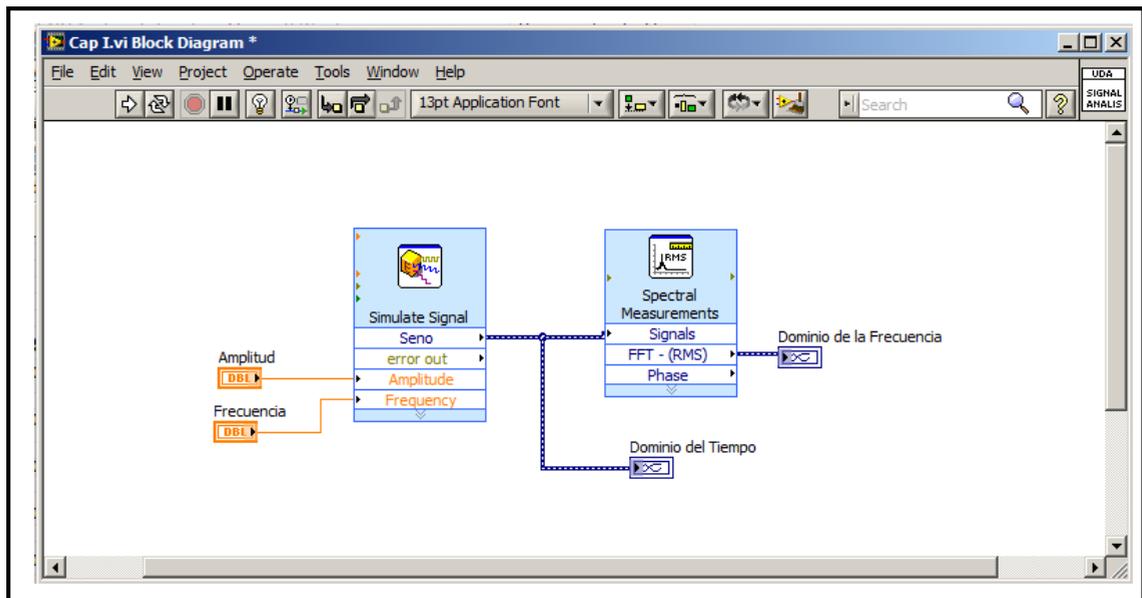


Figura 1.17. Diagrama de Bloques pasó 16.

17. Para finalizar se ubicara al código fuente del instrumento virtual dentro de un bucle iterativo “while loop”. Seleccionaremos la función “while loop” que se encuentra en la categoría de funciones Expresas en la sub-categoría de funciones de Ejecución. Figura 1.18

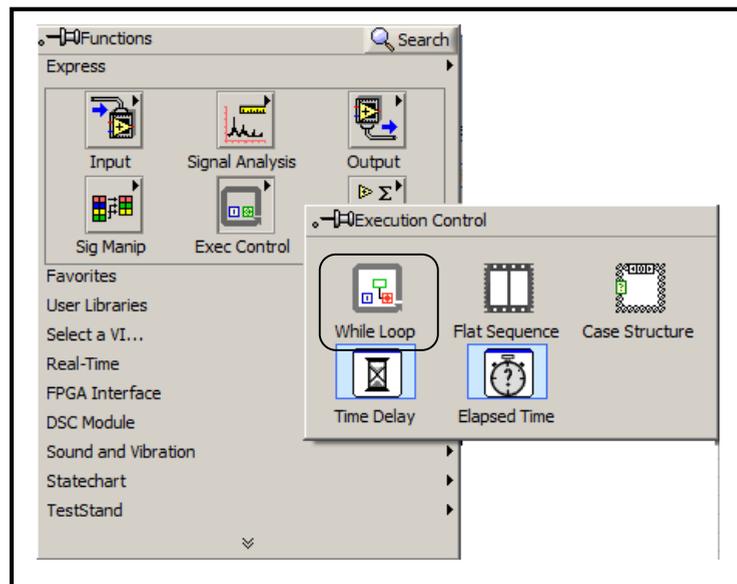


Figura 1.18. Funciones de Control de Ejecución.

18. Luego de seleccionar el “while loop” procedemos a encerrar el código fuente que se encontrara a dentro de este bucle iterativo. Se esta manera concluimos el instrumento virtual de la practica numero uno.

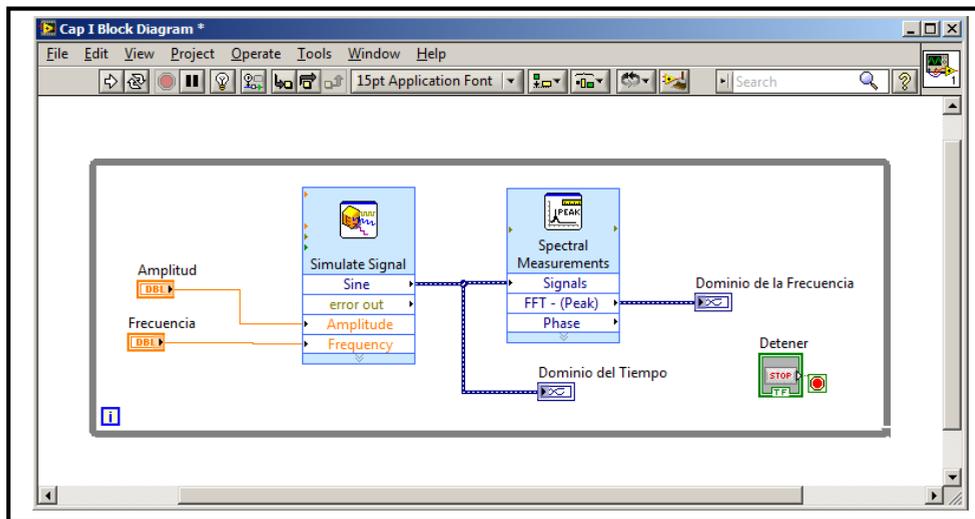


Figura 1.19. Diagrama de Bloques del paso 18.

19. Para finalizar la construcción del “VI” procedemos a guardar el mismo ubicándonos en el menú o pulsando las teclas “Ctrl+s”, con el nombre de “Análisis de señales”.

1.9 Ejercicio de Aplicación

Para comprobar el funcionamiento del instrumento virtual, procederemos a modificar los parámetros de Amplitud y Frecuencia de la Señal y de esta manera poder observar la representación de la misma en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

1. Abrir el instrumento virtual de la práctica que tiene el nombre de “Análisis de Señales” y pulsamos el botón de ejecutar de la barra de herramientas.
2. Modificar en el valor del control de frecuencia con un número entero de 60 Hz, para lo cual este puede ser cambiado haciendo click en el valor numérico.
3. Modificar en el valor del control de amplitud con un número entero de 100V.
4. Observar que el indicador de forma de onda con la etiqueta en el dominio del tiempo, muestra una onda senoidal de periodo 0.016 segundos y con un valor de amplitud pico de 100V. Figura 1.20 Izquierda.

5. Observar que el indicador de forma de onda con la etiqueta en el dominio de la frecuencia muestra una componente de frecuencia con el valor de 60Hz y una magnitud de 100V. Figura 1.20 Derecha.

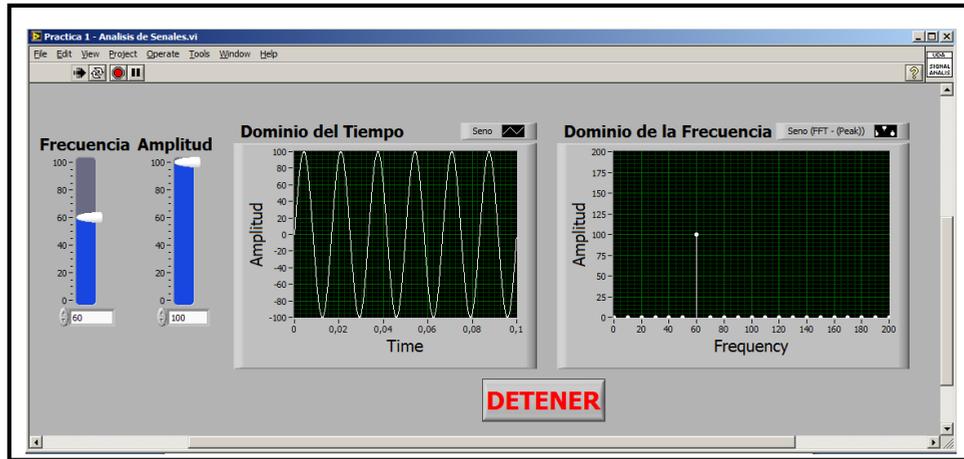
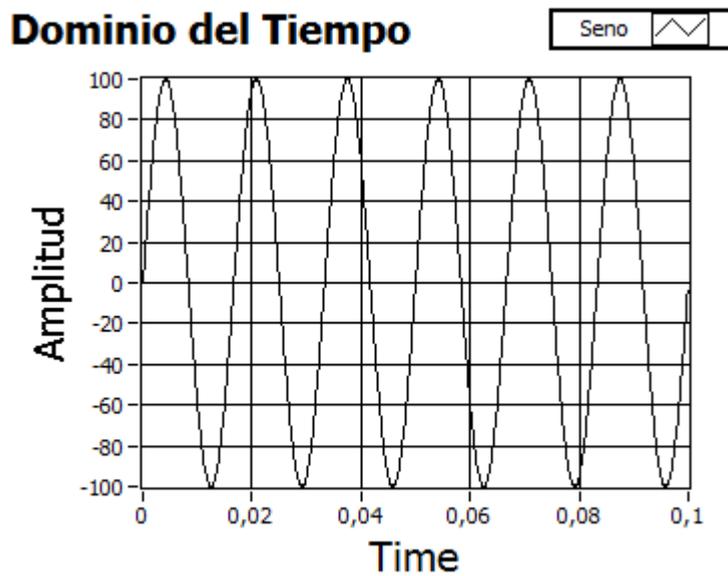
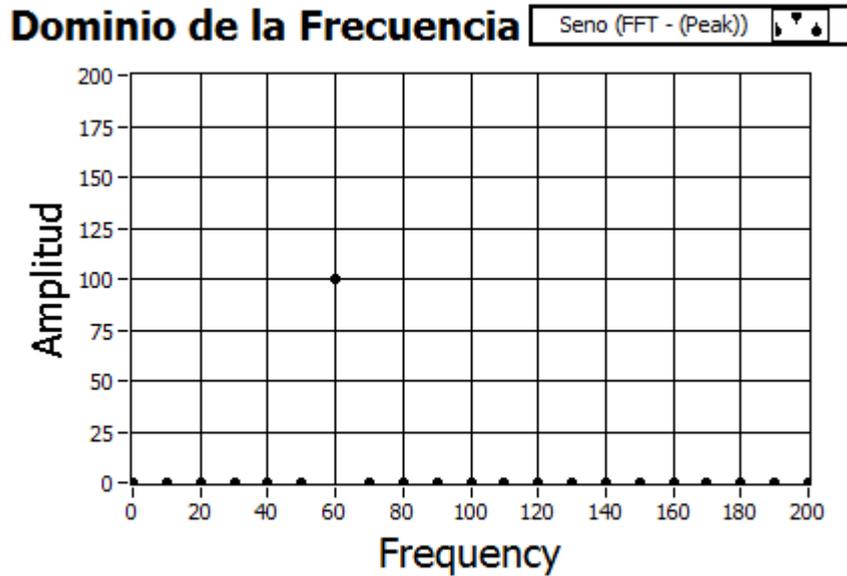


Figura 1.20. Izquierda Representación de una señal senoidal en el dominio del tiempo.
Derecha Representación de una señal senoidal en el dominio de la frecuencia.

7. Dibujar las señal obtenida en el dominio del Tiempo.



8. Dibujar la señal obtenida en el dominio de la frecuencia.



10. Realizar las modificaciones necesarias al “VI”, para realizar el análisis de una señal de tipo “Cuadrada”.

Paso A. Ubicarnos en el diagrama de bloques y dar doble click sobre la función “Simular Señal”, a continuación se desplegara una ventana rápida ver Figura 1.21.

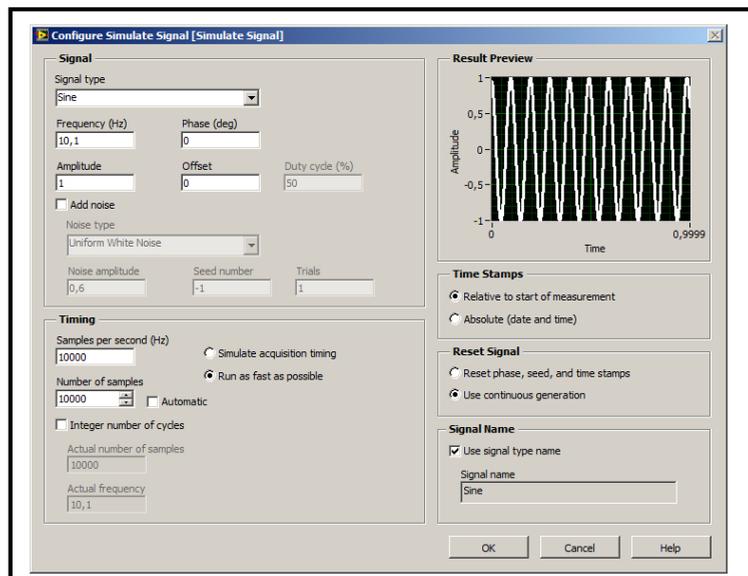


Figura 1.21. Paso A.

Paso B. Cambiamos el tipo de señal en la pestaña con la etiqueta “Sinal Type” y procedemos a seleccionar el tipo de señal que deseemos, en este caso una de tipo cuadrada y pulsamos el botón de aceptar cambios.

Paso C. Ejecutamos el programa y modificamos los parámetros de amplitud y frecuencia a nuestra conveniencia, para comprobar el correcto funcionamiento del programa. Figura 1.22.

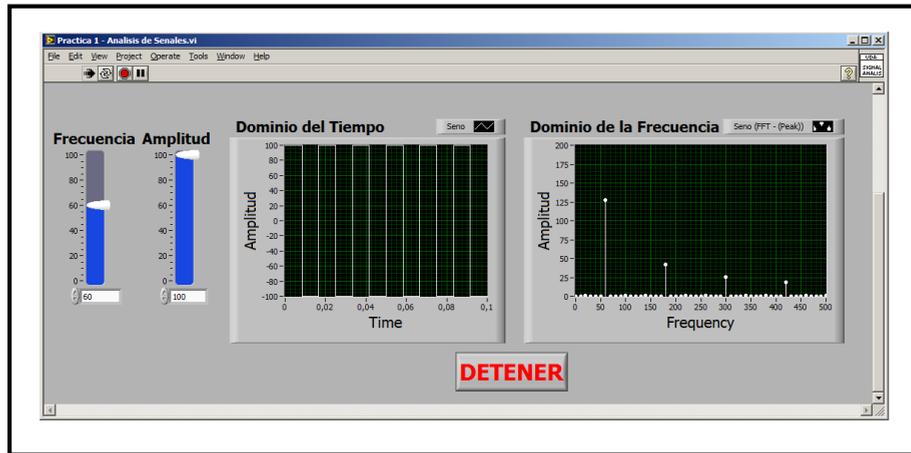
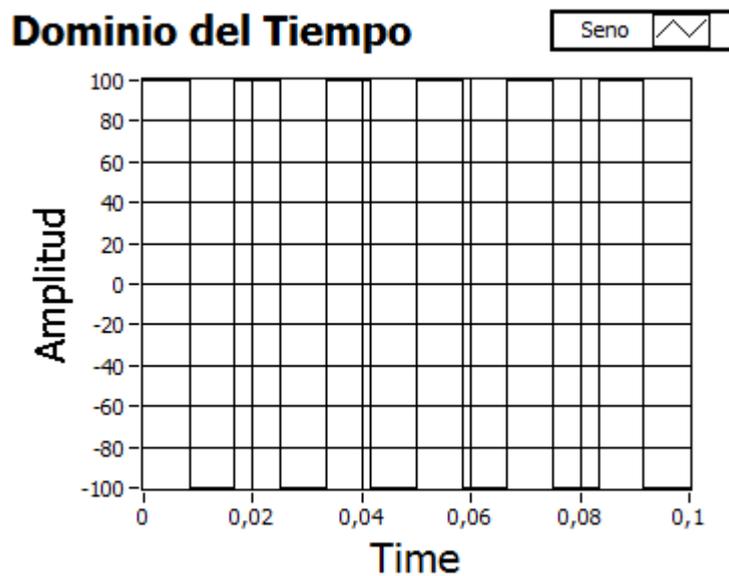
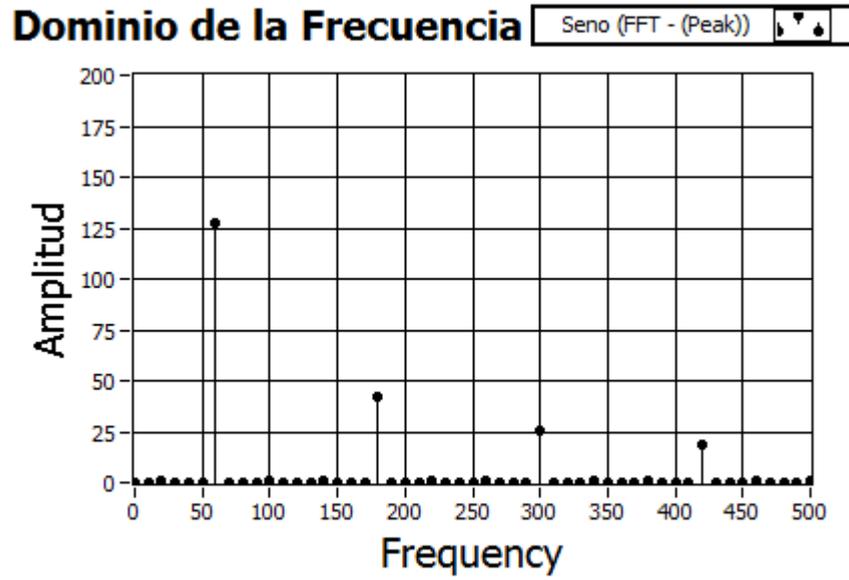


Figura 1.22. Paso C.

11. Dibujar las señal cuadrada obtenida en el domino del Tiempo.



12. Dibujar las señal cuadrada obtenida en el domino de la Frecuencia.



1.10 Conclusiones

En esta práctica se pudo observar las ventajas del desarrollo del análisis de señales mediante la instrumentación virtual con la herramienta de programación LabVIEW. Se introdujo a este lenguaje gráfico y se pudo observar lo fácil e intuitivo de realizar programación en el mismo.

PRACTICA 2

Tema: Introducción a las Medidas Espectrales

2.1 Objetivos

- a. Introducir a algunas de las medidas espectrales más comunes.
- b. Aprender a algunos términos utilizados en medidas espectrales y equipos de medición espectral.
- c. Aprender algunas unidades utilizadas en radio comunicaciones.

2.2 Introducción a la Radio Frecuencia

Radio Frecuencia (RF de sus siglas en Ingles), este término se ha convertido en sinónimo de señales inalámbricas (wireless en ingles) y señales de alta frecuencia, como las de radio AM 535 Khz hasta 1605 KHz, las señales de computadoras de área local (LAN de sus siglas en ingles) de hasta 2.4GHz. Sin embargo RF se ha definido tradicionalmente frecuencias desde unos pocos KHz y rondar los 1 GHz. Si se tiene en cuenta las frecuencias de microonda como RF, este rango se extiende hasta los 300GHz. Los cuadros a continuación resumen las nomenclaturas de diferentes bandas de frecuencias y algunas aplicaciones de cada una de estas bandas de frecuencia.

f	λ	Band	Description
30–300 Hz	10^4 – 10^3 km	ELF	Extremely low frequency
300–3000 Hz	10^3 – 10^2 km	VF	Voice frequency
3–30 kHz	100–10 km	VLF	Very low frequency
30–300 kHz	10–1 km	LF	Low frequency
0.3–3 MHz	1–0.1 km	MF	Medium frequency
3–30 MHz	100–10 m	HF	High frequency
30–300 MHz	10–1 m	VHF	Very high frequency
300–3000 MHz	100–10 cm	UHF	Ultra-high frequency
3–30 GHz	10–1 cm	SHF	Superhigh frequency
30–300 GHz	10–1 mm	EHF	Extremely high frequency (millimeter waves)

Tabla 2.1 Designaciones de Bandas de Radio Frecuencia (RF).
(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 8)

La Tabla 2.1 muestra la relación entre la frecuencia (f) y la longitud de onda (λ). Una onda sinusoidal puede ser completamente descrita por su frecuencia o su longitud de onda, estos son inversamente proporcionales entre si y relacionados con la velocidad de la luz a través de un medio particular. La relación en el vacío se muestra a continuación:

$$C = f * \lambda$$

Donde C es la velocidad de la luz. Cuando la frecuencia se incrementa la longitud de onda decrece. Para referencia un onda de 1GHz posee una longitud de onda de alrededor de un pie, y una de onda 100MHz posee una longitud de onda de alrededor 10 pies.

f (GHz)	Letter Band Designation
1–2	L band
2–4	S band
4–8	C band
8–12.4	X band
12.4–18	Ku band
18–26.5	K band
26.5–40	Ka band

Tabla 2.2 Designación de Bandas de Microonda.
(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 8)

Frequencies in kHz	Allocated Purposes
490–510	Distress (telegraph)
510–535	Government
535–1605	AM radio
1605–1750	Land/mobile public safety
1800–2000	Amateur radio
Frequencies in MHz	Allocated Purposes
26.96–27.23, 462.525–467.475	Citizen band radios
30.56–32, 33–34, 35–38, 39–40, 40.02–40.98, 41.015–46.6, 47–49.6, 72–73, 74.6–74.8, 75.2–76, 150.05–156.2475, 157.1875–161.575, 162.0125–173.4	Private mobil radio (taxis, trucks, buses, railroads)
220–222, 421–430, 451–454, 456–459, 460–512 746–824, 851–869, 896–901, 935–940	
74.8–75.2, 108–137, 328.6–335.4, 960–1215, 1427–1525, 220–2290, 2310–2320, 2345–2390 162.0125–173.2	Aviation (communication and radar) Vehicle recovery (LoJack)
50–54, 144–148, 216–220, 222–225, 420–450, 902–928, 1240–1300, 2300–2305, 2390–2450	Amateur radio
72–73, 75.2–76, 218–219	Radio control (personal)
54–72, 76–88, 174–216, 470–608	Television broadcasting VHF and UHF
88–99, 100–108	FM radio broadcasting
824–849	Cellular telephones
1850–1990	Personal communications
1910–1930, 2390–2400	Personal comm. (unlicensed)
1215–1240, 1350–1400, 1559–1610	Global Positioning Systems (GPS)
Frequencies in GHz	Allocated Purposes
0.216–0.220, 0.235–0.267, 0.4061–0.45, 0.902– 0.928, 0.960–1.215, 1.215–2.229, 2.320– 2.345, 2.360–2.390, 2.7–3.1, 3.1–3.7, 5.0– 5.47, 5.6–5.925, 8.5–10, 10.0–10.45, 10.5– 10.55, 13.25–13.75, 14–14.2, 15.4–16.6, 17.2– 17.7, 24.05–24.45, 33.4–36, 45–46.9, 59–64, 66–71, 76–77, 92–100	Radar, all types
2.390–2.400	LANs (unlicensed)
2.40–2.4835	Microwave ovens
45.5–46.9, 76–77, 95–100, 134–142	Vehicle, anticollision, navigation
10.5–10.55, 24.05–24.25	Police speed radar
0.902–0.928, 2.4–2.5, 5.85–5.925	Radio frequency identification (RFID)
3.7–4.2, 11.7–12.2, 14.2–14.5, 17.7–18.8, 27.5– 29.1, 29.25–30, 40.5–41.5, 49.2–50.2	Geostationary satellites with fixed earth receivers

Tabla 2.3 Aplicaciones y Asignaciones de Frecuencia en Estados Unidos de Norteamérica.

(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 8)

La operación en frecuencias altas es debido como se puede observar en la tabla 3 el espectro de radiofrecuencia es fragmentado y denso, esta es una de las razones que hace que se ubiquen algunas aplicaciones en frecuencias cada vez más altas. Sin embargo otras razones es que las frecuencias altas es la eficiencia en la propagación, inmunidad para algunos tipos de ruidos e impedimentos por ejemplo el tamaño de la antena a usarse. El tamaño de la antena es relacionado con la longitud de onda de la señal y en la práctica se usa $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda.

2.3 RF Términos y Medidas

2.3.1 Análisis Espectral

El análisis espectral envuelve el análisis del contenido de la señal en el dominio de la frecuencia, para realizar esto debemos considerar que una señal es compuesta de una suma de componentes sinusoidales. Las bases para este análisis es el teorema de Fourier que establece que cualquier forma de onda en el dominio del tiempo puede ser representada por la suma de sus senos y cosenos. La forma de onda resultante en la Figura 2.1 es compuesta por ondas individuales de seno y coseno que varían en la frecuencia. La forma de onda resultante aparece en el dominio de la frecuencia con valores de amplitud y fase de cada componente de frecuencia (f_0 , $2f_0$, $3f_0$).

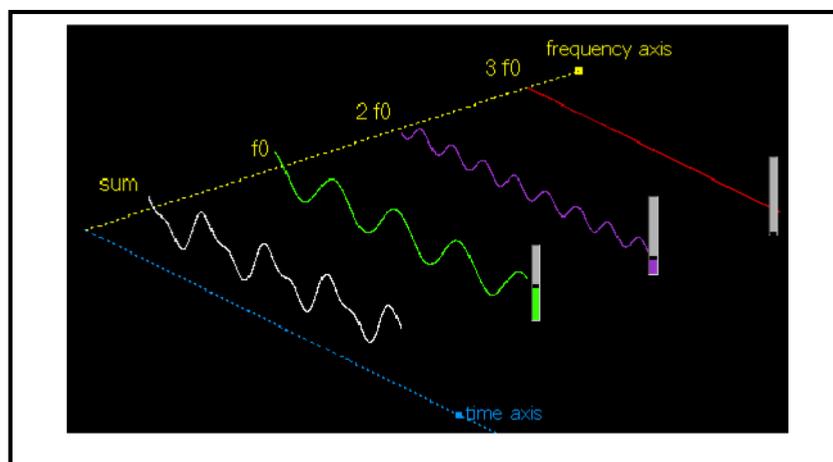


Figura 2.1 Representación de la señal suma que es la adición de tres componentes de frecuencia, f_0 , $2f_0$, $3f_0$.

(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 8)

2.3.2 Rango Dinámico y Resolución de Ancho de Banda.

Dos parámetros son fundamentales para el análisis espectral, son la resolución de ancho de banda y rango dinámico. Resolución de ancho de banda ayuda a determinar la exactitud de la medición e frecuencia. El rango dinámico ayuda a determinar la exactitud de la medición e amplitud de una medida espectral.

2.3.2.1 Resolución de Ancho de Banda (RBW).

La resolución de ancho de banda (RBW de sus siglas en ingles), es la frecuencia más pequeña que puede ser resuelta en un espectro de potencia.

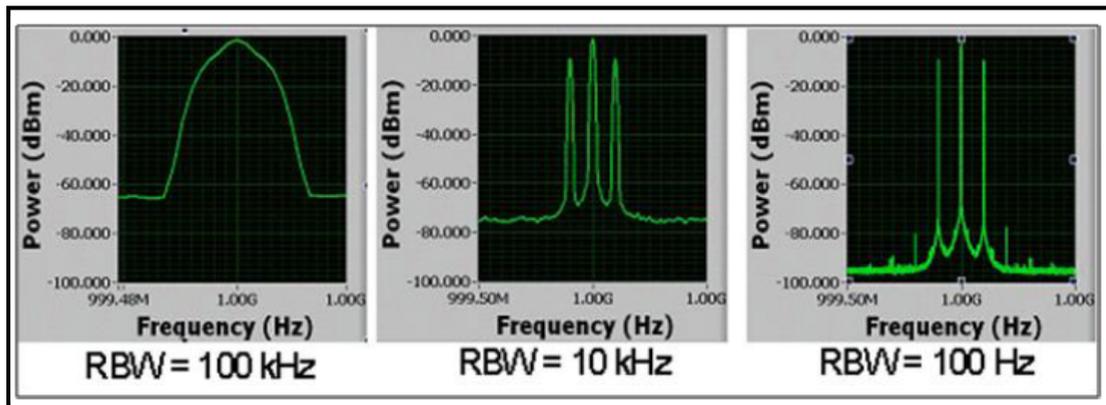


Figura 2.2 Los efectos de la RBW sobre el espectro de una señal que posee tres componentes distintas de frecuencia.

(NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 9)

La Figura 2.2 muestra el efecto de una RBW pequeña sobre un espectro para una señal que contiene tres distintas componentes de frecuencia. Nótese que un valor pequeño de RBW da como resultado una resolución espectral más fina, permitiendo distinguir los diferentes tonos. La RBW pequeña de la Figura 2 que se observa en la parte derecha posee mucha más resolución y permite visualizar las bandas de nivel púelas y espurios.

También se puede notar que cuando la RBW decrece, también lo hace el piso de ruido. Cada factor de 10 incrementos (disminuciones) en RBW mejora (reduce) el piso de ruido por 10dB.

2.3.2.2 Piso de Ruido

El piso de ruido es el nivel de ruido más bajo cual las señales no pueden ser detectadas bajo las mismas condiciones de medida. Por ejemplo, en un sistema de audio, el nivel de ruido de banda ancha debe ser 5 μ V, esto significa que los niveles de banda ancha no pueden ser detectados debajo de este nivel. Sin embargo, si el ruido aleatorio de banda ancha, en lugar de consistir de componentes sinusoidales, tu puedes usa un filtro de banda estrecha para “cavar más abajo” dentro del ruido.

Piso de ruido es normalmente especificado con las siguientes denominaciones:

- Ruido de Banda Ancha (referenciado a deflexión de máxima escala).
- Rango dinámico libre de espurios: La componente sinusoidal más larga referida a máxima escala.

El ruido piso observado sobre un analizador de espectros puede depender del piso de ruido de la señal de entrada, el diseño del analizador de espectro y las características de RBW y atenuación.

2.3.2.3 Rango Dinámico

Rango dinámico es la relación del nivel más alto de una señal y un circuito que puede manejar el ruido de piso, normalmente expresado en dB. Rango dinámico establece las bases para más términos específicos incluyendo la relación Señal Ruido (SNR) y rango dinámico libre de espurios (SFDR). SNR es la diferencia mencionada (en dB) de la amplitud a máxima escala y el piso de ruido. SFDR es el rango dinámico sobre cual la el espectro de frecuencia es libre de componentes sinusoidales no deseadas, llamadas espurios.

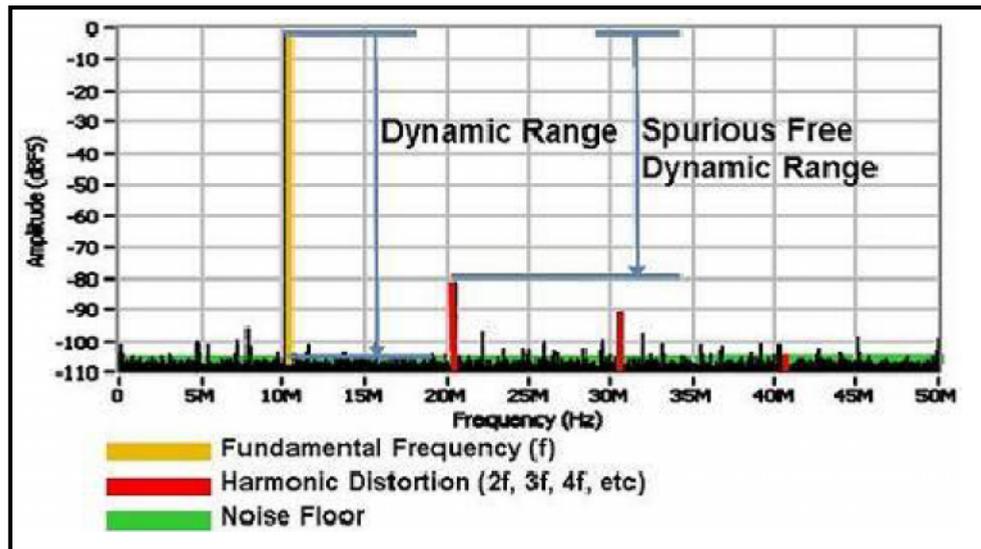


Figura 2.3 Señales, Espurios y Ruido.

(NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 10)

2.3.3 Medidas Espectrales

Varias medidas comunes espectrales en RF y sistemas de comunicaciones incluyen:

- Potencia en Banda.
- Ancho de Banda Ocupada.
- Búsqueda de Picos.
- Potencia de Canal Adyacente.

A continuación describiremos alguna teoría y aplicaciones relacionada con cada una de estas mediciones.

2.3.3.1 Potencia en Banda

Potencia en banda mide la potencia total integrada con cualquier especificación de rango de frecuencia o banda.

$$\text{Potencia en Banda} = \sum_{f_l}^{f_h} X(f).$$

Donde $X(f)$ es la espectro de potencia de entrada de una banda específica. Los límites altos y bajos de esta banda son f_h y f_l y pueden ser determinados por la frecuencia central.

2.3.3.2 Ancho de Banda Ocupada

Es la medida del ancho de banda de la dispersión de frecuencia que contiene un porcentaje específico de la potencia total de una señal.

Para un porcentaje determinado B , los límites superior e inferior de la banda de frecuencias son las frecuencias por encima y por debajo del cual $(100-B)/2$ (%) de la potencia total se encuentra. Por ejemplo, si B es 99, entonces el ancho de banda ocupado podría ser el ancho de banda que contiene el 99% de la potencia total de la señal. La Figura 2.4 muestra un ancho de banda ocupado que podría ser calculado para ser 15MHz con $B = 99$.

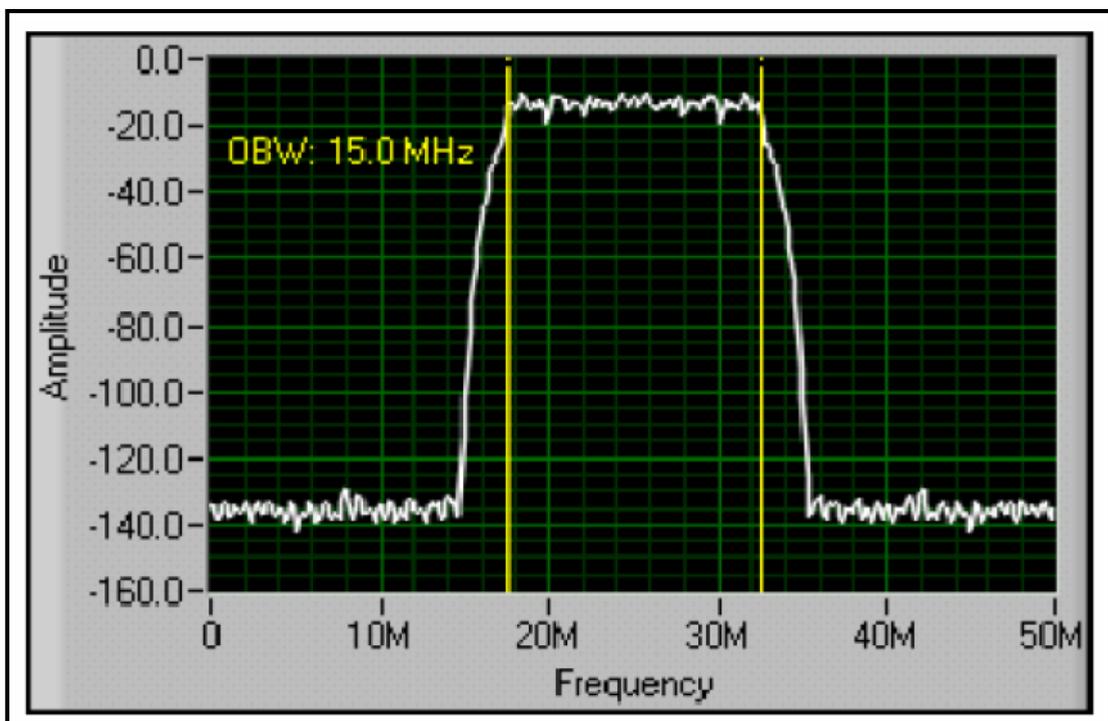


Figura 2.4 El pico centrado a 25MHz tienen un ancho de banda ocupada de 15MHz para $B=99$.

(NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 11)

2.3.3.3 Potencia del Canal Adyacente

Potencia de canal adyacente (ACP de sus siglas en ingles) mide la forma de un canal en particular y la distribución de potencia de sus dos canales adyacentes. Esta medida es realizada por el cálculo de la potencia total en un canal y también la potencia total en los canales adyacentes superiores e inferiores. Figura 2.5 ilustra una típica medición ACP y la frecuencia central, ancho de banda, y espacio que describe el canal.

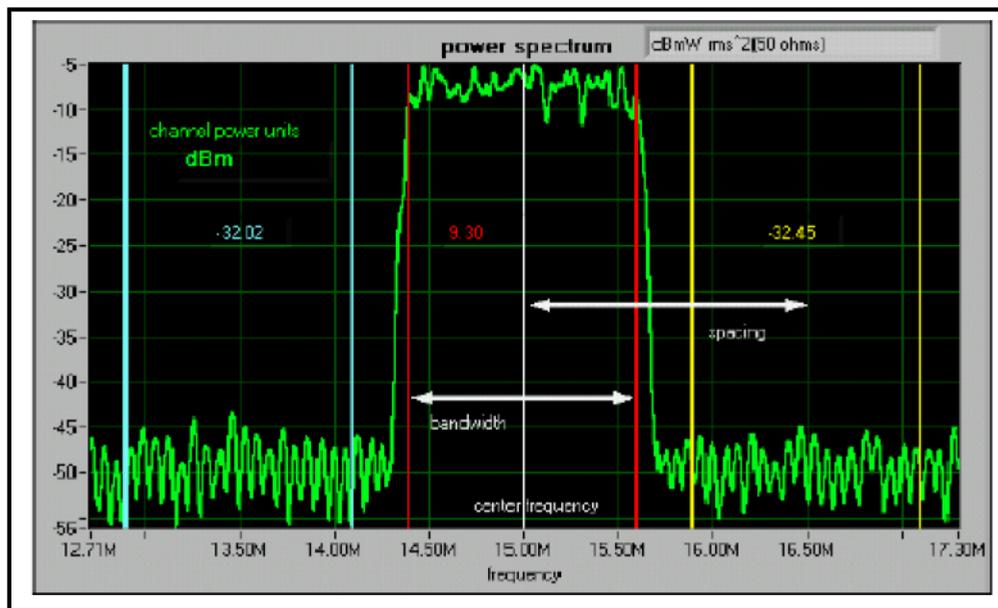


Figura 2.5 Medición de la Potencia de Canal Adyacente.
(NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 12)

Muchas tecnologías permiten canales adyacentes para distribución de información de diferentes proveedores, como los teléfonos celulares, TV, radio y cable. En estos y otras aplicaciones, es importante que las transmisiones de artefactos desde un canal no cruzar sobre un canal adyacente, cual podría notablemente degradar la calidad de otros canales.

2.3.3.4 Distorsión Armónica

En un sistema ideal, la FFT de una senoide podría resultar en un solo pico con una frecuencia específica. Sin embargo, en sistemas reales, la no linealidad, ruido, y otras factores resultan en imperfecciones. Cuando una señal de una frecuencia particular f_1 pasa a través de un sistema no lineal, la salida del sistema consiste de

f1 y sus armónicos, los componentes de la señal como f2 y f3 que existen en múltiplos de su frecuencia fundamental. Figura 2.6 indica esta relación.

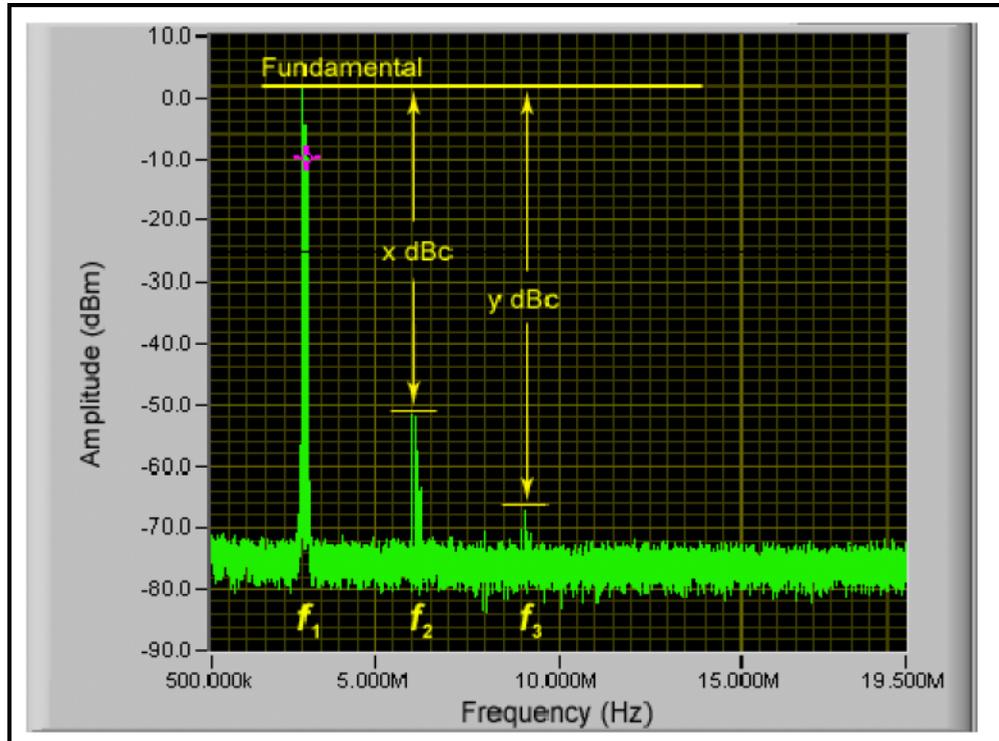


Figura 2.6 Distorsión Armónica.
(NATIONAL INSTRUMENTS, RF HANDBOOK, 2007, Pag. 13)

2.3.3.4.1 Cálculos de la Distorsión Armónica

Distorsión armónica puede ser expresada como una relación de potencia o una relación de porcentaje. Se usa la siguiente fórmula para expresar esto como una expresión de potencia:

$$P_{HD} = P_{fund} - P_{arm} \text{ (dBc).}$$

Donde PHD es la potencia de la distorsión armónica en dBc, Pfund es la potencia de la señal fundamental en dB o dBm, y Parm es la potencia de la armónica de interés en dB o dBm.

La siguiente fórmula convierte la potencia a voltaje para expresar la distorsión armónica como una relación de porcentaje.

$$\text{Porcentaje de Distorsión} = \frac{V_{arm}}{V_{fund}} \times 100$$

En algunas aplicaciones, la distorsión armónica es medida como un porcentaje total de la distorsión armónica (THD de sus siglas en Ingles). Esta medida involucra la suma de potencia de algunas o todos los armónicos en la banda, definida como la siguiente ecuación:

$$THD = \frac{\sqrt{V_{h2}^2 + V_{h3}^2 + V_{h4}^2 + \dots + V_{hN}^2}}{V_{fund}}$$

2.3.3.5 Mediciones de Potencia Unidades y definiciones

2.3.3.5.1 Vatios

El sistema internacional de medidas (SI de sus siglas en ingles) estableció que vatios (W) es la unidad de potencia; un vatio es un joule por segundo. De forma interesante cantidades eléctricas no entran en esta definición de potencia, de hecho otras unidades eléctricas son derivadas del vatio como un voltio es un vatio por amperio.

2.3.3.5.2 dB

En muchos casos, como en la medida de la ganancia o atenuación, la relación de dos potencias o potencias relativas es frecuentemente el cantidad deseada que la potencia absoluta. Potencia relativa es la relación de un nivel de potencia, P, para un nivel de referencia relativa P_{ref} . Esta relación es adimensional debido a que las unidades de ambos el numerador y denominador usa vatios. Potencia relativa es usualmente expresada en decibeles (dB).

El dB es definido como:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$$

El uso de dB tiene dos ventajas. Primera, el rango de números usados comúnmente es mas compacto; por ejemplo 36dB para -153dB es mas concisa que 2×10^6 para 0.5×10^{-15} . La segunda ventaja es aparente cuando es necesaria la búsqueda de ganancia de muchos dispositivos en cascada. Multiplicación de ganancias numéricas es entonces reemplazada por la suma de la ganancia de potencia en dB para cada dispositivo.

2.3.3.5.3 dBm

Usada popularmente y ha sido agregada como otra unidad conveniente dBm. La fórmula para dBm es similar que la del dB excepto que el denominador, Pref es siempre 1mW.

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ m W}} \right)$$

En esta expresión, P es expresada en mW y es la única variable, entonces dBm es para medir la potencia absoluta.

2.4 Desarrollo de la práctica de medidas espectrales con uso de LabVIEW

El VI de la práctica de medidas espectrales es un simulador de un analizador de espectro real; esto nos permitirá poder observar las diferentes partes que posee este instrumento.

1. Abrir el VI proporcionado el instructor con el nombre de "Practica 2 - Analizador de Espectro Simulado". Se desplegara el siguiente panel frontal Figura 2.7.

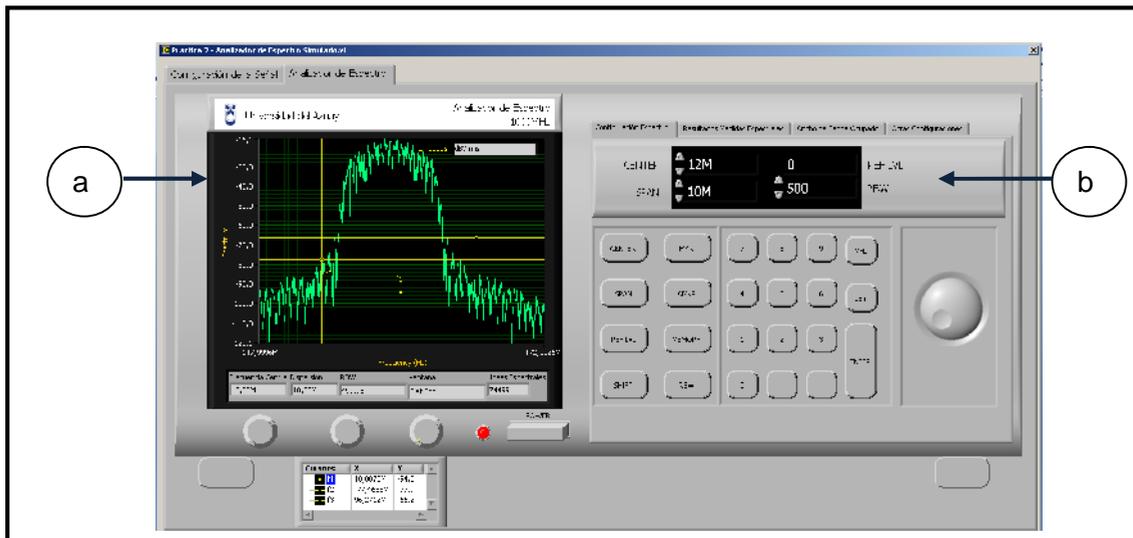


Figura 2.7 Panel Frontal de la practica

El panel frontal de la práctica consta de las siguientes partes:

a. Pestañas de configuración del instrumento virtual:

Configuración de Señal: Esta pestaña configura la señal que deseamos observar en el analizador de espectro simulado.

- Analizador de Espectro: Esta pestaña tiene la representación de un analizador de espectro; posee controles e indicadores el cual nos permite modificar algunos parámetros importantes.

b. Dentro de la pestaña “Analizador de espectro poseemos las siguientes pestañas”:

- Configuración Espectro: En esta pestaña configuramos las propiedades de la adquisición del analizador de espectro entre las que tenemos:
 - Center: Centro del espectro donde apuntara el analizador de espectro.

- Span: Dispersión o espectro frecuencia a visualizar en la pantalla del analizador de espectro.
- Ref Lvl: Nivel de referencia del análisis espectral, esto es usado en los analizadores de espectro reales para configurar su hardware y obtener mejores características en sus adquisiciones.
- RBW: Resolución de ancho de banda.
- Búsqueda de Picos: En esta pestaña obtendremos los resultados de las búsquedas de picos y configuraciones para la obtención de los resultados, entre los controles que disponemos están:
 - Clúster Configuración de Búsqueda: En este control configuramos los parámetros de qué tipo de búsqueda de picos espectral deseamos, y el treshold o umbral de búsqueda.
 - Picos encontrados: Es un indicador tipo arreglo de datos en el cual se desplegaran, todos los valores de amplitudes y frecuencias de los picos encontrados.
 - Clúster Configuración de Unidades: En este control modificaremos las unidades del espectro obtenido en el analizador de espectro.
- Ancho de Banda Ocupado: En esta pestaña obtendremos los resultados de las medidas espectrales de:
 - Ancho de Banda ocupado: Indicador numérico del valor de ancho de banda en un porcentaje establecido por el usuario mediante el control numérico de porcentaje de potencia.
- Otras configuraciones: En esta pestaña nos proporciona algunas configuraciones avanzadas del analizador de espectro simulado, la cual no ocuparemos en esta práctica.

2. Para iniciar la comprobación del instrumento virtual ubiquémonos en la pestaña “Configuración de la Señal”, la cual nos permitirá indicar que señal deseamos observar en el analizador de espectro simulado Figura 2.8.

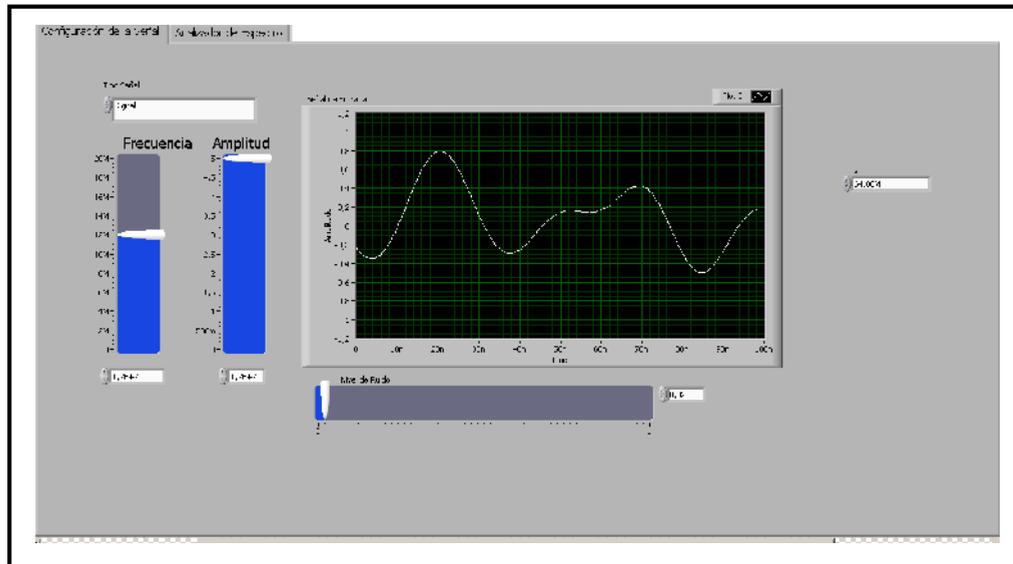


Figura 2.8. Pantalla de configuración señal a simular.

Disponemos de los siguientes controles para configurar:

- Tipo de Señal: Este control nos permite indicar el tipo de señal a simular entre lo que disponemos de :
 - Sinusoide.
 - Digital: Señal 16 QAM.
- Frecuencia (Hz): Control para modificar la señal de frecuencia de la señal simulada.
- Amplitud (V): Amplitud de la señal simulada.
- Nivel de Ruido (V): Ruido introducido en la señal simulada.
- Fs (Hz): Frecuencia de muestreo de la señal simulada.

Configuramos los controles explicados anteriormente con los siguientes valores:

- Tipo de Señal: Sinusoide.
- Frecuencia: 12M.
- Amplitud: 5V.
- Nivel de Ruido: 0.02V.
- Fs:64M.

Con los valores anteriores obtenemos la siguiente forma de onda en el dominio del tiempo Figura 2.9:

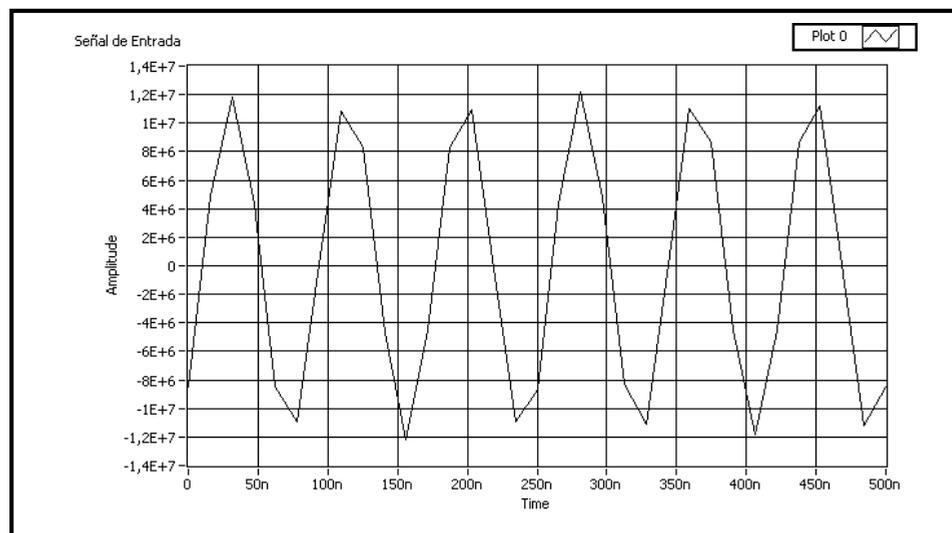


Figura 2.9. Señal de Entrada en el dominio del tiempo del analizador de espectro.

3. Una vez configurada la señal de entrada procedemos a ubicarnos en la pestaña con la etiqueta "Analizador de Espectro" Figura 2.10. Y configuramos los controles con los siguientes valores:

- Center Frequency = 12MHz.
- Span: 10MHz.
- RBW: 100KHz.

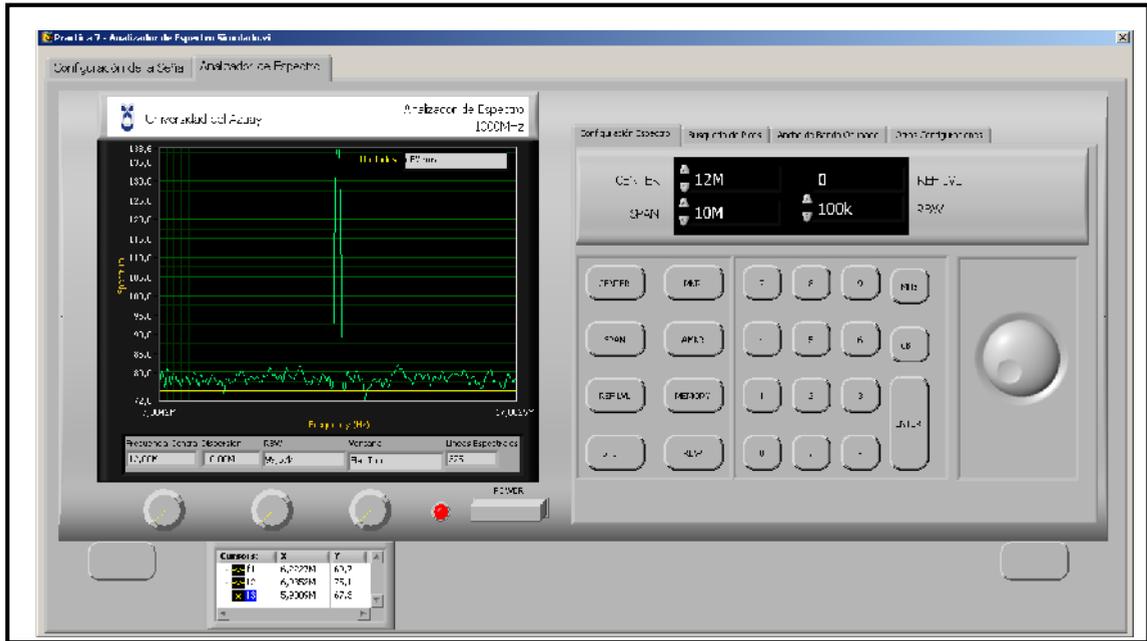


Figura 2.10. Panel Frontal del analizador de espectro simulado.

Al finalizar de configurar los parámetros anteriores obtenemos el siguiente espectro
 Figura 2.11:

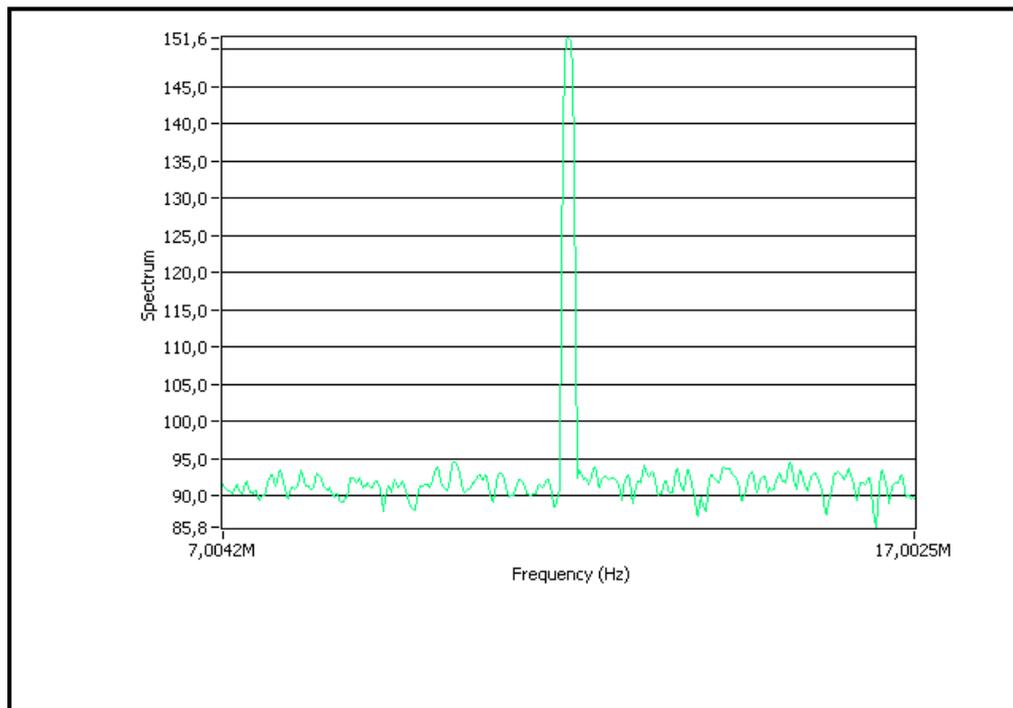


Figura 2.11. Espectro de Frecuencia señal sinusoidal.

La Figura 2.11 nos muestra un espectro de potencia de una señal sinusoidal de frecuencia de 12MHz y con un valor de potencia de 151.6 dBm.

Además según lo estudiado podemos determinar que con el nivel de ruido se la señal anterior, el piso de ruido de la adquisición es alrededor de 90dBm, y que el Rango dinámico de la adquisición es de alrededor de 61.6 dBm.

4. Para mejorar el Rango dinámico podemos mermar la resolución de ancho de banda según lo estudiado en la parte teórica. A continuación mermamos la resolución de ancho de banda RBW con un valor de 10KHz, y obtendremos el siguiente espectro de potencia. Figura 2.12.

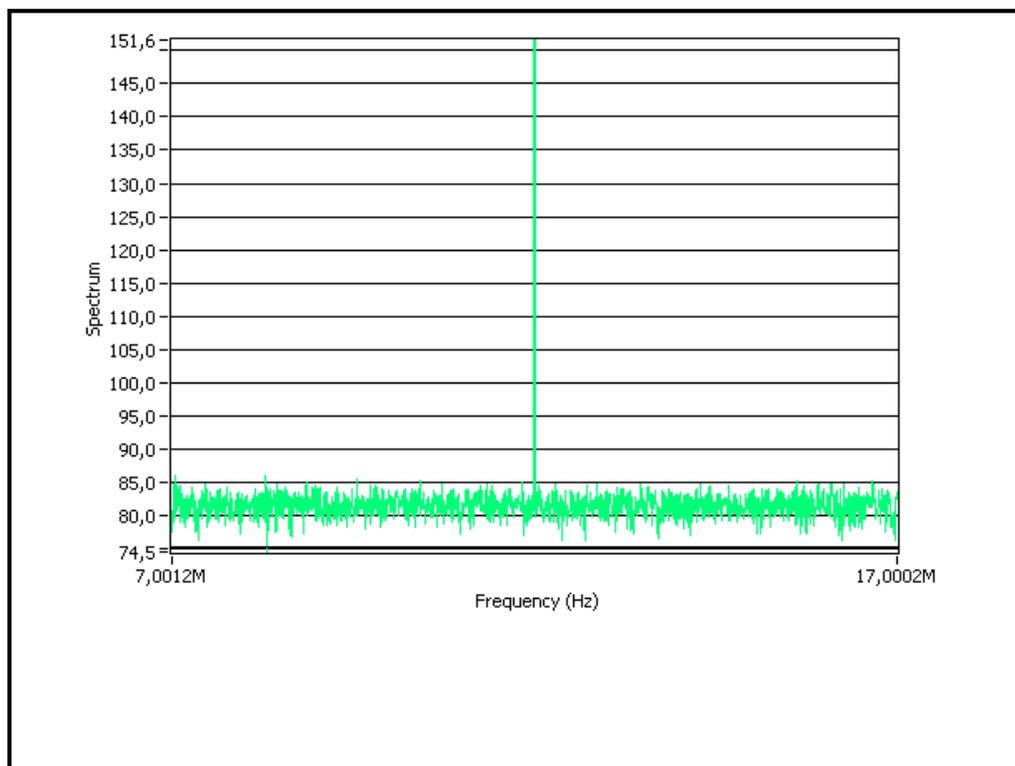


Figura 2.12. Espectro de Frecuencia señal sinusoidal con mayor rango dinámico.

En la Figura 2.12, se puede observar claramente que aumento el rango dinámico de la adquisición en alrededor de 10dBm, esto quiere decir que podemos obtener mejores características de la señal adquirida. En la adquisición anterior tenemos un piso de ruido ubicado en alrededor de 80dBm y un rango dinámico de 71.6 dBm.

5. Ahora procederemos al análisis de una señal digital, para realizar esto nos ubicaremos en la pestaña con el nombre de "Configuración de la Señal" y ubiquemos los siguientes valores:

- Tipo de Señal: Digital.
- Frecuencia: 12M.
- Amplitud: (El valor ubicado en este control para señal digital no aplica es por defecto +/-1)
- Nivel de Ruido: 0.02V.
- Fs:64MHz.

Con los valores anteriores obtenemos la siguiente forma de onda en el dominio del tiempo Figura 2.13:

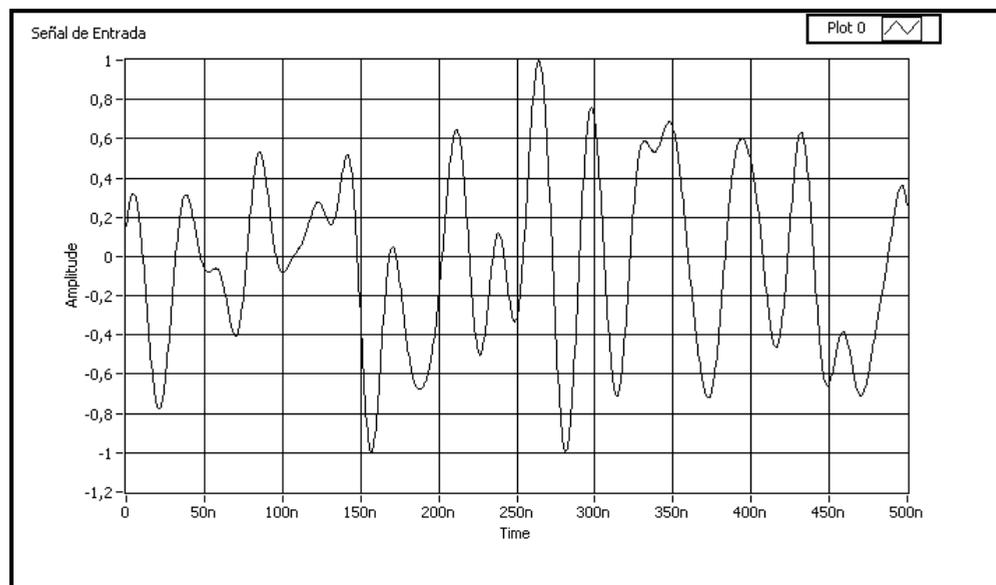


Figura 2.13. Señal de Entrada en el dominio del tiempo del analizador de espectro.

6. Al modificar la señal de entrada al analizador de espectro a continuación nos ubicamos en la pestaña "Analizador de espectro" y modificamos los controles del analizador de espectro con los siguientes valores:

- Center Frequency = 12MHz.
- Span: 50MHz.
- RBW: 100KHz.

Al modificar los parámetros anteriores obtendremos la siguiente pantalla Figura 2.14.

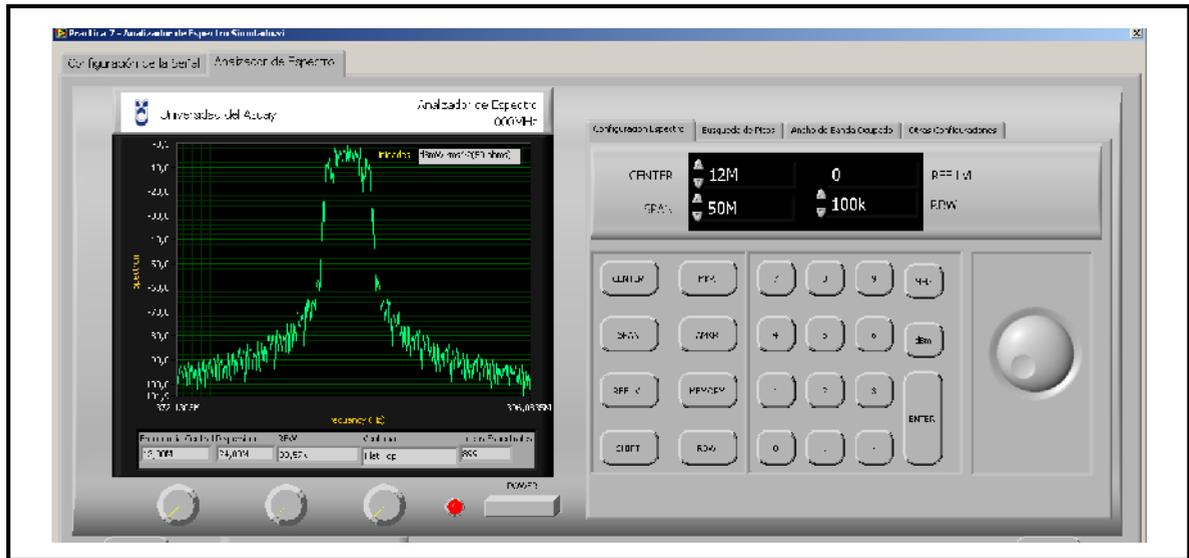


Figura 2.14. Analizador de espectro con una señal digital de entrada.

En la Figura 2.4 se puede observar la forma del espectro de una señal digital, a continuación con las herramientas del VI procederemos a obtener el ancho de banda ocupado de la señal.

7. Para obtener el ancho de banda del espectro de frecuencia de la señal 2.14, procedemos a ubicarnos en la pestaña “Ancho de Banda ocupado” y configuraremos el control con la etiqueta “Potencia %” el valor de 99% que indica que deseamos obtener el ancho de banda de la señal que ocupa el 99% de su potencia, esto quiere decir que deseamos la cantidad del espectro que ocupa el 99% de la potencia de la señal transmitida, esto es considerado el ancho de banda de una señal.

Al configurar los parámetros del paso 7 obtenemos los siguientes valores como resultado Figura 2.15.

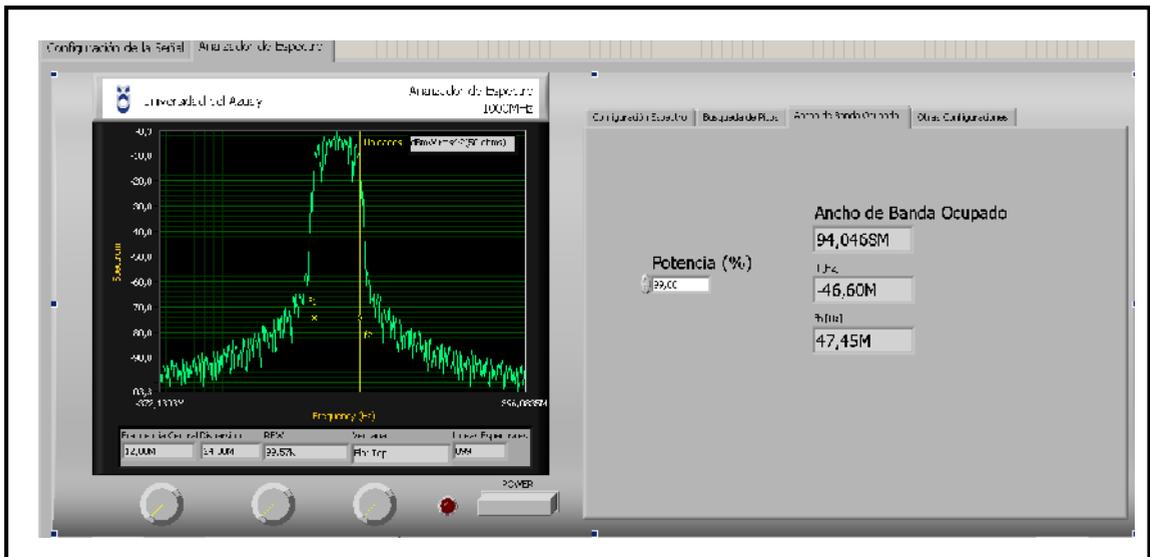


Figura 2.15. Ancho de banda ocupado de la señal digital.

Los resultados obtenidos son:

- Ancho de Banda Ocupado: 94.046MHz.
- Fl (frecuencia baja donde es considerado el inicio del cálculo):-46.6MHz.
- Fh (frecuencia alta donde es considerado el fin del cálculo):47.45MHz.

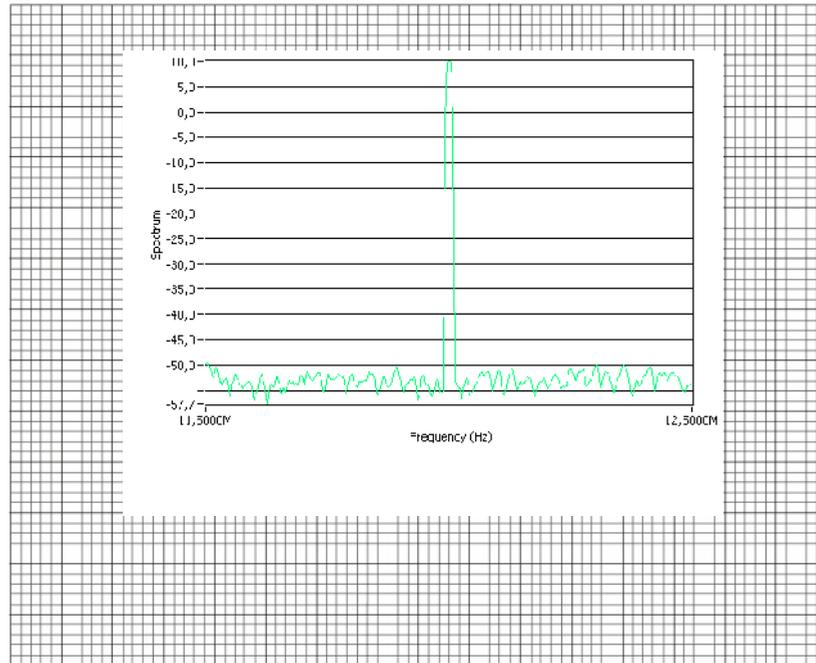
2.5 Ejercicio de Aplicación

1. Abrir el VI proporcionado por el instructor.
2. Configurar la señal de entrada con los siguientes valores:

Tipo de Señal	Sinusoide
Frecuencia	12M
Amplitud	1 V
Nivel de Ruido	0.5
Frecuencia de Muestreo	64M

3. Configurar el analizador el analizador de espectro para obtener el mayor rango dinámico, y dibujar el espectro de potencia adquirido.

Center Frequency (Frecuencia Central)	12MHz
Span(Dispersión):	1MHz
RBW(Resolución de ancho de banda)	10KHz.



4. Obtener la potencia de la transmisión de la señal del ejercicio 3.

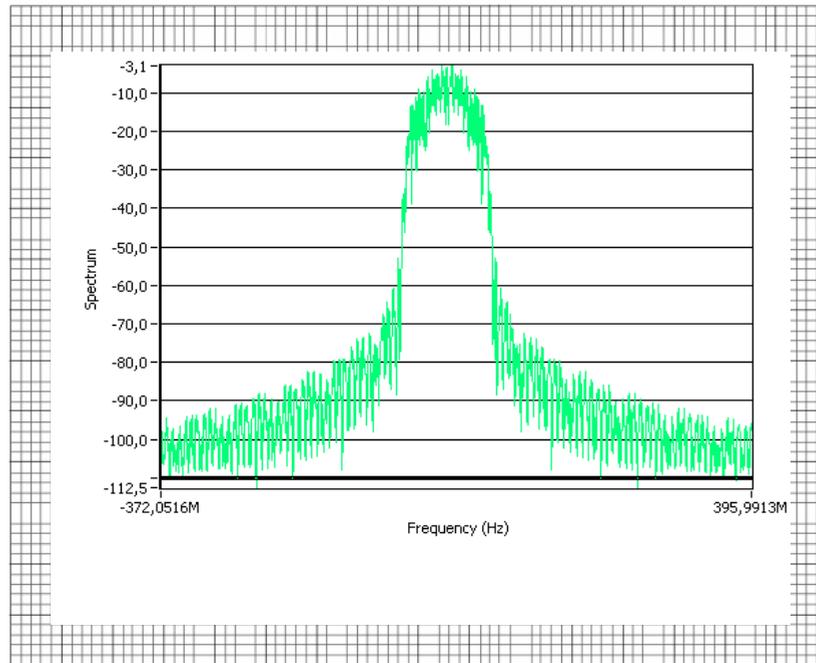
Potencia	
dBm	10dBm

5. Configurar la señal de entrada con los siguientes valores:

Tipo de Señal	Digital
Frecuencia	12M
Amplitud	1 V
Nivel de Ruido	0.5
Frecuencia de Muestreo	64M

3. Configurar el analizador el analizador de espectro para obtener el mayor rango dinámico, y dibujar el espectro de potencia adquirido.

Center Frequency (Frecuencia Central)	12MHz
Span(Dispersión):	50MHz
RBW(Resolución de ancho de banda)	10KHz.



4. Obtener el ancho de banda que ocupa el 99% de la potencia de la señal.

Ancho de Banda Ocupado	94.0711MHz
fl(Hz)	-46.99MHz
fh(Hz)	47.08MHz

2.6 Conclusiones:

En esta practica se pudo observar las diferentes partes de un analizador de espectro, y entender algunos terminos y conceptos que son utilizados en las medidas espectrales, proporcionandnos un conocimiento que podra ser utilizado en equipos de este tipo reales.

CAPÍTULO 2:

Modulaciones Analógicas.

PRACTICA 3

Tema: Modulación de Amplitud de Señales Analógicas

3.1 Objetivos

- a. Repasar los conceptos básicos de modulación de amplitud de señales analógicas.
- b. Analizar el comportamiento de los esquemas de modulación de amplitud en el dominio del tiempo y frecuencia.

3.2 Introducción

Las señales de transmisión se transportan entre un transmisor y un receptor a través de alguna forma de medio de transmisión. Sin embargo, casi nunca tienen las señales de información una forma de onda adecuada para su transmisión. En consecuencia, se deben transformar a una forma de onda más adecuada. El proceso de superponer señales de información de baja frecuencia en una señal portadora de alta frecuencia se llama modulación. La demodulación es el proceso inverso, donde las señales recibidas se regresan a su forma original. El objetivo de esta práctica es repasar los conceptos fundamentales de la modulación de amplitud (AM).

3.3 Principios Modulación de Amplitud

La modulación de amplitud (AM Amplitud Modulada) es el proceso de cambiar la amplitud de una señal portadora de frecuencia relativamente alta, en proporción con el valor instantáneo de la señal modulante o moduladora (información).

Los moduladores de AM (Amplitud Modulada) son dispositivos no lineales, con dos entradas y una salida. Una entrada es una sola señal portadora de alta frecuencia y amplitud constante, y la segunda está formada por señales de información, de frecuencia relativamente baja, que puede tener una sola frecuencia, o ser una forma compleja de onda, formada a su vez por muchas frecuencias. Las

frecuencias que son lo suficientemente altas como para irradiarse en forma eficiente de una antena, y propagarse por el espacio libre se suelen llamar radiofrecuencias o simplemente RF. En el modulador, la información actúa sobre, o modula, la portadora de RF y produce una forma de onda modulada. La señal de información puede tener una sola frecuencia, o con más probabilidad, puede consistir en un intervalo de frecuencias. Por ejemplo, en un sistema normal de comunicaciones de voz se usa un intervalo de frecuencias de información de 300 a 3000Hz. A la forma de onda modulada de un modulador AM se le llama con frecuencia envolvente de AM, como se puede apreciar en la Figura 3.1.

3.3.1 La envolvente de AM

El esquema de modulación de AM más utilizado es el de portadora de máxima potencia y doble banda lateral (DSBFC, por *doublesideband full carrier*). A este sistema se le llama AM convencional o simplemente AM. La Figura 3.1 ilustra la relación entre la portadora, la señal moduladora y la onda modulada de la AM convencional. Allí se ve cómo se produce una forma de onda de AM cuando una señal moduladora de una sola frecuencia actúa sobre una señal portadora de alta frecuencia. La forma de onda de salida contiene todas las frecuencias que forman señal de AM, y se usa para transportar la información por el sistema. Por consiguiente, la forma de la onda modulada se llama envolvente de AM. Nótese que cuando no hay señal modulante, la forma de onda de salida no es más que la señal de la portadora. Sin embargo, cuando se aplica una señal moduladora, varía la amplitud de la onda de salida, de acuerdo con la señal moduladora. Nótese que la frecuencia de repetición de la envolvente es igual a la frecuencia de la señal moduladora, y que la forma de la envolvente es idéntica a la forma de la señal moduladora.

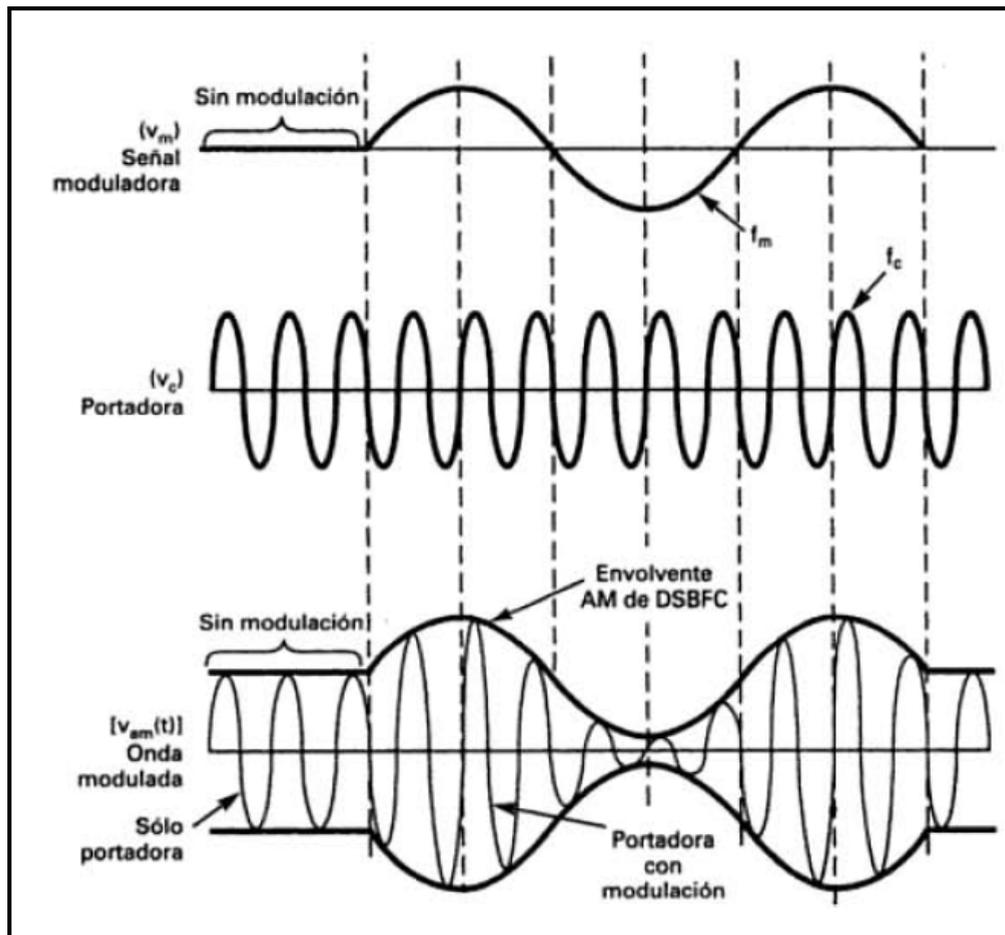


Figura 3.1. Formas de Onda de Amplitud Modulada (AM).

(TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.101)

3.3.2 Espectro de frecuencias y ancho de banda

Un modulador de AM es un dispositivo no lineal. En consecuencia, hay mezclado no lineal, y la envolvente de salida es una onda compleja formada por un voltaje de cd, la frecuencia de la portadora y la suma $(f_c + f_m)$ y la diferencia $(f_c - f_m)$ de las frecuencias, es decir, los productos cruzados. Las frecuencias de suma y diferencia están desplazadas respecto a la frecuencia de la portadora una cantidad igual a la frecuencia de la señal moduladora. Por consiguiente, un espectro de señal de AM contiene los componentes de la frecuencia apartados f_m hertz a ambos lados de la portadora. Sin embargo, se debe hacer notar que la onda modulada no contiene un componente de frecuencia que sea igual a la señal moduladora. El efecto de la modulación es trasladar la señal moduladora en el dominio de la frecuencia, de modo que se refleje simétricamente respecto a la frecuencia de la portadora.

La Figura 3.2 muestra el espectro de frecuencias para una onda de AM. Este espectro se extiende desde $(f_c - f_{m(MAX)})$ hasta $(f_c + f_{m(MAX)})$, siendo f_c la frecuencia de la portadora y $f_{m(MAX)}$ la frecuencia máxima de la señal moduladora.

La banda de frecuencias entre $(f_c - f_{m(MAX)})$ y f_c se llama banda lateral inferior (LSB, de *lower sideband*) y toda la frecuencia dentro de esta banda es frecuencia de lado inferior (LSF, de *lower side frequency*). La banda de frecuencias entre f_c y $(f_c + f_{m(MAX)})$ se llama banda lateral superior (USB, *upper sideband*) y las frecuencias dentro de esta banda se llaman frecuencias de lado superior (USF, *upper side frequency*). Por consiguiente, el ancho de banda (B) de una onda DSBFC de AM es igual a la diferencia entre la frecuencia de lado superior y la mínima del lado inferior, o también, igual a dos veces la frecuencia máxima de la señal modulante, es decir:

$$B = 2f_{m(MAX)}$$

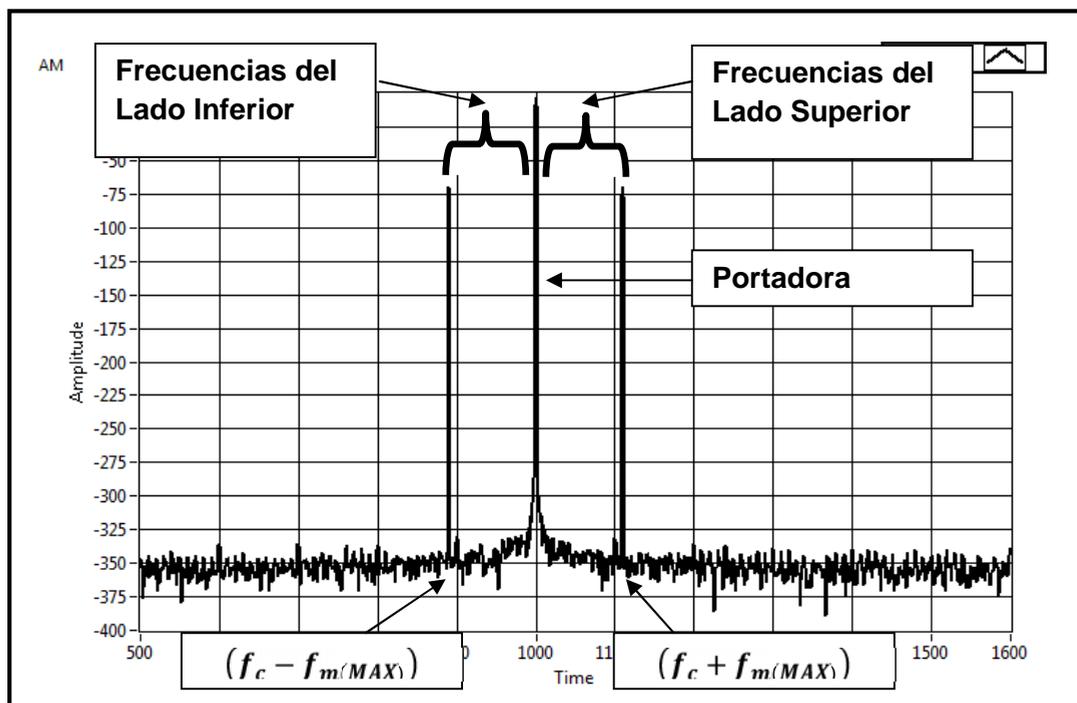


Figura 3.2. Espectro de frecuencias de una onda AM DSBFC.

3.3.3 Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación

Un término que describe la cantidad de cambio de amplitud modulación que hay en una forma de onda de AM es el coeficiente de modulación. El porcentaje de modulación, o modulación porcentual, es simplemente el coeficiente de modulación expresado como porcentaje. En forma más específica, el porcentaje de modulación indica el cambio porcentual de amplitud de la onda de salida cuando sobre la portadora actúa una señal moduladora. La definición matemática del coeficiente de modulación es:

$$m = \frac{E_m}{E_c}$$

En la que:

m = coeficiente de modulación (a dimensional).

E_m = cambio máximo de amplitud de la forma de onda de voltaje de salida (volts).

E_c = amplitud máxima del voltaje de la portadora (volts).

La ecuación anterior se puede reordenar, despejando a E_m y E_c , como sigue:

$$E_m = mE_c$$

$$E_c = \frac{E_m}{m}$$

Y el porcentaje M de modulación es:

$$M = \frac{E_m}{E_c} * 100$$

O simplemente $m \times 100$.

En la Figura 3.3 se observa la relación de modulación entre m , E_m y E_c .

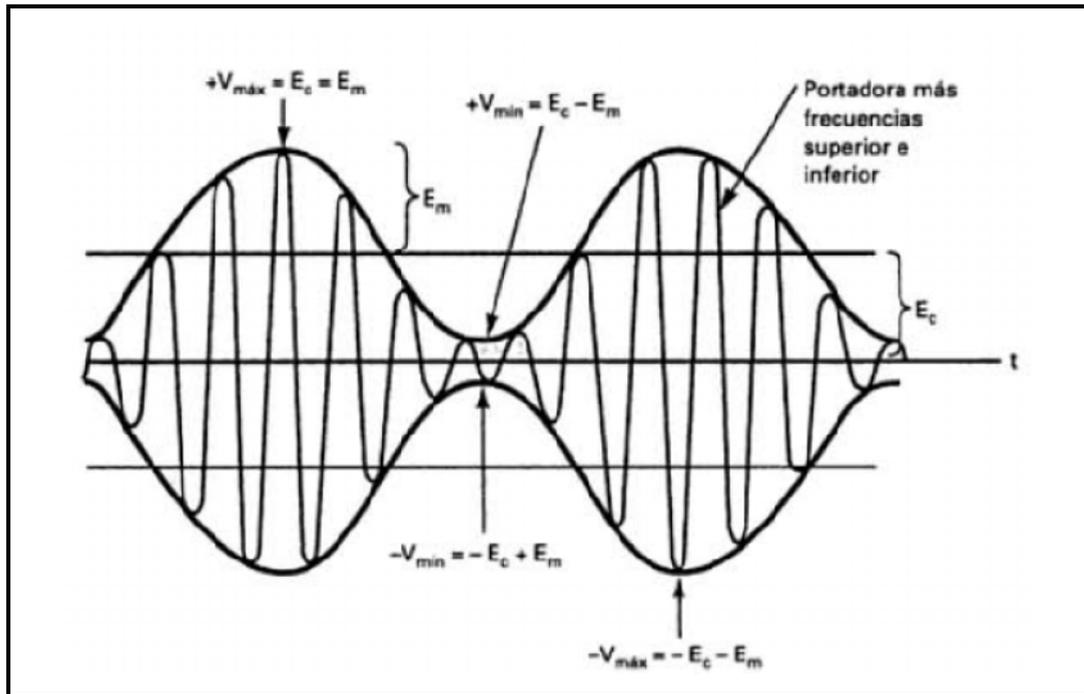


Figura 3.3. Relación entre coeficientes modulación m, E_m y E_c .
(TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.105).

Si la señal moduladora es una onda senoidal pura de una sola frecuencia, y el proceso de modulación es simétrico (es decir, las diferencias positiva y negativa de amplitud de la envolvente son iguales), entonces se puede deducir como sigue el porcentaje de modulación.

$$E_m = \frac{1}{2}(V_{MAX} - V_{MIN})$$

$$E_c = \frac{1}{2}(V_{MAX} + V_{MIN})$$

Por siguiente:

$$M = \frac{\frac{1}{2}(V_{MAX} - V_{MIN})}{\frac{1}{2}(V_{MAX} + V_{MIN})} \times 100$$

$$M = \frac{(V_{MAX} - V_{MIN})}{(V_{MAX} + V_{MIN})} \times 100$$

En donde:

$$V_{MAX} = E_c + E_m$$

$$V_{MIN} = E_c - E_m$$

El cambio máximo de amplitud de la onda de salida E_m es la suma de los voltajes de las frecuencias laterales superior e inferior. Por siguiente, ya que $E_m = E_{f_{ls}} + E_{f_{li}}$ y $E_{f_{ls}} = E_{f_{li}}$, por lo tanto

$$E_{f_{ls}} = E_{f_{li}} = \frac{E_m}{2} = \frac{1}{2} \frac{(V_{MAX} - V_{MIN})}{2} = \frac{1}{4} (V_{MAX} - V_{MIN})$$

En la que:

$E_{f_{ls}}$ = Amplitud máxima de la frecuencia de lado superior (volts).

$E_{f_{li}}$ = Amplitud máxima de la frecuencia de lado inferior (volts).

3.3.4 Distribución de voltaje de AM

Una portadora no modulada se puede describir matemáticamente como sigue:

$$V_c(t) = E_c \text{sen}(2\pi f_c t)$$

En donde:

$V_c(t)$ = forma de onda de voltaje de la portadora, variable en el tiempo.

E_c = amplitud máxima de la portadora (volts).

f_c = frecuencia de la portadora (hertz).

La rapidez de repetición de una envolvente de AM es igual a la frecuencia de la señal moduladora, que la amplitud de la onda de AM varía en proporción con la señal moduladora, y que la amplitud máxima de la onda modulada es igual a $E_c + E_m$. Por lo anterior, la amplitud instantánea de la onda modulada se puede expresar como sigue:

$$V_{AM}(t) = [E_c + E_m \text{sen}(2\pi f_m t)][\text{sen}(2\pi f_c t)]$$

Donde:

$E_c + E_m \text{sen}(2\pi f_m t)$ = amplitud de la onda modulada.

E_m = cambio máximo de amplitud de la envolvente (volts).

f_m = frecuencia de la señal moduladora (hertz).

Si se sustituye E_m por mE_c ,

$$V_{AM}(t) = [E_c + mE_c \text{sen}(2\pi f_m t)][\text{sen}(2\pi f_c t)]$$

Siendo:

$[E_c + mE_c \text{sen}(2\pi f_m t)]$ = la amplitud de la onda modulada.

Se saca factor común E_c y se arregla la ecuación anterior:

$$V_{AM}(t) = [1 + m \operatorname{sen}(2\pi f_m t)][E_c \operatorname{sen}(2\pi f_c t)]$$

Donde:

$[1 + m \operatorname{sen}(2\pi f_m t)]$ = voltaje contante + señal moduladora.

$[E_c \operatorname{sen}(2\pi f_c t)]$ = voltaje de portadora no modulada.

El siguiente análisis demostrara por qué el componente constante produce el componente de la portadora en la onda modulada, y el componente senoidal produce las frecuencias laterales. Si se hace la multiplicación en la ecuación a continuación descrita se obtendrá.

$$\begin{aligned} V_{AM}(t) &= [E_c + mE_c \operatorname{sen}(2\pi f_m t)][\operatorname{sen}(2\pi f_c t)] \\ V_{AM}(t) &= E_c \operatorname{sen}(2\pi f_c t) + [mE_c \operatorname{sen}(2\pi f_m t)][E_c \operatorname{sen}(2\pi f_c t)] \end{aligned}$$

Por siguiente:

$$V_{AM}(t) = E_c \operatorname{sen}(2\pi f_c t) - \frac{mE_c}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \frac{mE_c}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t]$$

Donde:

$E_c \operatorname{sen}(2\pi f_c t)$ = señal portadora (volts).

$-\frac{mE_c}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$ = señal de la frecuencia de lado superior (volts).

$+\frac{mE_c}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t]$ = señal de la frecuencia de lado inferior (volts).

De la ecuación anterior se deben hacer notar algunas características importantes acerca de la modulación de amplitud con portadora completa y doble banda lateral (DSBFC).

1. Que se observa que la amplitud de la portadora después de la modulación es igual a la que era antes de la modulación, E_c . Por consiguiente, la amplitud de la portadora no se altera por el proceso de modulación.

2. La amplitud de las frecuencias de lado superior e inferior depende tanto de la amplitud de la portadora como del coeficiente de modulación. Para 100% de modulación, $m=1$ y las amplitudes de las bandas superior e inferior de frecuencias son iguales, las dos, a $E_c/2$ la mitad de la amplitud de la portadora.

3.4. Tipos de modulación AM

En los numerales anteriores observamos la explicación de un esquema de modulación AM denominado portadora de máxima potencia y doble banda lateral (DSBFC, por *doublesideband full carrier*), este es un esquema de modulación de doble banda lateral, estos sistemas poseen ventajas inherentes, una de ellas es que la potencia de la portadora tiene dos tercios o mas de potencia total trasmitida, este es un gran inconveniente, porque la portadora no contiene información, las que contienen la información son las bandas laterales. Otro inconveniente es que poseen el doble de ancho de banda que el nesario para la trasmisión en otros esquemas de AM de banda lateral única. Por siguiente las trasmisiones en AM convencional son ineficientes. A continuación se observaran algunos esquemas de modulación de AM y sus ventajas y desventajas.

3.4.1 AM de banda lateral única y portadora de máxima potencia

La señal AM SSBFC (*single-sideband full carrier*) banda lateral única y portadora de máxima potencia, es una forma de modulación de amplitud en la que la portadora se trasmite con potencia máxima, pero solo se trasmite una de las bandas laterales. En la Figura 3.4 se observa el espectro de frecuencias y la distribución relativa de potencias en este sistema.

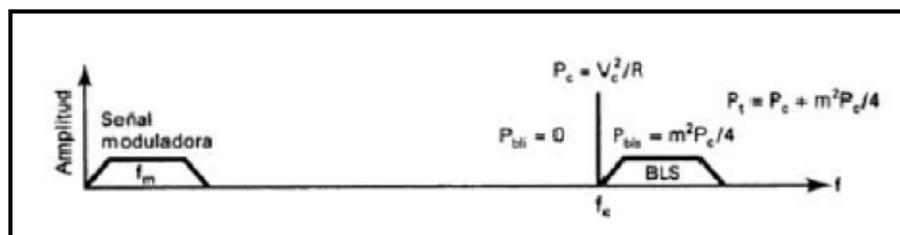


Figura 3.4. Sistema AM- SSBFC.

(TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.190).

3.4.2 AM de banda lateral única y portadora suprimida

La AM SSBSC (*single-sideband suppressed carrier*) de banda lateral única y portadora suprimida es una forma de modulación de amplitud en la que la portadora se suprime en su totalidad y se quita una de las bandas laterales. Por siguiente, en el SSBSC se requiere la mitad del ancho de banda que en la AM convencional de doble banda lateral, y bastante menos potencia para la transmisión. En la figura 3.5 se observa el espectro de frecuencia y la distribución de potencia relativa del sistema.

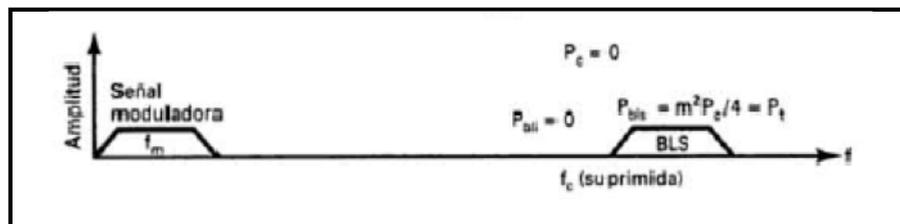


Figura 3.5. Sistema AM-SSBSC.

(TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.190).

3.4.3 AM de banda lateral única y portadora reducida

La AM SSBRC (*single-sideband reduced carrier*) de banda lateral única y portadora reducida es una forma de modulación de amplitud, en la que se quita totalmente una banda lateral y el voltaje de la portadora se reduce más o menos hasta el 10% de su amplitud. En la figura 3.6 se observa el espectro de frecuencia y la distribución de potencia relativa del sistema.

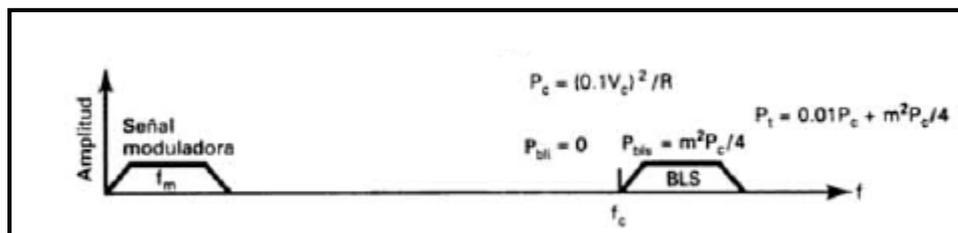


Figura 3.6. Sistema AM-SSBRC.

(TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.190).

3.4.4 AM de banda lateral residual

La AM VSB (*vestigial sideband*) de banda lateral residual es una forma de modulación de amplitud donde se transmiten la portadora y una banda lateral de máxima potencia, pero sólo una parte de la segunda banda lateral. En la Figura 3.7 se observa el espectro de frecuencia y la distribución de potencia relativa del sistema.

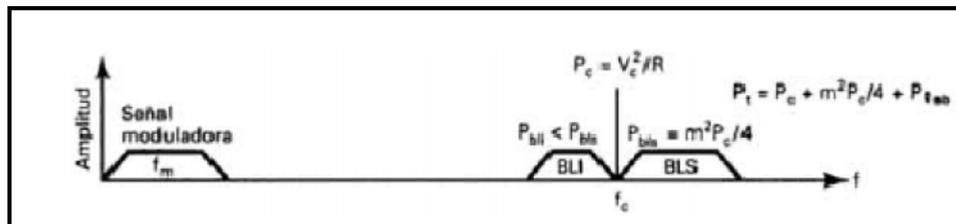


Figura 3.7. Sistema AM-VSB.

(TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.190).

3.5 Desarrollo de la práctica de Modulación de Amplitud con uso LabVIEW

Los siguientes pasos describen como construir un instrumento virtual VI (*virtual instrument*) para generar una señal de amplitud modulada, y así poder observar su comportamiento al modificar alguna de sus características estudiadas.

Basados en las formulas que describen este esquema de modulación se procederá a la construcción de un modulador virtual de amplitud modulada de una señal analógica, como sigue:

1. Abrir el VI proporcionado por el instructor con el título de Práctica de Modulación de Amplitud Analogica.vi, el que puede apreciar el panel frontal y diagrama de bloques.

El VI contiene un panel frontal completo (interface de usuario) y se podrá trabajar para implementar la simulación, además se puede observar que se tienen los controles necesarios para variar los parámetros de la señal modulante y portadora. Figura 3.8, diagrama al cual los desarrollaremos paso a paso.

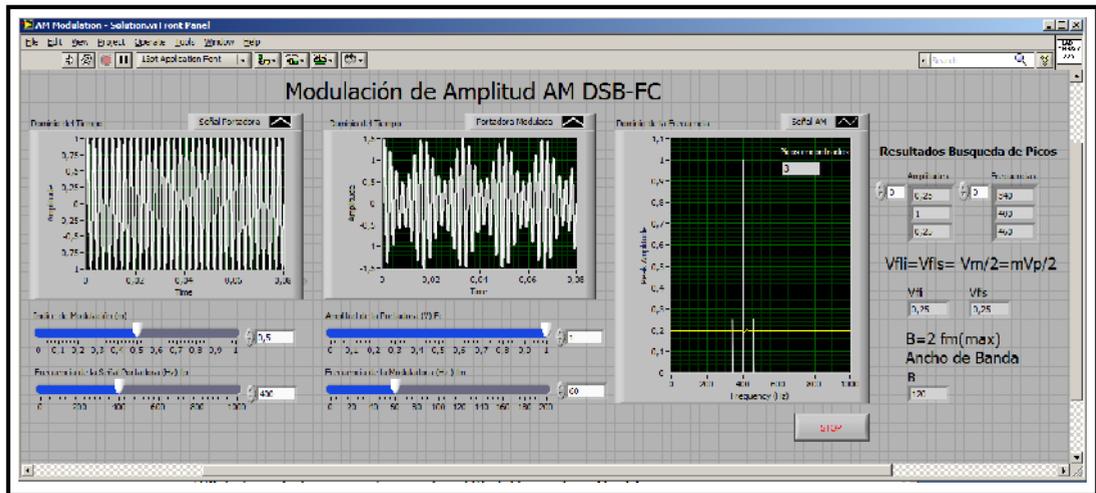


Figura. 3.8. Panel frontal del ejercicio.

Los controles utilizados en el VI son los siguientes:

Control	Tipo	Descripción	Unidades
Índice de Modulación.	Numérico	Describe el cambio de amplitud (modulación) que hay en una forma de onda DE AM	Sin unidad
Frecuencia de la Portadora	Numérico	Frecuencia de la Señal Portadora de AM	Hz
Amplitud Portadora	Numérico	Amplitud de la señal portadora de AM	V.
Frecuencia de la Moduladora	Numérico	Frecuencia de la señal senoidal que modulará la señal portadora	Hz.

Tabla 3.1. Lista de Controles del Instrumento Virtual

Los Indicadores utilizados en el VI son los siguientes:

Indicador	Tipo	Descripción
Señal Portadora	Gráfico de Forma de Onda	Gráfico que muestra el comportamiento de la señal portadora en el dominio del Tiempo.
Portadora Modulada	Gráfico de Forma de Onda	Gráfico que muestra el comportamiento de la señal portadora modulada en AM en el dominio del tiempo
Señal AM	Gráfico de Forma de Onda	Gráfico que muestra el comportamiento de la señal portadora modulada en AM en el dominio de la frecuencia
Picos encontrados	Numérico	Indicador numérico que muestra los picos encontrados en el gráfico de la señal AM. Estos picos encontrados representan las bandas laterales de la señal AM.
Amplitudes encontradas	Arreglo Numérico	Arreglo de números los cuales representan las amplitudes de los picos encontrados.
Frecuencias Encontradas	Arreglo Numérico	Arreglo de números los cuales representan las frecuencias de los picos encontrados.
Vbli	Numérico	Voltaje de la banda lateral inferior.
Vbls	Numérico	Voltaje de la banda lateral superior.
B	Numérico	Ancho de Banda de la señal AM

Tabla 3.2. Lista de Indicadores del Instrumento Virtual.

2. Al trasladarnos al diagrama de bloques, se puede observar que se encuentra incompleto Figura. 3.9, a continuación se construirá sobre el mismo mediante la fórmula matemática un modulador AM.

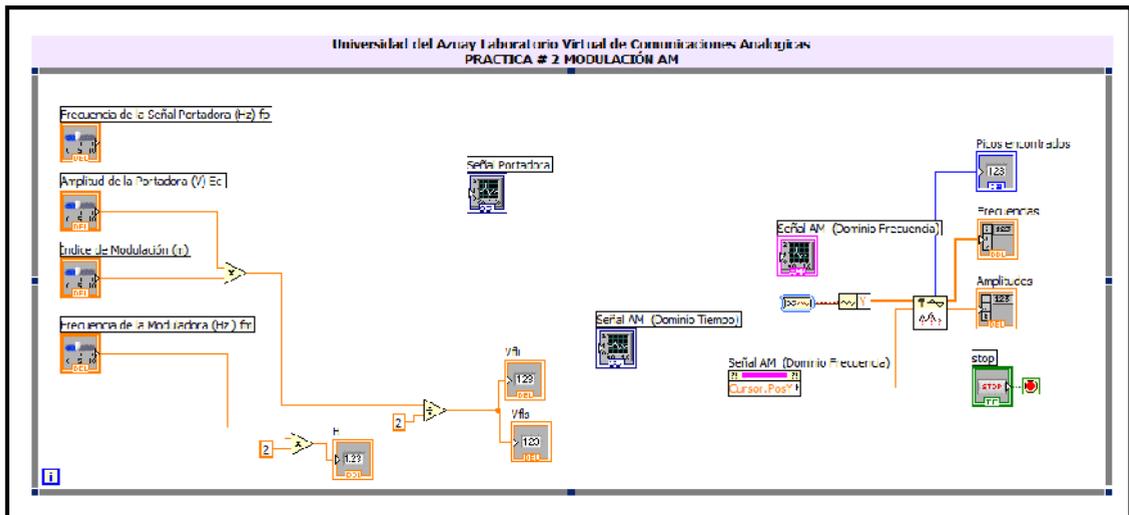


Figura.3.9. Diagrama de Bloques del ejercicio.

3. Basados en la fórmula de AM completaremos el instrumento virtual. Ubicando dos funciones expresas del tipo simular señal en el diagrama de bloques. Las cuales representaran la señal portadora y moduladora, estas señales serán del tipo senoidal, la frecuencia y amplitud de las mismas serán modificadas a través de los controles en el panel frontal estos elementos fueron explicados en los pasos anteriores. Ubicar la primera función expresa como muestra la Figura 3.10.

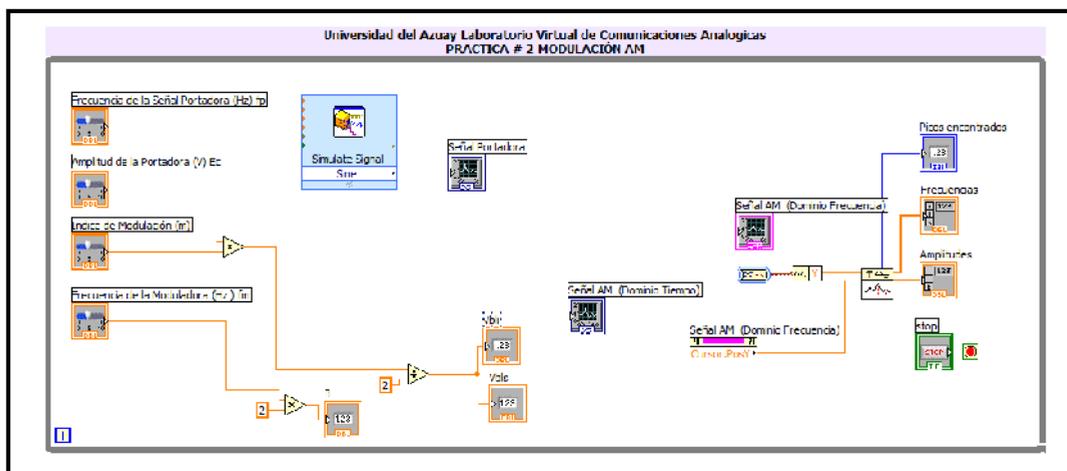


Figura. 3.10. Diagrama de Bloques del paso 3.

Al ubicar la función en el diagrama de bloques se desplegará la ventana de configuración la cual permitirá modificar los parámetros de la simulación con las siguientes características Figura 3.11

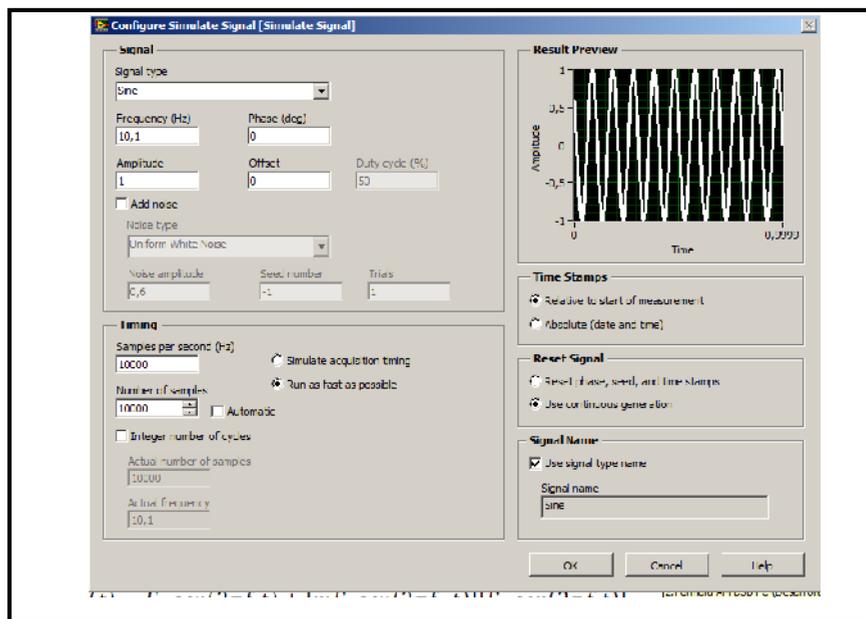


Figura. 3.11. Configuración de la función expresa simular señal.

4. Repetimos el paso anterior y ubicamos una nueva la función simular señal como indica la Figura 3.12.

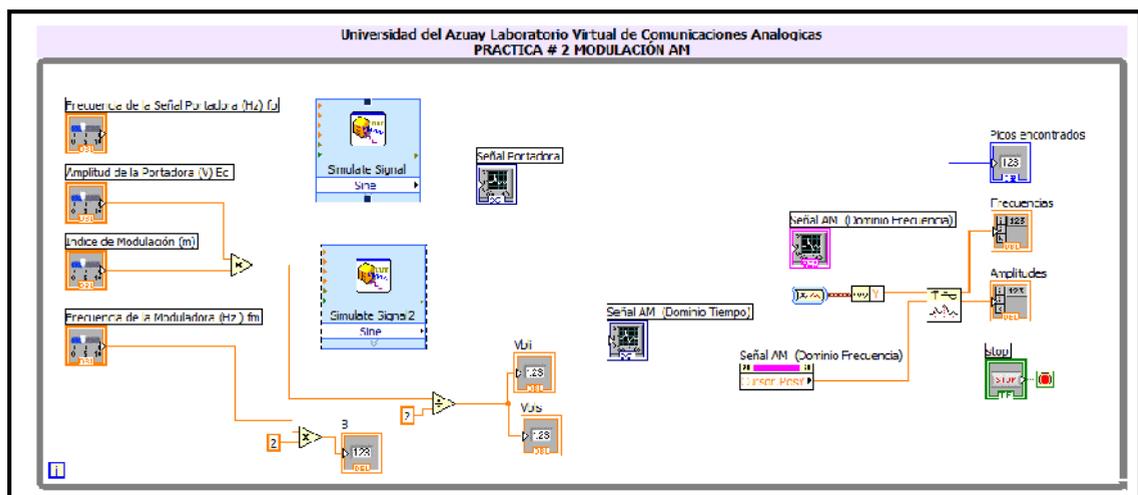


Figura. 3.12. Diagrama de Bloques paso 4.

5. Basados en la fórmula de AM DSB FC que a continuación se indica, analicemos lo realizado.

$$V_{AM}(t) = E_c \text{sen}(2\pi f_c t) + [mE_c \text{sen}(2\pi f_m t)][E_c \text{sen}(2\pi f_c t)]$$

Como indica la función matemática, la primera función simular señal representa una señal senoidal portadora y la segunda función representa la señal moduladora.

A continuación realizaremos las operaciones matemáticas necesarias para obtener el modulador de AM representado en la fórmula anterior.

6. Como se puede observar la función de AM no es más que la realización de algunas operaciones matemáticas de señales. La primera parte realizada fue ubicar las dos señales que intervienen en la modulación AM que son la señal portadora y moduladora, a continuación enlazaremos los controles que permitirán modificar los parámetros de estas señales.

7. Conectaremos el control de la frecuencia de la señal portadora en la entrada de función simular señal que tiene como etiqueta frecuencia. De la misma manera realizaremos esta tarea con el control de la amplitud de la portadora que lo conectaremos a la entrada de la función que tiene la etiqueta amplitud. Para finalizar conectaremos la salida de la función simular señal al indicador de forma de onda gráfico que tiene la etiqueta el nombre de Señal portadora la cual permitirá observar el comportamiento de esta en el dominio del tiempo.

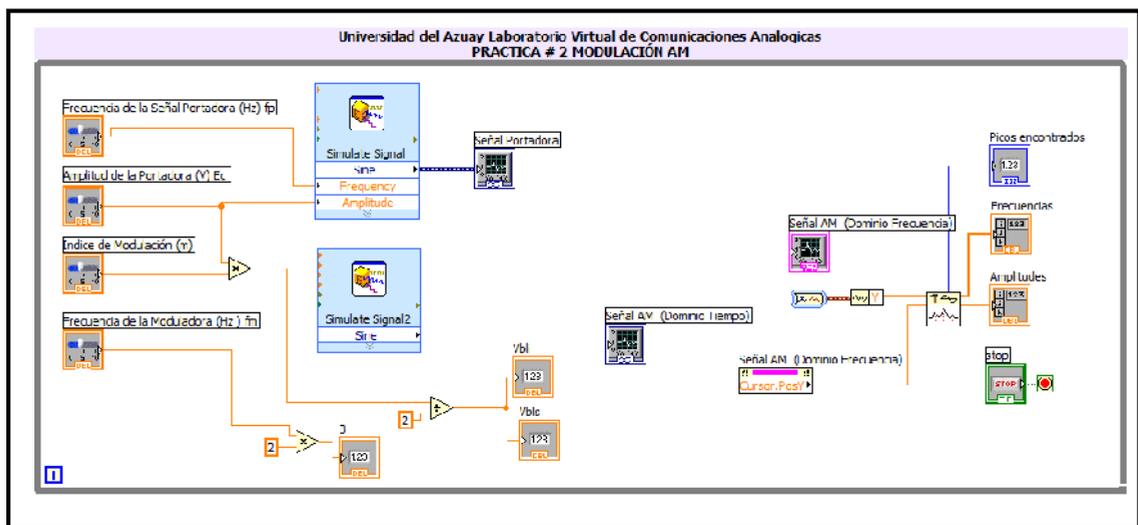


Figura. 3.13. Diagrama de Bloques paso 7.

8. Basados en la fórmula matemática a continuación realizaremos las conexiones en la “función expresa simular señal”, la cual representa la señal moduladora. Conectamos la entrada de amplitud de la “función simular señal de la moduladora” con la señal de la salida de la función de multiplicación de los controles índice de

modulación y amplitud de la portadora. Al culminar la tarea anterior procederemos a la conexión de la salida del control que posee la etiqueta frecuencia de la moduladora con entrada de frecuencia de la función simular señal. Ver Figura 3.14.

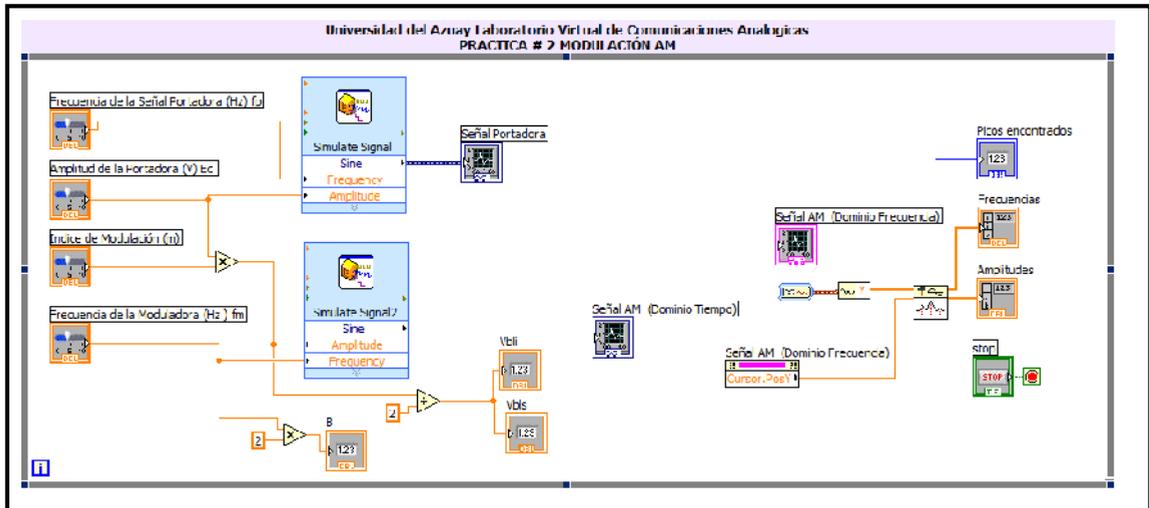


Figura. 3.14. Diagrama de Bloques paso 8.

9. Continuando con la construcción del modulador procederemos basados en la función matemática a realizar las operaciones con las señales y así obtener el simulador del modulador. Para obtener esto ubicaremos la función de multiplicación que procederá a realizar esta tarea entre las dos funciones expresas de simulación de señales. Ver Figura 3.15.

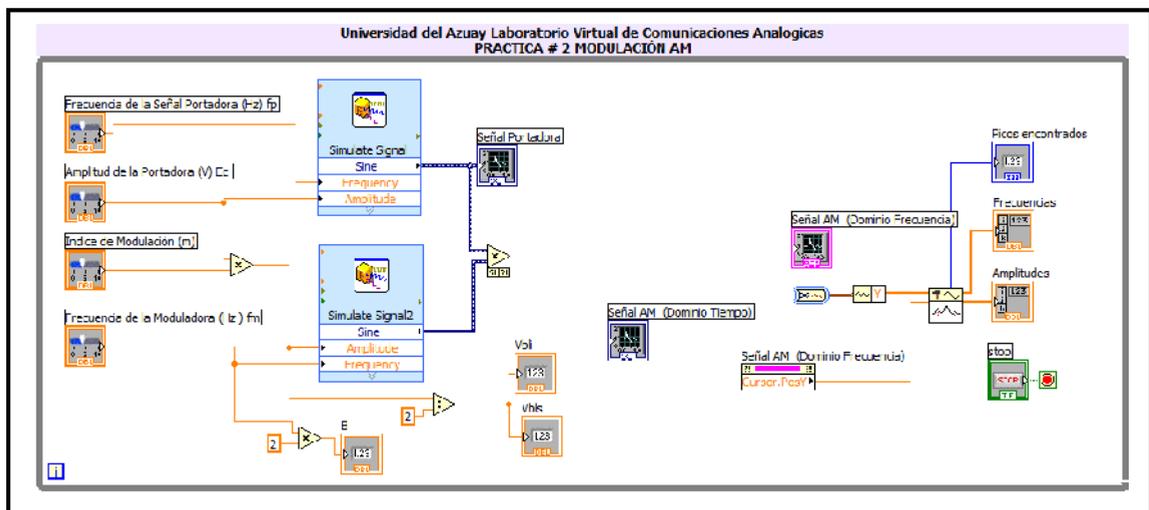


Figura. 3.15. Diagrama de Bloques paso 9.

10. Para culminar las operaciones de señales, procedemos a utilizar la función de suma para realizar la adición de la salida de la función de multiplicación con la salida de la función “simular señales” que representa la portadora. Después de realizar la operación anterior conectaremos la salida de la función de suma a un indicador de forma de onda que tiene como etiqueta Señal AM (Dominio del Tiempo), como su nombre lo indica permitirá ver el comportamiento de la señal AM en el dominio del tiempo. Ver Figura 3.16.

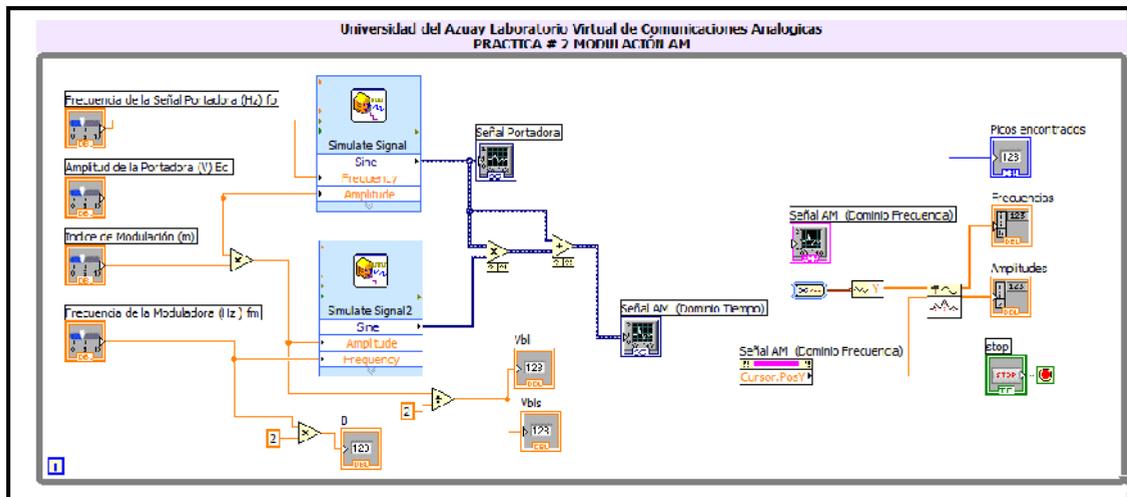


Figura. 3.16. Diagrama de Bloques paso 10.

11. Como se puede observar en la Figura 3.16, el diagrama de bloques representa la función matemática que describe un modulador de AM.

A continuación para poder observar el comportamiento de la señal de AM en el dominio de la frecuencia procederemos mediante la “función expresa” de medidas espectrales y arrastrar hacia el diagrama de bloques y así obtener el espectro de frecuencia. Esta función será configurada para obtener el espectro de magnitud pico de la señal de entrada, ver Figura 3.17.

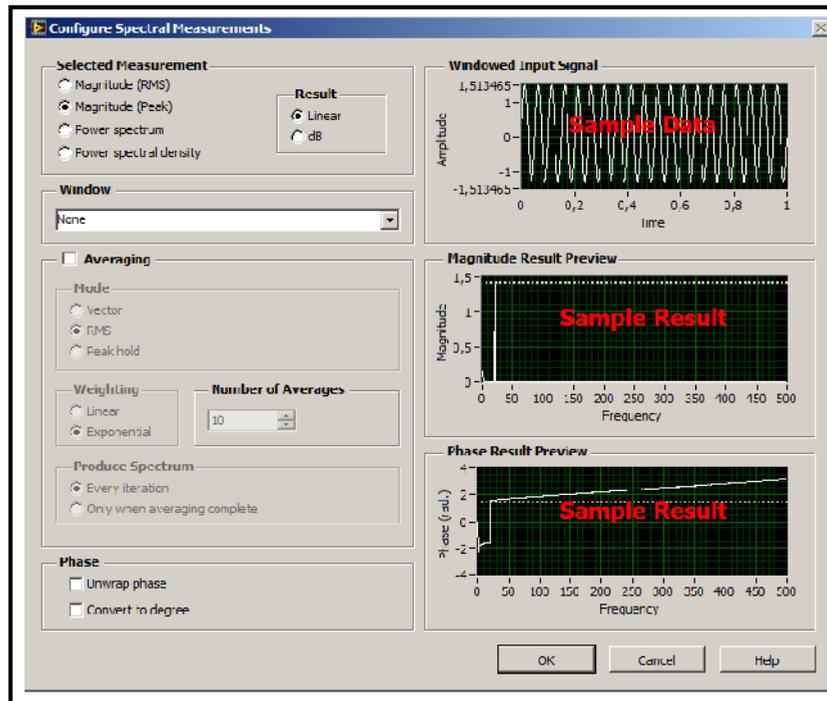


Figura. 3.17. Configuración de la Función de Medidas Espectrales.

Al terminar la configuración anterior, procedemos a conectar a la entrada de la función expresa la señal que deseamos observar en el dominio de la frecuencia en este caso la señal de AM. La salida de la función será conectada al indicador gráfico de onda que tiene como etiqueta Señal AM (Dominio de la frecuencia), además conectaremos mediante un cable a la entrada de la función de conversión de dato dinámico. Ver Figura 3.17.

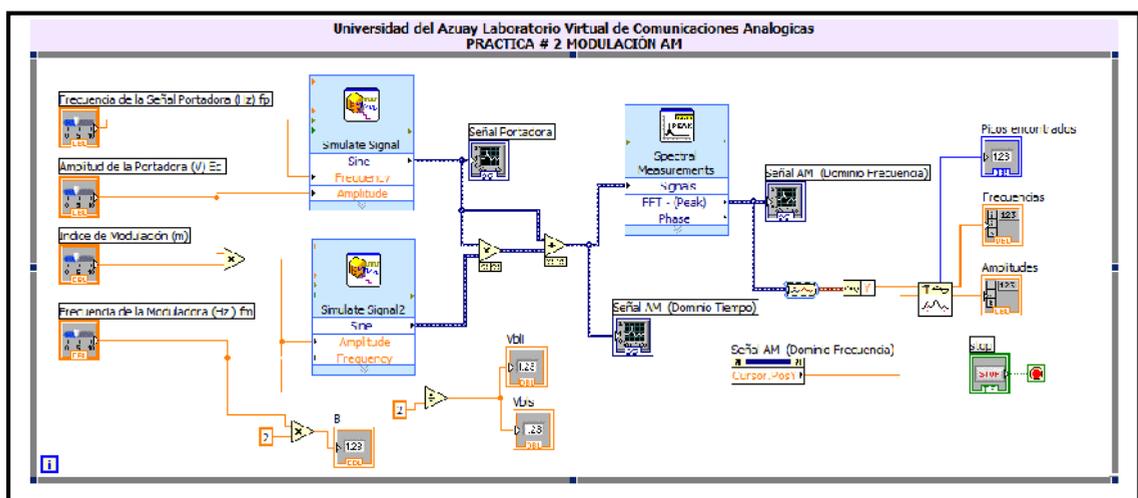


Figura. 3.18. Diagrama de Bloques paso 11.

3.5.1 Comprobación del Instrumento Virtual

Al culminar la programación del instrumento virtual el siguiente paso es comprobar el funcionamiento del mismo, para esto se seguirán los siguientes pasos:

1. Si no se presenta ningún error en la programación procedemos a ejecutar el VI pulsando el botón de correr en la barra de herramientas del panel frontal.

2. Al observar el panel frontal del VI se puede notar que tenemos la representación grafica de las siguientes señales:

- Señal Portadora en el dominio del tiempo.
- Señal Portadora modulada en el dominio del tiempo.
- Señal Portadora modulada en el dominio de la frecuencia.

Además poseemos los siguientes controles que nos permitirán modificar los valores de:

- Índice de modulación.
- Amplitud portadora.
- Frecuencia de la portadora.
- Frecuencia de la moduladora.

Para iniciar la comprobación modifiquemos los parámetros con los parámetros descritos en la siguiente tabla:

Control	Valor
Índice de modulación	0.5
Frecuencia de la portadora	200Hz
Amplitud Portadora	1 V
Frecuencia de la Moduladora	60Hz

Tabla 3.3 Valores Controles paso 2.

Con los valores anteriormente descritos deberíamos obtener las siguientes graficas:

a. Señal portadora con frecuencia de 200Hz y un periodo de 0.005 segundos
 Figura 3.18.

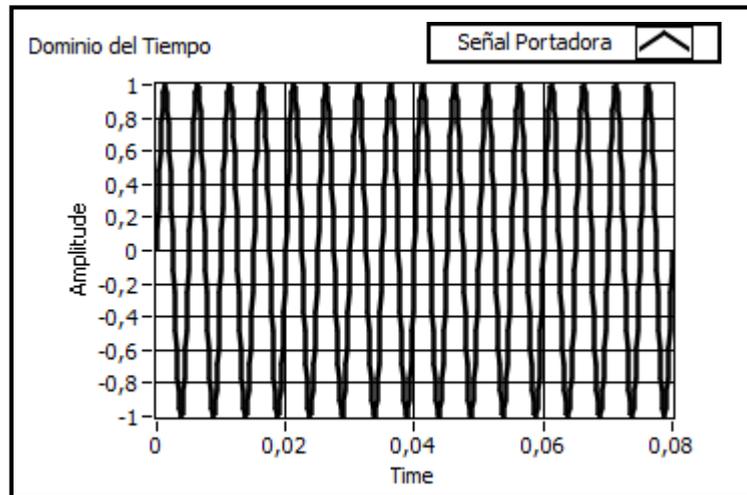


Figura. 3.19. Portadora de 200Hz.

b. Señal de una portadora modulada en amplitud con un porcentaje de modulación de 50% representación en el dominio del tiempo. Figura 3.19

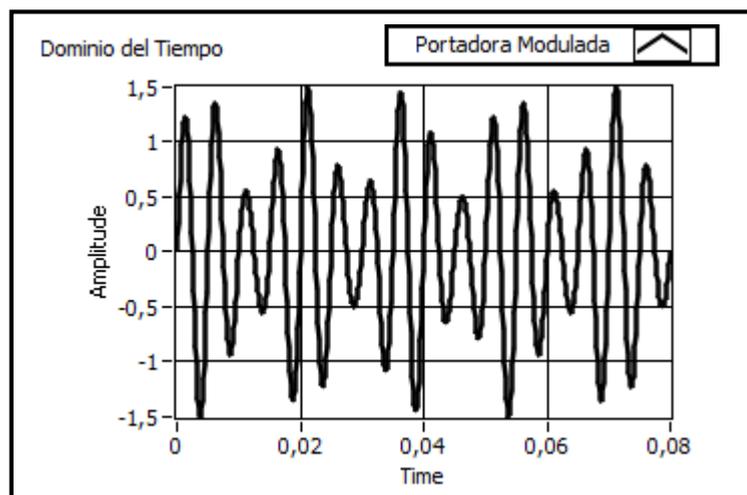


Figura. 3.20. Portadora modulada en amplitud índice de modulación 0.5.

Como se puede observar en la Figura 3.19 se nota el efecto en la amplitud de la portadora debido a la moduladora de baja frecuencia en este caso de 60Hz.

c. Señal de una portadora modulada en amplitud con un porcentaje de modulación de 50% representación en el dominio de la frecuencia. Figura 3.20.

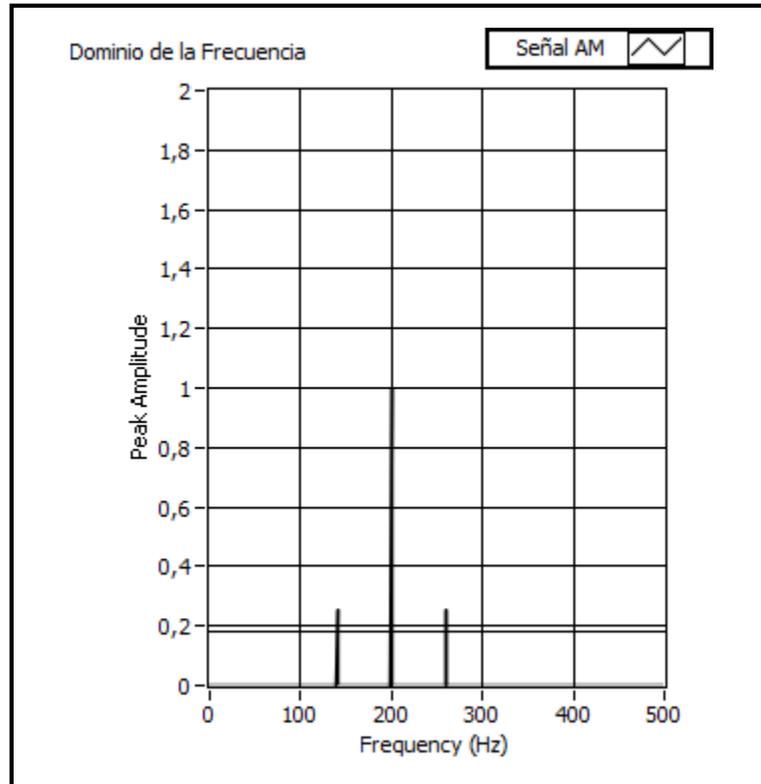


Figura. 3.21. Portadora modulada en amplitud índice de modulación 0.5.

En la Figura 3.20 se puede observar las componentes espectrales que son parte de la señal de AM. En la parte izquierda se observa la frecuencia lateral inferior, al centro la frecuencia de la portadora y en la parte derecha la frecuencia lateral superior que fueron revisadas en la parte teórica.

Para comprobar que la grafica sea la correcta utilizaremos las formulas ya estudiadas que indican:

La frecuencia lateral inferior será igual a:

$$(f_c - f_{m(MAX)})$$

Donde:

f_c = Frecuencia de la Portadora en este caso 200HZ.

$f_{m(MAX)}$ = Frecuencia de la moduladora en este caso 60Hz.

En donde obtenemos que la frecuencia lateral inferior es igual a 140HZ.

La frecuencia lateral superior será igual a:

$$(f_c + f_{m(MAX)})$$

Donde:

f_c = Frecuencia de la Portadora en este caso 200HZ.

$f_{m(MAX)}$ = Frecuencia de la moduladora en este caso 60Hz.

En donde obtenemos que la frecuencia lateral superior es igual a 260HZ.

Lo anterior puede ser comprado en la Figura 3.20, además el instrumento virtual posee un algoritmo de búsqueda de picos que permitirá obtener de manera precisa los valores de frecuencia y de valores de magnitud de las bandas laterales que posee la onda de AM. Ver Figura 3.21.

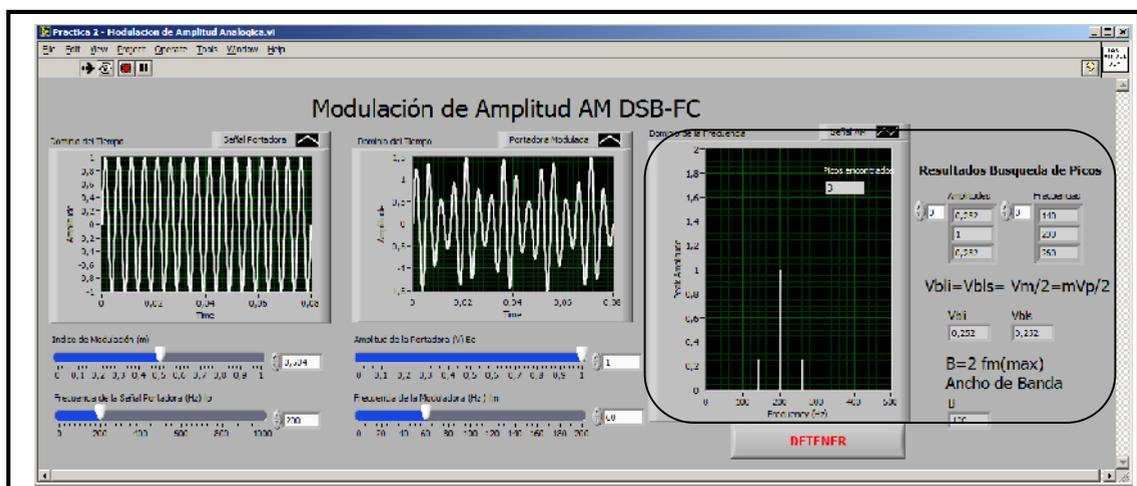


Figura. 3.22. Panel Frontal del Instrumento.

Para utilizar esta herramienta debemos ubicarnos sobre el grafico de la onda AM en el dominio de la frecuencia y utilizar el cursor del grafico que no es más que una

línea horizontal amarilla la cual representa el umbral en el cual se realizara la búsqueda de los picos; las componentes espectrales mayores a esta línea se mostraran en un indicador numérico que se encuentra en la parte superior derecha del grafico, el cual muestra el numero de picos encontrados. Estos picos encontrados tienen una frecuencia y amplitud respectiva la cual también se despliega en la parte superior derecha del instrumento virtual. Ver Figura 3.21

d. Para comprobar el ancho de banda de AM utilizaremos la formula ya estudiada que indica que:

$$B = 2f_{m(MAX)}$$

Donde:

f_m = frecuencia de la moduladora que en este caso es 60Hz.

El ancho de banda entonces será 120Hz el cual puede ser comprobado en el panel frontal del instrumento virtual o en la Figura 3.20.

d. Para observar el efecto de la sobre modulación podemos modificar el índice de modulación a un valor igual o mayor a 1 en el instrumento virtual. Figura 3.22

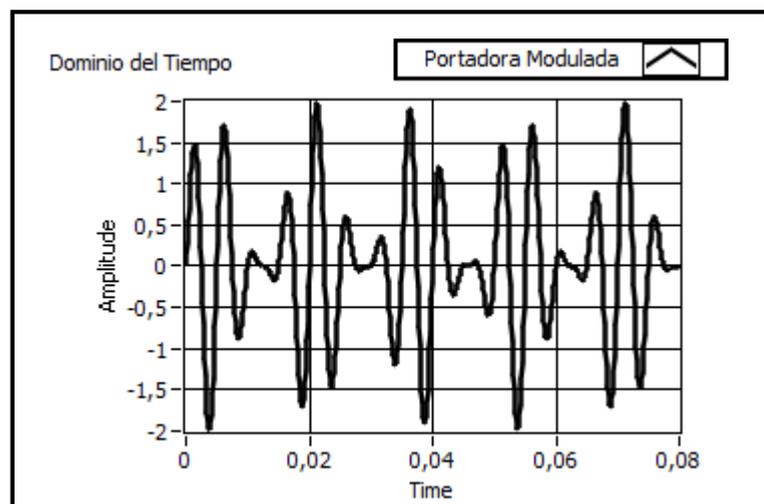


Figura. 3.23. Efecto de la sobre modulación en AM.

En la Figura 3.22 se puede observar el efecto de la sobre modulación de una portadora modulada en amplitud.

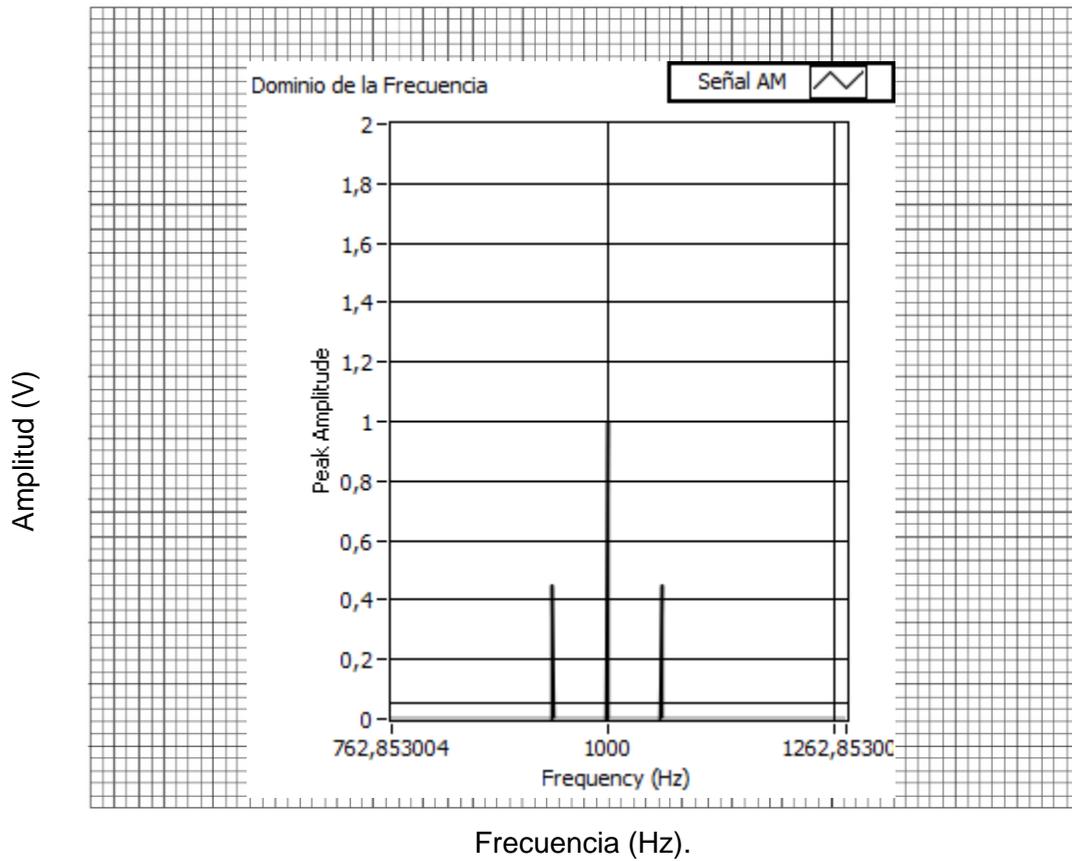
3.6 Ejercicios de Aplicación

1. Determinar basado en el modulador construido:
 - a. Las frecuencias de las bandas laterales superior e inferior.
 - b. Ancho de Banda.

Para los siguientes parámetros:

Frecuencia Portadora (fc)	Amplitud Portadora (Ec)	Frecuencia Moduladora (fm)	Índice Modulación (m)	Frecuencia Lateral Superior (fls)	Frecuencia Lateral Inferior (fls)	Ancho de Banda (B)
100Hz	1	60Hz	25%	140 Hz	260 Hz	120 Hz
200Hz	1	80Hz	50%	120 Hz	280 Hz	160 Hz
300Hz	1	20Hz	100%	180 Hz	220 Hz	40 Hz

- d. Trazar el espectro de frecuencias de salida con los parámetros de la frecuencia de la portadora a $f_c=10000\text{Hz}$ y la frecuencia de la moduladora $f_m=60\text{Hz}$ y índice de modulación del 90%.



3.7 Conclusiones:

AM es un esquema de modulación sencillo permitiendo realizar comunicaciones con implementaciones de hardware sencillos. Aunque la modulación AM introduce algunas operaciones ineficientes en los componentes de hardware, es susceptible al ruido de amplitud causado por los canales.

AM es uno de los esquemas de modulación más antiguos y es muy útil para transmisiones de radio.

PRACTICA 4

Tema: Modulación de Frecuencia de Señales Analógicas

4.1 Objetivos

- a. Repasar los conceptos básicos de la modulación frecuencia.
- b. Analizar el comportamiento del esquema de modulación en frecuencia en el dominio del tiempo y frecuencia.
- c. Analizar el comportamiento del esquema de modulación de fase en el dominio del tiempo y frecuencia.

4.2 Introducción

Una señal senoidal de onda continua (CW *Continuos wave*) puede alterarse cambiando su amplitud y su ángulo de fase.

$$m(t) = V_C \cos[\omega_c t + \theta(t)]$$

En modulación de amplitud se mantiene constante $\theta(t)$ y V_C varío proporcionalmente a la señal moduladora. Esto introdujo el concepto de modulación de amplitud. Ahora se investigará el caso que V_C constante y el ángulo de fase $\theta(t)$ varía en proporción a la señal moduladora. Esto introduce el concepto de modulación de ángulo.

4.3 Modulación Angular

La modulación angular se produce siempre que se varía el ángulo de fase $\theta(t)$, de una onda senoidal, con respecto al tiempo. Una onda con modulación angular se describe matemáticamente como sigue:

$$m(t) = V_C \cos[\omega_c t + \theta(t)]$$

En donde:

$m(t)$ = onda con modulación angular.

V_C = amplitud máxima de portadora (volts).

ω_c = frecuencia de la portadora en radianes, es decir, velocidad angular, $2\pi f_c$, en radianes por segundo.

$\theta(t)$ = desviación instantánea de fase (radianes).

Con la modulación angular es necesario que $\theta(t)$ sea una función predeterminada de la señal moduladora. Por siguiente, si $V_m(t)$ es la señal moduladora, la modulación angular se expresa como sigue:

$$\theta(t) = F[V_m(t)]$$

En donde:

$$V_m(t) = V_m \text{sen}(\omega_m t)$$

ω_m = velocidad angular de la señal moduladora ($2\pi f_m$ radianes por segundo).

f_m = frecuencia de la señal moduladora (hertz).

V_m = amplitud máxima de la señal moduladora (volts).

La diferencia entre modulación de frecuencia y modulación de fase es, en esencia, cuál propiedad de la portadora se hace variar en forma directa con la señal moduladora: la frecuencia o la fase, y cual se hace variar en forma indirecta, Siempre que se varía la frecuencia de una portadora también varia la fase, y viceversa. Por siguiente, la FM y la PM deben estar presentes al mismo tiempo siempre que se hace cualquier forma de modulación angular. Si la frecuencia de la portadora se hace variar directamente de acuerdo con la señal moduladora se obtiene la FM. Si se varia la fase de la portadora en forma directa por la señal moduladora, resulta la PM. Por siguiente, la FM directa es PM indirecta, y la PM directa es FM indirecta. Se pueden definir las modulaciones de frecuencia y fase como siguen:

- **Modulación directa de frecuencia (FM):** Variar la frecuencia de una portadora de amplitud constante en proporción directa a la amplitud de la señal moduladora, con una rapidez igual a la frecuencia de señal moduladora.

- **Modulación directa de fase (PM):** Variar la fase de una portadora de amplitud constante en proporción directa a la amplitud de la señal moduladora, con una rapidez igual a la frecuencia de la señal moduladora.

La Figura 4.1 muestra una señal con modulación angular, $[m(t)]$, en el dominio de la frecuencia. Se ve allí cómo la frecuencia f_c de la portadora cuando actúa sobre ella una señal moduladora $[V_m(t)]$. La magnitud y la dirección del desplazamiento de frecuencia, Δf es proporcional a la amplitud y la polaridad de la señal moduladora V_m , y la rapidez con la que se suceden los cambios de frecuencia es igual a la frecuencia f_m de la señal moduladora, Para este ejemplo una señal moduladora positiva produce un aumento de frecuencia, y la señal moduladora negativa produce una disminución de la frecuencia, aunque se podría tener la relación inversa, según el tipo de circuito modulador que se use.

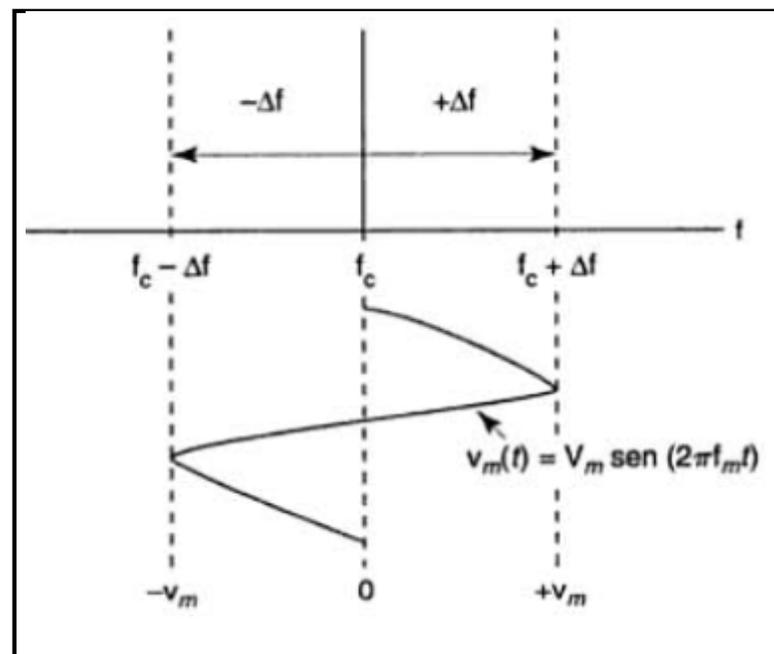


Figura 4.1. Onda con modulación angular en el dominio de la frecuencia.

(Fuente: TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.229)

La Figura 4.2 muestra la forma de onda, en el dominio de tiempo, de una portadora senoidal en la que hay modulación angular. Como se ve allí, la fase θ de la portadora cambia en forma proporcional a la amplitud $V_m(t)$, de la señal moduladora. El desplazamiento angular relativo de la fase de la portadora, en radianes con respecto a la fase de referencia, se llama desviación de fase, $\Delta\theta$. El cambio de fase de la portadora produce un cambio correspondiente de frecuencia.

El desplazamiento relativo de la frecuencia de la portadora, en hertz con respecto a su valor no modulado, se llama desviación de frecuencia, Δf . La magnitud de la desviación de frecuencia y fase es proporcional a la amplitud V_m de la señal moduladora, y la rapidez con que se efectúan los cambios es igual a la frecuencia f_m de la señal moduladora.

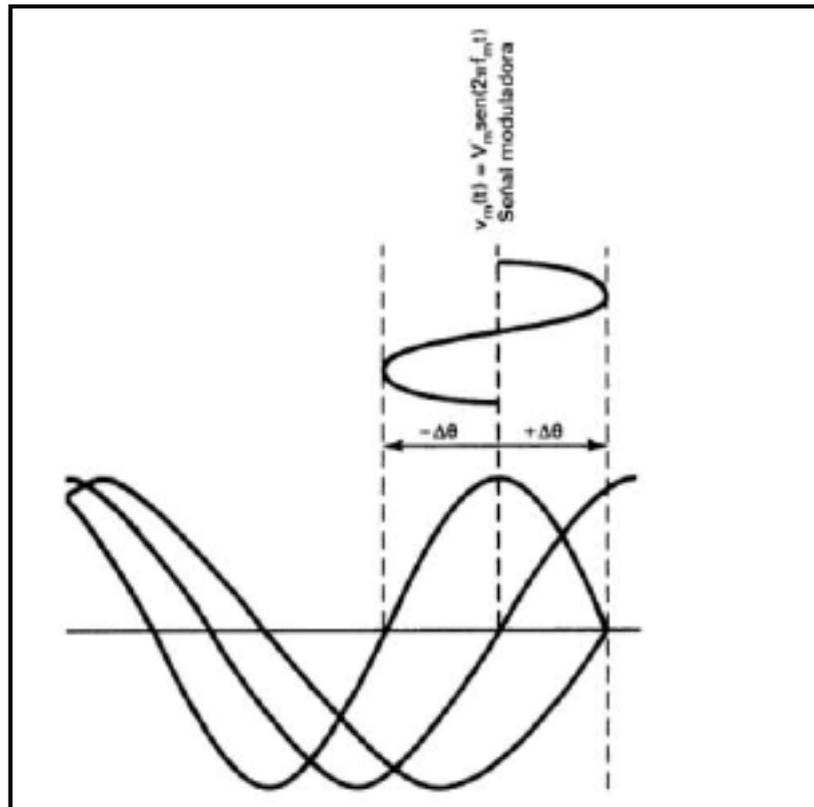


Figura 4.2. Cambio de fase a través del tiempo en la modulación de ángulo.
(Fuente: TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.230).

La Figura 4.3 muestra una portadora senoidal en la que la frecuencia moduladora f se cambia (se desvía) durante un periodo. La porción gruesa de la forma de onda corresponde al cambio de periodo Δt , pico a pico de la portadora. El periodo mínimo, T_{mim} , corresponde a la frecuencia máxima, $f_{máx}$, y el periodo máximo, $T_{máx}$, corresponde a la frecuencia mínima, f_{mim} . La desviación de frecuencia pico a pico de determina en forma sencilla, midiendo la diferencia entre las frecuencias máxima y mínima: $\Delta f_{p-p} = \frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T_{máx}}$.

Siempre que cambia el periodo T de una portadora senoidal, también cambian su frecuencia y su fase, y si los cambios son continuos ya no existe una sola frecuencia. Se demostrará que la forma de onda resultante de la modulación

angular abarca la frecuencia de la portadora original no modulada (que con frecuencia se llama frecuencia de portadora en reposo) y una cantidad infinita de pares de frecuencias laterales, desplazadas a cada lado de la portadora, un múltiplo entero de la frecuencia de la señal moduladora.

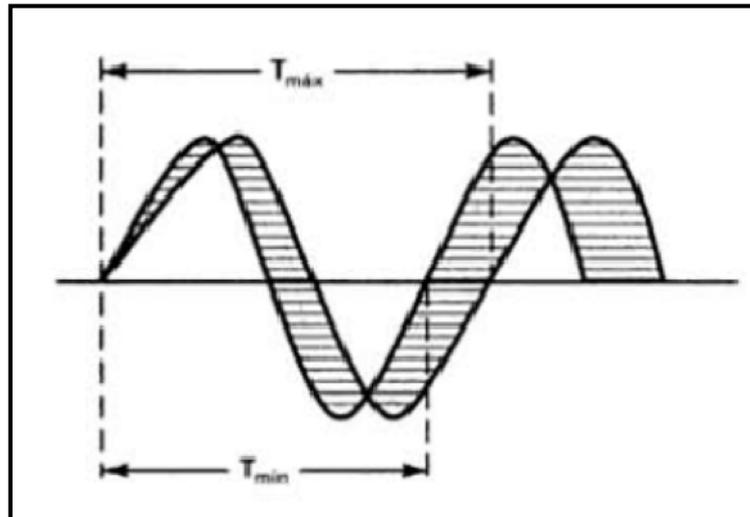


Figura 4.3. Cambio de frecuencia a través del tiempo en Modulación de ángulo.
(Fuente: TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.230).

4.3.1 Análisis matemático

La diferencia entre FM y PM se comprende con más facilidad si se definen los cuatro términos siguientes teniendo como referencia a la ecuación de la onda de modulación angular: desviación instantánea de fase, fase instantánea, desviación instantánea de frecuencia y frecuencia instantánea.

1. **Desviación instantánea de fase.** Es el cambio instantáneo de fase de la portadora, en determinado momento, e indica cuánto está cambiando la fase de la portadora con respecto a la fase de referencia. La desviación instantánea de fase se describe matemáticamente como sigue:

$$\text{Desviación instantánea de fase: } \theta(t) \text{ rad}$$

2. **Fase instantánea.** Es la fase precisa de la portadora en un momento dado, y se describe matemáticamente como sigue:

$$\text{Fase instantánea de fase: } \omega_c t + \theta(t) \text{ rad}$$

Donde:

$\omega_c t$ = fase de referencia de la portadora (radianes).

$= [2\pi(\text{rad/ciclo})][f_c(\text{ciclos/s})][t(\text{s})] = 2\pi f_c t(\text{rad})$

$\theta(t)$ = desviación instantánea de fase (radianes).

3. Desviación instantánea de frecuencia. Es el cambio instantáneo en la frecuencia de la portadora, y se define como la primera derivada de la desviación instantánea de fase con respecto al tiempo. Por siguiente, la desviación instantánea de fase es la primera integral de la desviación instantánea de frecuencia. En términos de la ecuación de desviación de fase, la desviación instantánea de frecuencia se expresa como sigue:

Desviación instantánea de frecuencia = $\theta'(t)$ rad/seg

$$= \frac{\theta'(t) \text{ rad/seg}}{2\pi \text{ rad/ciclo}} = \frac{\text{ciclos}}{\text{s}} = \text{HZ.}$$

4. Frecuencia instantánea. Es la frecuencia precisa de la portadora en determinado momento, y se define como la primera derivada de la fase instantánea respecto al tiempo. En términos de la ecuación de fase instantánea se expresa como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Frecuencia instantánea} &= \omega_i(t) = \frac{d}{dt} [\omega_c t + \theta(t)] \\ &= \omega_c + \theta'(t) \text{ rad/seg} \end{aligned}$$

Al sustituir ω_c por $2\pi f_c$ se obtienen:

Frecuencia instantánea $= f_i(t)$

Y

$$\omega_i = \left(2\pi \frac{\text{rad}}{\text{ciclo}}\right) \left(2\pi \frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}\right) + \theta'(t) = 2\pi f_c + \theta'(t) \text{ rad/seg.}$$

O sea

$$f_i(t) = \frac{2\pi f_c + \theta'(t) \text{ rad/seg}}{2\pi \text{ rad/ciclo}} = f_c + \frac{\theta'(t) \text{ ciclos}}{2\pi \text{ seg}} = f_c + \frac{\theta'(t)}{2\pi} \text{ Hz}$$

4.3.2 Sensibilidad a la desviación

Se puede definir la modulación de fase como modulación angular en la que la desviación instantánea de fase, $\theta(t)$, es proporcional a la amplitud del voltaje de la señal moduladora, y la desviación instantánea de frecuencia es proporcional a la pendiente, es decir a la primera derivada de la señal moduladora. En forma parecida, la modulación de frecuencia es la modulación angular en la que desviación instantánea de frecuencia $\theta'(t)$, es proporcional a la amplitud de la señal moduladora, y la desviación instantánea de fase es proporcional a la integral del voltaje de la señal moduladora.

Para una señal moduladora $V_m(t)$, la modulación de fase y la de frecuencia son:

$$\text{Modulación de fase} = \theta(t) = KV_m(t) \text{ rad.}$$

$$\text{Modulación de ángulo} = \theta'(t) = K_1V_m(t) \text{ rad/seg.}$$

Siendo K y K1 constantes, y son las sensibilidades a la desviación de los moduladores de fase y de frecuencia, respectivamente. Las sensibilidades a la desviación son las funciones de transferencia de salida en función de la entrada de los moduladores, que producen la relación entre que parámetro de salida cambia con respecto a los cambios especificados de la señal de entrada. Para un modulador de frecuencia, los cambios serían en la señal de salida con respecto a cambios en la amplitud de voltaje de entrada. Para un modulador de fase, los cambios serían en la fase de la frecuencia de salida con respecto a los cambios de amplitud del voltaje de entrada.

La sensibilidad a la desviación de un modulador de fase es:

$$K = \frac{\text{rad}}{V} \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta V} \right)$$

Y para un modulador de frecuencia es:

$$K_1 = \frac{\text{rad/s}}{V} \text{ o } \frac{\text{rad/s}}{V-s} \left(\frac{\Delta\omega}{\Delta V} \right)$$

La modulación de fase es la primera integral de la modulación de frecuencia. Por siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Modulación de fase} = \theta(t) &= \int \theta'(t) dt \\ &= \int K_1 V_m(t) dt \\ &= K_1 \int V_m(t) dt \end{aligned}$$

Por consiguiente, sustituyendo una señal moduladora $V_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$ en la ecuación se obtiene:

Para modulación de fase,

$$\begin{aligned} m(t) &= V_c \cos[\omega_c t + \theta(t)] \\ &= V_c \cos[\omega_c t + K V_m \cos(\omega_m t)] \end{aligned}$$

Para modulación de frecuencia,

$$\begin{aligned} m(t) &= V_c \cos \left[\omega_c t + \int \theta'(t) dt \right] \\ m(t) &= V_c \cos \left[\omega_c t + \int K_1 V_m(t) dt \right] \\ m(t) &= V_c \cos \left[\omega_c t + K_1 \int V_m \cos(\omega_m t) dt \right] \\ m(t) &= V_c \cos \left[\omega_c t + \frac{K_1 V_m}{\omega_m} \text{sen}(\omega_m t) \right] \end{aligned}$$

4.3.3 Formas de onda de FM y PM

La Figura 4.4 ilustra la modulación de frecuencia y de fase de una portadora senoidal, mediante una señal moduladora de frecuencia única. Se ve que las formas de onda FM y de PM son idénticas, a excepción de su relación temporal (fase). Así, es imposible distinguir una forma de onda de FM de una PM, sin conocer las características dinámicas de la señal moduladora. Con FM, la desviación máxima de frecuencia (cambio de frecuencia de la portadora) se efectúa durante los picos máximos positivos y negativos de la señal moduladora; es decir, la desviación de frecuencia es proporcional a la amplitud de la señal moduladora. Con la PM, la desviación máxima de frecuencia se efectúa durante los cruces de la señal moduladora por cero; es decir, la desviación de frecuencia es proporcional a

la pendiente de la primera derivada de la señal moduladora. Tanto para la modulación de fase como la de frecuencia, la rapidez con que cambia la frecuencia es igual a la frecuencia de la señal moduladora.

De igual modo, no se puede saber si la ecuación de modulación de ángulo representa una onda de FM o de PM. Podría ser cualquiera de las dos. Sin embargo, el conocimiento de la señal moduladora permite hacer la identificación correcta. Si $\theta(t)=K V_m(t)$, es modulación de fase, y si $\theta'(t)=K_f V_m(t)$ es modulación de frecuencia. En otras palabras, si la frecuencia instantánea es directamente proporcional a la amplitud de la señal moduladora, es modulación de frecuencia, y si la fase instantánea es directamente proporcional a la amplitud de la frecuencia moduladora, es modulación de fase.

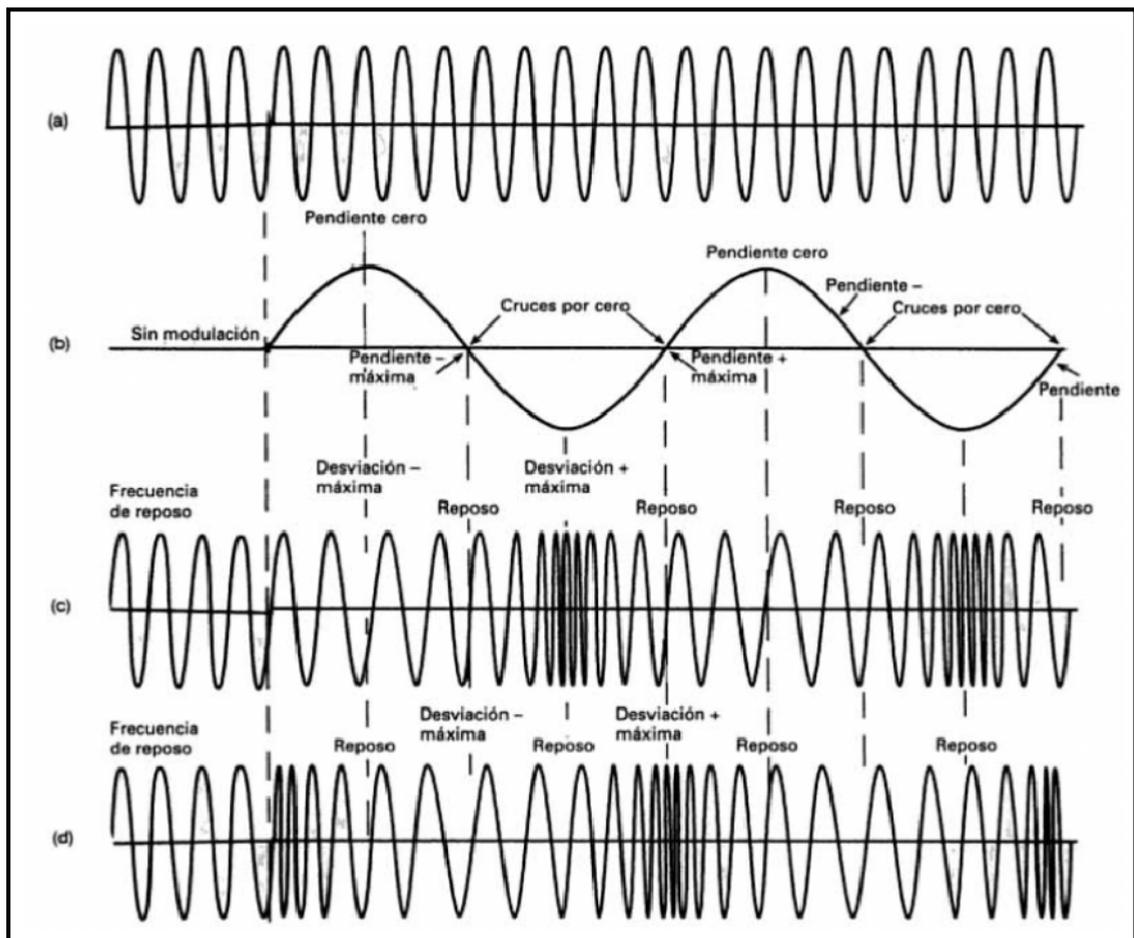


Figura 4.4. Modulación FM y PM. (a) Portadora no modulada. (b) señal moduladora. (c) onda con frecuencia modulada.(d) onda con fase modulada.

(Fuente: TOMASI, Sistema de Comunicaciones Analógicas, 2003, Pág.230).

4.3.4 Desviación de fase e índice de modulación.

La ecuación de portadora angular que se va a modular en fase o en frecuencia mediante una señal moduladora de frecuencia única, se puede escribir en forma general:

$$m(t) = V_c \cos[\omega_c t + m \cos(\omega_m t)]$$

En la que $m \cos(\omega_m t)$ es la desviación instantánea de fase, $\theta(t)$. Cuando la señal moduladora es una senoidal de frecuencia única, se ve, en la ecuación anterior, que el ángulo de fase de la portadora varía en forma senoidal sencilla respecto a su valor no modulado.

En la ecuación anterior, m representa la desviación máxima de fase, en radianes, de una portadora con fase modulada. Esta desviación máxima de fase se llama índice de modulación. Una diferencia primaria entre modulación de frecuencia y de fase es la forma en que se define el índice de modulación. Para PM, el índice de modulación es proporcional a la amplitud de la señal moduladora e independiente de su frecuencia. El índice de modulación de una portadora con fase modulada se define como sigue:

$$m = K V_m \text{ (radianes).}$$

En donde:

m = índice de modulación y desviación máxima de fase ($\Delta\theta$, *radianes*).

K = sensibilidad a la desviación (radianes por volt).

V_m = amplitud máxima de la señal moduladora (volts).

Y entonces,

$$m = K \left(\frac{\text{radianes}}{\text{volt}} \right) V_m \text{ (volts) = radianes.}$$

Por consiguiente, para PM, se puede escribir con la siguiente ecuación.

$$m(t) = V_c \cos[\omega_c t + K V_m \cos(\omega_m t)]$$

O bien:

$$m(t) = V_c \cos[\omega_c t + \Delta\theta \cos(\omega_m t)]$$

O también:

$$m(t) = V_c \cos[\omega_c t + m \cos(\omega_m t)]$$

Para una portadora con frecuencia modulada, el índice de modulación es directamente proporcional a la amplitud de la señal moduladora, e inversamente proporcional a la frecuencia de la señal moduladora. Así, el índice de modulación para FM es:

$$m = \frac{K_f V_m}{\omega_m} \text{ (adimensional).}$$

Donde:

m = Índice de modulación (adimensional).

K_f = Sensibilidad a la desviación (radianes por segundo por volt, o radianes por volt).

V_m = Amplitud máxima de la señal moduladora (volt).

ω_m = Frecuencia en radianes (radianes por segundo).

Por siguiente,

$$m = \frac{K_f \left(\frac{\text{radianes}}{\text{volt} \cdot \text{s}} \right) V_m (\text{volt})}{\omega_m \left(\frac{\text{radianes}}{\text{s}} \right)} = \text{(adimensional)}$$

Se puede ver que, según la ecuación del índice de modulación de fm, que es una relación adimensional para la FM, y solo se usa para describir la profundidad de modulación lograda en una señal moduladora con determinada amplitud máxima y frecuencia en radianes.

La sensibilidad a la desviación se puede expresar en hertz por volt, si se escribe la ecuación de índice de modulación de FM en una forma más práctica, como sigue:

$$m = \frac{K_f V_m}{f_m}$$

En donde:

m = índice de modulación (adimensional).

K_f = sensibilidad a la desviación (ciclos por segundo por volt o hertz por volt)

V_m = amplitud máxima de la señal moduladora (volt)

f_m = frecuencia de la señal moduladora (hertz).

Por lo anterior,

$$m = \frac{K_f \left(\frac{\text{hertz}}{\text{volt}} \right) V_m (\text{volt})}{f_m (\text{hertz})}$$

4.3.5 Desviación de Frecuencia.

La desviación de frecuencia es el cambio de frecuencia que sucede en la portadora cuando sobre ella actúa la frecuencia de la señal moduladora. Se expresa normalmente como un desplazamiento máximo de frecuencia, Δf , en hertz. La desviación de frecuencia pico a pico, $2 \Delta f$, se llama a veces variación de frecuencia.

Para una FM, la sensibilidad a la desviación se suele expresar en hertz por volt. Por consiguiente, la desviación máxima de frecuencia no es más que el producto de la sensibilidad a la desviación y el voltaje de la señal moduladora, y se expresa como sigue:

$$\Delta f = K_f V_m (\text{Hz}).$$

Se puede representar la ecuación de FM:

$$m(t) = V_c \cos \left[\omega_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \text{sen}(\omega_m t) \right]$$

O también:

$$m(t) = V_c \cos[\omega_c t + m \text{sen}(\omega_m t)]$$

4.3.6 Porcentaje de Modulación.

El porcentaje de modulación, o modulación porcentual, para una onda con modulación angular, se calcula en forma distinta que en la onda de amplitud modulada. Con la modulación angular, el porcentaje de modulación es tan sólo la relación de desviación de frecuencia producida realmente, entre la desviación

máxima de frecuencia permitida, expresada en forma porcentual. La ecuación correspondiente es:

$$\% \text{ de modulación} = \frac{\Delta f(\text{real})}{\Delta f(\text{max})} \times 100.$$

4.3.7 Análisis en frecuencia de las ondas con modulación angular.

Con la modulación angular, los componentes de frecuencia de la onda modulada tienen una relación mucho más compleja con los componentes de frecuencia de la señal moduladora que en el caso de la modulación de amplitud. En un modulador de frecuencia de fase, una señal moduladora de una sola frecuencia produce una cantidad infinita de pares de frecuencias laterales y por lo mismo, tiene un ancho de banda infinito. Cada frecuencia lateral está desplazada respecto a la portadora por un múltiplo entero de la frecuencia de la señal moduladora. Sin embargo, en general la mayoría de las frecuencias laterales tiene una amplitud insignificante, y se pueden ignorar.

4.3.7.1 Modulación mediante una senoidal de frecuencia única.

En el análisis de frecuencia de una onda con modulación angular por una senoidal de una sola frecuencia produce una desviación máxima de fase de m radianes, donde m es el índice de modulación.

$$m(t) = V_c \cos[\omega_c t + m \cos(\omega_m t)]$$

De acuerdo con la ecuación anterior, no son obvios los componentes individuales de frecuencia que forman la onda modulada. Sin embargo, existen identidades de funciones de Bessel que se aplican en forma directa. Una de esas identidades es:

$$\cos(\alpha + m \cos \beta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) \cos\left(\alpha + n\beta + \frac{n\pi}{2}\right)$$

La función $J_n(m)$ es la función de Bessel de primera clase de n -ésimo orden, con argumento m . Si se aplica la ecuación anterior en $m(t)$ en la forma:

$$m(t) = V_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) \cos\left(\omega_c t + n\omega_m t + \frac{n\pi}{2}\right)$$

Esta ecuación se desarrolla en los cuatro primeros términos, como sigue:

$$m(t) = V_c \left\{ J_0(m) \cos \omega_c t + J_1(m) \cos \left[(\omega_c + \omega_m)t + \frac{\pi}{2} \right] - J_1(m) \cos \left[(\omega_c - \omega_m)t - \frac{\pi}{2} \right] \right. \\ \left. + J_2(m) \cos [(\omega_c + 2\omega_m)t] + J_2(m) \cos [(\omega_c - 2\omega_m)t + J_n(m)] \right\}$$

En la que:

$m(t)$ = Onda con modulación angular.

m = Índice de modulación.

V_c = Amplitud máxima de la portadora no modulada.

$J_0(m)$ = componente de la portadora.

$J_1(m)$ = Primer conjunto de frecuencias laterales, desplazadas ω_m respecto a la portadora.

$J_2(m)$ = Segundo conjunto de frecuencias laterales, desplazadas $2\omega_m$ respecto a la portadora.

$J_n(m)$ = n-ésimo conjunto de frecuencias laterales, desplazadas $n\omega_m$ respecto a la portadora.

Las ecuaciones obtenidas muestran que en la modulación angular, una señal moduladora de una sola frecuencia produce una cantidad infinita de conjuntos de frecuencias laterales, cada una desplazado de la señal portadora en un múltiplo entero de la frecuencia de la señal moduladora. Un conjunto de banda lateral incluye una frecuencia lateral superior e inferior ($f_c \pm f_m, f_c \pm 2f_m, f_c \pm nf_m, etcétera$). Los conjuntos sucesivos de bandas laterales se llaman bandas; laterales de primer orden, bandas laterales de segundo orden, y así sucesivamente; sus magnitudes están determinadas por los coeficientes $J_1(m)$, $J_2(m)$, etcétera, respectivamente.

La Tabla 4.1 contiene las funciones de Bessel de primera clase para diversos valores del índice de modulación. En la tabla no solo se mencionan las frecuencias laterales significativas. Se considera que una frecuencia lateral es no significativa, a menos que su amplitud sea igual o mayor a 1% de la amplitud de la portadora no modulada. Se ve en la tabla que cuando aumentan, aumente la cantidad de

frecuencias laterales importantes o significativas. Por consiguiente, el ancho de banda de una onda con modulación angular es función del índice de modulación.

Índice de modulación	Pares laterales de frecuencia															
	Portadora	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}	J_{13}	J_{14}
0.00	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.25	0.98	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	0.94	0.24	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.4	0	0.52	0.43	0.20	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.5	-0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—
5.45	0	-0.34	-0.12	0.26	0.40	0.32	0.19	0.09	0.03	0.01	—	—	—	—	—	—
6.0	0.15	-0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—
7.0	0.30	0.00	-0.30	-0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—
8.0	0.17	0.23	-0.11	-0.29	-0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03	—	—	—	—
8.65	0	0.27	0.06	-0.24	-0.23	0.03	0.26	0.34	0.28	0.18	0.10	0.05	0.02	—	—	—
9.0	-0.09	0.25	0.14	-0.13	-0.27	-0.06	0.30	0.33	0.31	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—
10.0	-0.25	0.05	0.25	0.06	-0.22	-0.23	-0.01	0.22	0.32	0.29	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01	—

Tabla 4.1. Funciones de Bessel de primera Clase.
(Fuente: SANTA CRUZ , Comunicaciones , 2010, Pág.14).

4.3.8 Ancho de banda para ondas con modulación angular.

El ancho de banda de una onda de modulación angular es una función de la frecuencia de la señal moduladora y del índice de modulación En la modulación de ángulo se producen varios conjuntos de bandas laterales y, en consecuencia, el ancho de puede ser bastante mayor que el de una onda de amplitud modulada con la misma señal moduladora.

Para obtener el ancho de banda de los sistemas de modulación angular independientes del índice de modulación. Esta regla establece que el ancho de banda necesario para transmitir una onda on modulación angular, como igual a dos veces la suma de la desviación máxima de frecuencia por la frecuencia máxima de la seña moduladora. Es decir,

$$B = 2(\Delta f + f_m)Hz.$$

Donde:

Δf = desviación máxima de frecuencia (Hz).

f_m = frecuencia de la señal moduladora (Hz).

4.4 Desarrollo de la práctica de modulación de frecuencia con uso de LabVIEW.

Esta práctica introduce algunos de los conceptos aspectos de FM y examina la relación entre la portadora de frecuencia, desviación de FM y la señal modulada de FM.

1. Abrir y ejecutar el ejemplo Practica 4 – Modulación de Angular.vi. Examine el panel frontal y obsérvese los controles numéricos tipo slide horizontales para los parámetros que vamos a ajustar Figura 4.5.

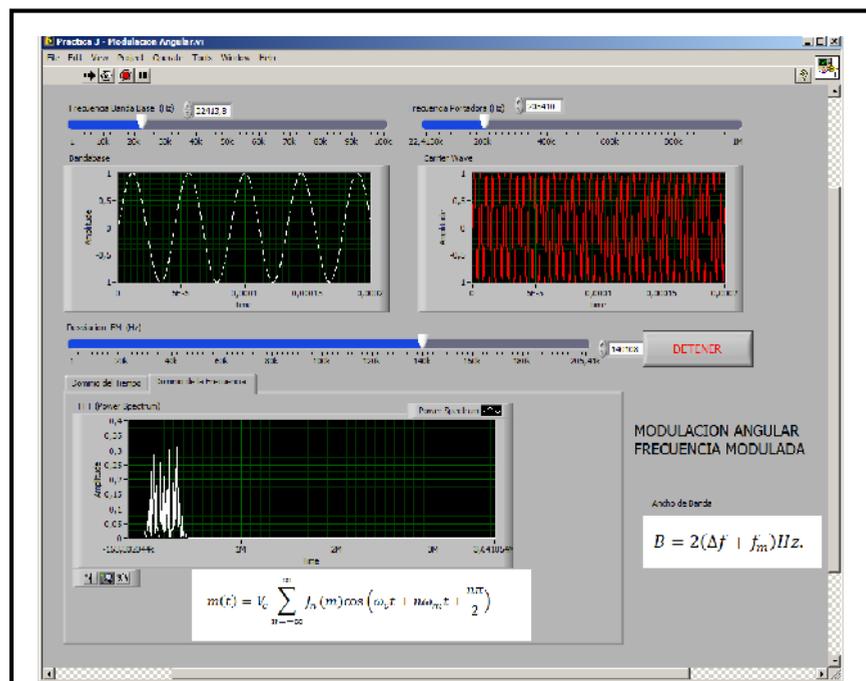


Figura 4.5 Panel Frontal del Ejercicio.

- a. Frecuencia Banda Base (Hz): Ajusta la frecuencia de la señal de mensaje a la deseada.
- b. Frecuencia Portadora (Hz): es la frecuencia la cual utilizaremos para transportar la señal de mensaje. Note que la simulación automáticamente actualiza el mínimo valor que uno puede configurar para la frecuencia de la portadora (Hz) dependiendo de la frecuencia de Banda Base configurada.

c. Desviación de FM (Hz). Determina la diferencia de frecuencia entre la más grande frecuencia instantánea de la señal modulada y la frecuencia de la portadora.

El máximo valor que se puede especifica para la desviación de FM (Hz) es automáticamente ajustado, para que nunca sea más grande que el valor que se escoja para la Frecuencia de la portadora (Hz).

2. Configuramos la Frecuencia Banda Base (Hz) y observemos el efecto sobre la gráfica de Forma de Onda Modulada FM que se despliega en la parte inferior. Este grafico indica en el dominio del tiempo (pestaña del dominio del tiempo), señal de mensaje (forma de onda color blanca) y portadora modulada FM (color rojo).

a. Configuramos los controles a los valores que se indican a continuación:

- Frecuencia Bandabase(Hz): 10k.
- Frecuencia Portadora (Hz): 200k
- Desviación FM (Hz): 100k.

Nótese que con los valores anteriormente configurados se pueden claramente distinguir (Figura 4.6) las secciones de frecuencia alta y bajas de la portadora FM modulada. Los componentes altos corresponden a las secciones de la forma de onda de mensaje con niveles positivos. Los componentes bajos corresponden a las secciones de la forma de onda de mensaje con niveles negativos.

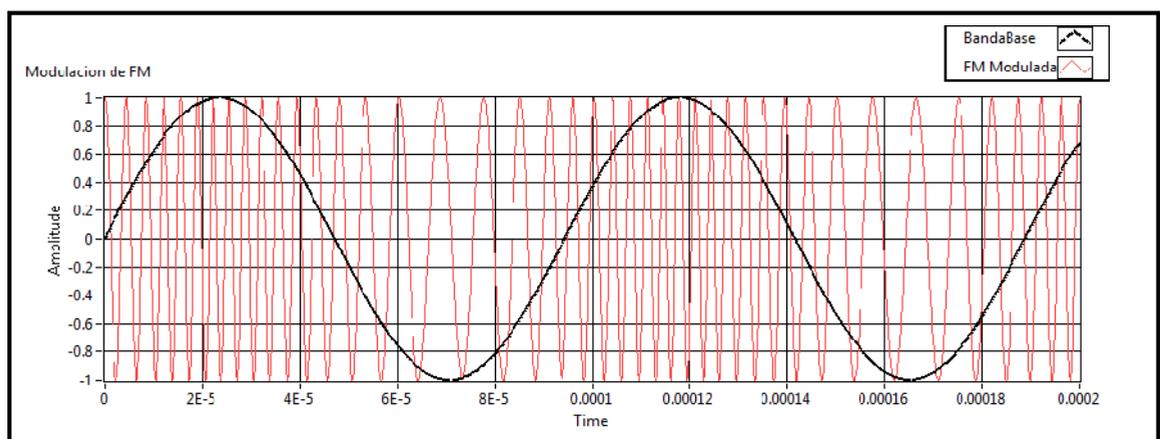


Figura 4.6. Señal FM (rojo) Señal Mensaje Bandabase (negro).

3. Ahora consideremos el efecto que la frecuencia de la portadora posee sobre la señal modulada en FM. A continuación indicaremos el escenario de la frecuencia de la portadora cuando la misma es igual a la frecuencia de la señal de mensaje.

Configuremos los controles con los valores a continuación indicados:

- Frecuencia Bandabase(Hz): 50k.
- Frecuencia Portadora (Hz): 50k
- Desviación FM (Hz): 10k.

Note que con esta configuración (Figura 4.7.), la señal de mensaje y la forma de onda modulada son muy similares con pequeñas diferencias, si ninguna distinción entre los componentes de frecuencia alta y bajas de la señal de FM. Como la imagen ilustra, las señales bandabase no pueden ser representadas en este escenario. Idealmente la frecuencia de la portadora debería ser sustancialmente grande que la frecuencia de la señal de mensaje en una frecuencia bandabase.

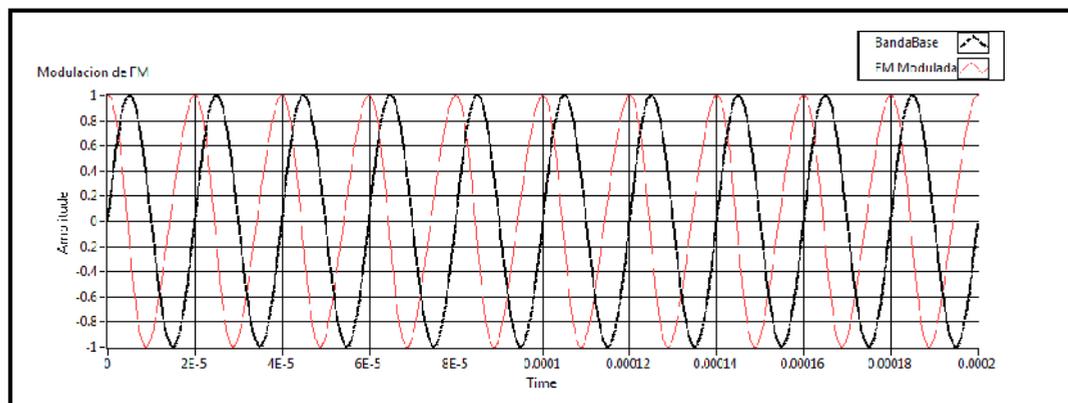


Figura 4.7. Señal FM y Señal Mensaje Bandabase con frecuencias similares.

4. A continuación se observara el efecto del índice de modulación sobre la señal de FM. Para realizar esto, ajuste la frecuencia de la portadora y la desviación de FM en 1Mhz y la frecuencia de bandabase en 20Khz.

Ahora se puede observar en la Figura 4.8 que la frecuencia resultante posee variaciones substanciales. De hecho como el grafico ilustra el nivel mínimo de la señal bandabase es representado en 0Hz.

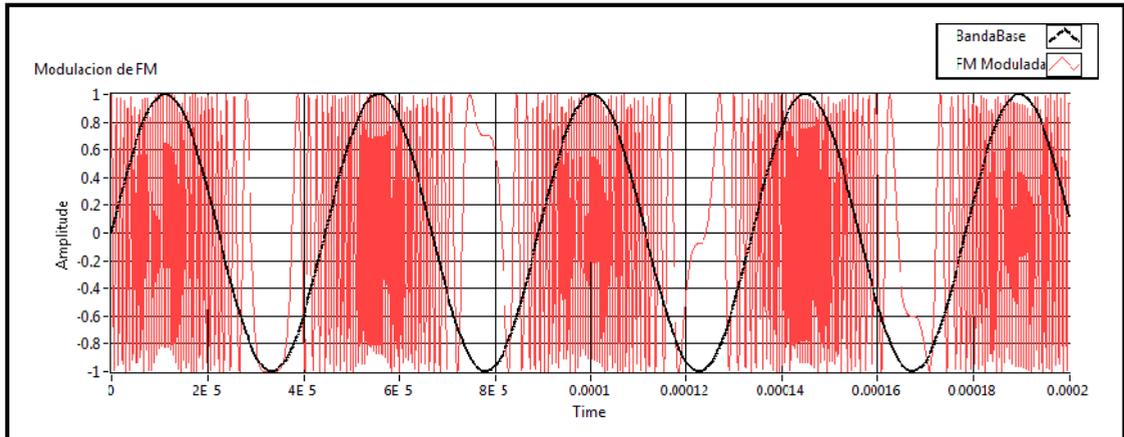


Figura 4.8. Señal FM y Señal Mensaje Bandabase con desviación de frecuencia máxima.

5. Mientras, la desviación de FM es grande y visualmente obvia, una desviación de FM pequeña no lo es. Para observar esto, configuraremos los controles de desviación de FM a 200Khz. Esto puede ser observado en la Figura 4.9, varios niveles de la señal bandabase puede ser representada por frecuencias en rangos desde 800hz a 1.2Mhz. Con esta configuración cambios en la desviación de frecuencia son menos obvios en el dominio del tiempo; Sin embargo esto es importante ser observado sus efectos sobre un sistema de comunicaciones. Idealmente un sistema de comunicaciones posee una desviación de frecuencia máxima para mayor precisión en la representación de la señal bandabase. Sin embargo esto no es una ventaja, porque al incrementar la desviación de frecuencia, se incrementa la potencia requerida para generar la señal y el ancho de banda que está ocupada.

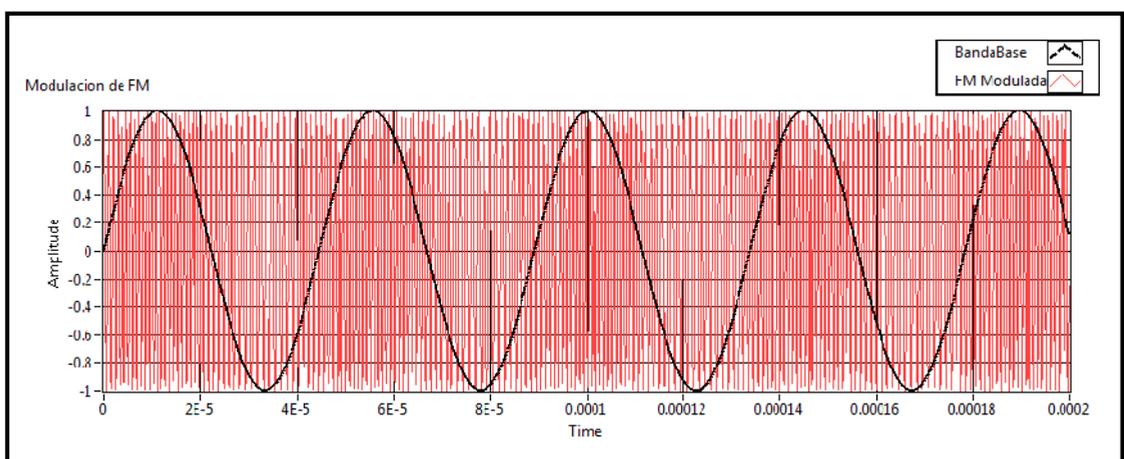


Figura 4.9. Señal FM y Señal Mensaje Bandabase con desviación de frecuencia mínima.

6. Para observar la señal de FM en el dominio de la frecuencia podemos dar click sobre la pestaña Dominio de la Frecuencia y observamos la representación de la

señal modulada. Se puede configurar la desviación de frecuencia para observar el comportamiento de la señal modulada ya que en una desviación alta el canal ocupa un ancho de banda alto.

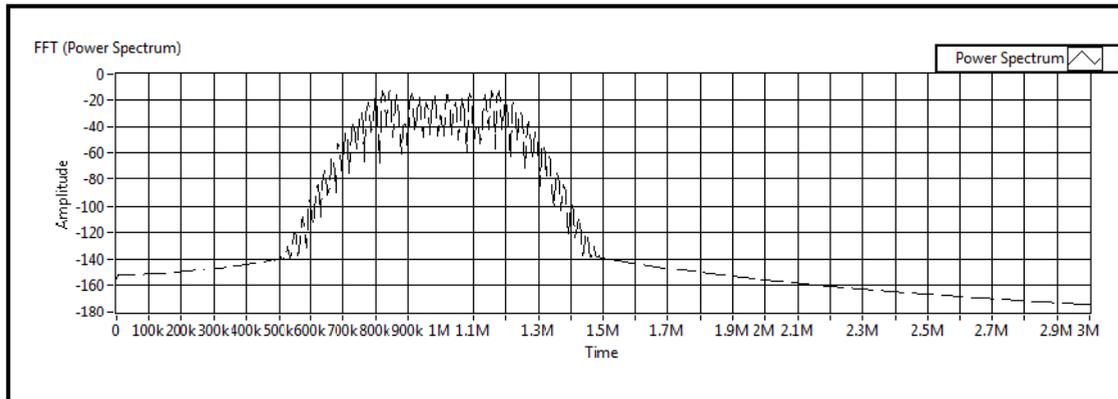


Figura 4.10. Espectro de Potencia Señal FM.

7. Para comprobar el comportamiento del modulador en el dominio de la frecuencia basados en la fórmula matemática y la tabla de Bessel observaremos y comprobaremos que las componentes de frecuencia que posee este tipo de señal sean los correctos.

Para observar que las componentes de frecuencia de la señal sean las correctas realizaremos los siguientes pasos.

a. Basados en la Tabla 4.1 de las funciones de Bessel seleccionaremos un índice de modulación a conveniencia para poder tener un valor aproximado de las componentes de frecuencia de la señal de FM.

Si el índice de modulación de FM es igual a:

$$m = \frac{\Delta f}{f_m}$$

Donde:

Δf = Desviación de Frecuencia Hz.

f_m = Frecuencia de la moduladora en Hz.

Calculemos un índice de modulación igual a 1, para ello hacemos Δf y f_m son iguales.

En el panel frontal modifiquemos los controles de:

Desviación de FM = 75 KHz.

Frecuencia de la Moduladora = 75 KHz.

Frecuencia Portadora = 400 KHz.

Con los valores anteriores nos aseguramos de obtener un índice de modulación igual a 1.

b. Basados en la Tabla 4.1 y la Figura 4.10 comprobaremos que las componentes de frecuencia que observamos en el instrumento virtual sean las correctas.

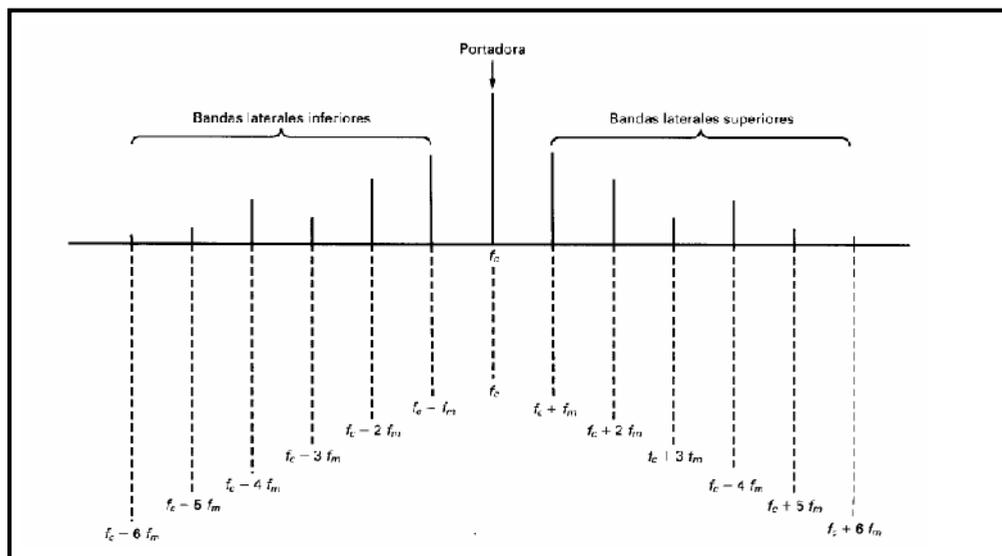


Figura 4.11. Espectro de Frecuencias de una señal FM.
(Fuente: SANTA CRUZ , Comunicaciones , 2010, Pág.16).

Según la Tabla 4.1 debemos poseer las siguientes componentes de frecuencia.

Descripción	Frecuencia	Amplitud	Lectura VI.
Portadora	400KHz	$J_0=0.77$	0.75
Banda Lateral Inferior 1 = $f_c - f_m$	325KHz	$J_1=0.44$	0.43
Banda Lateral Superior 1 = $f_c + f_m$	475KHz	$J_1=0.44$	0.43
Banda Lateral Inferior 2 = $f_c - 2f_m$	250KHz	$J_1=0.11$	0.11
Banda Lateral Superior 2 = $f_c + 2f_m$	550KHz	$J_1=0.11$	0.11

$f_c + 2f_m$			
Banda Lateral Inferior 3 = $f_c - 3f_m$	175KHz	$J_1=0.02$	0.02
Banda Lateral Superior 3 = $f_c + 3f_m$	625KHz	$J_1=0.02$	0.02

Tabla 4.2. Componentes de frecuencias de FM

Con las herramientas de búsqueda de picos que posee el instrumento virtual, podemos comprobar si existen estas componentes. Figura 4.11

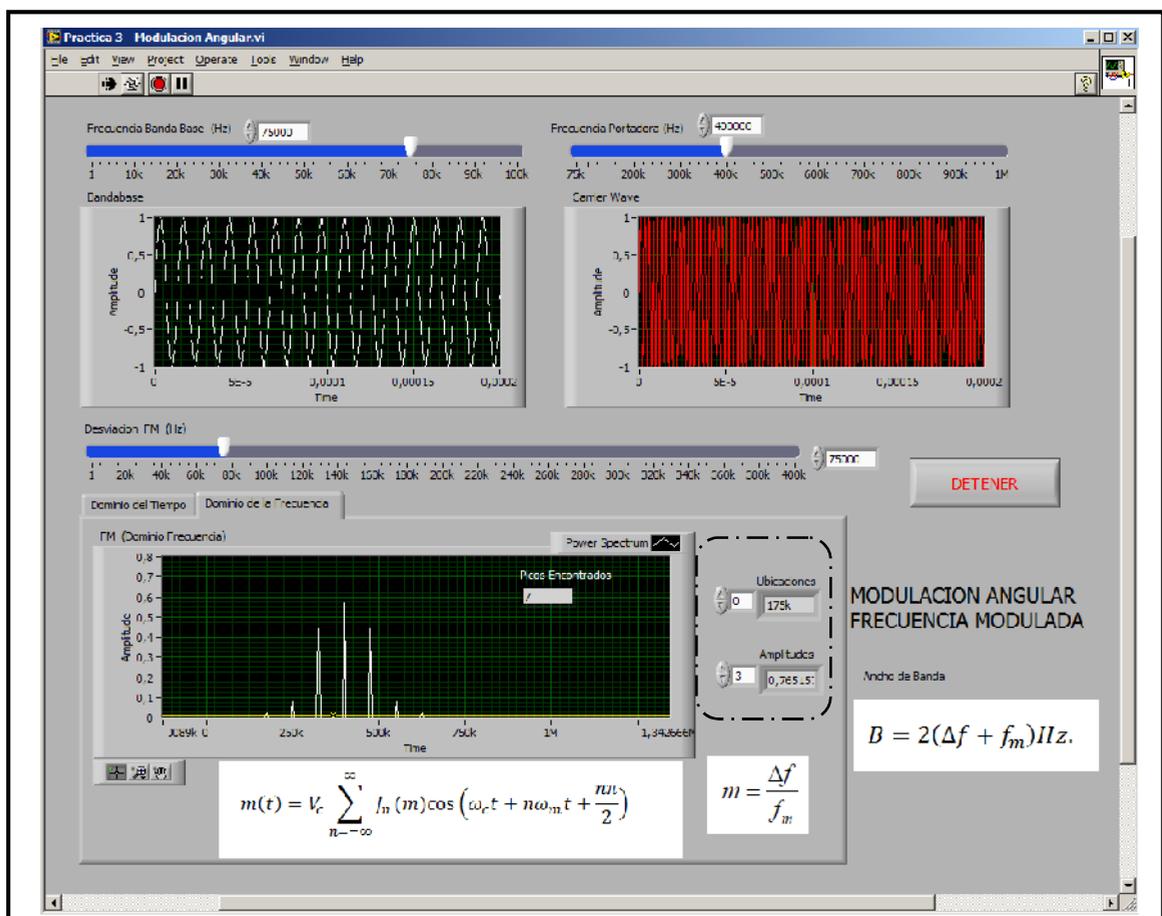


Figura 4.12. Panel Frontal paso b.

Como se puede observar en la Figura 4.11, ubicando el cursor del grafico como umbral a todos los picos que se observan el grafico obtenemos el resultado esperado. Ver Figura 4.12.

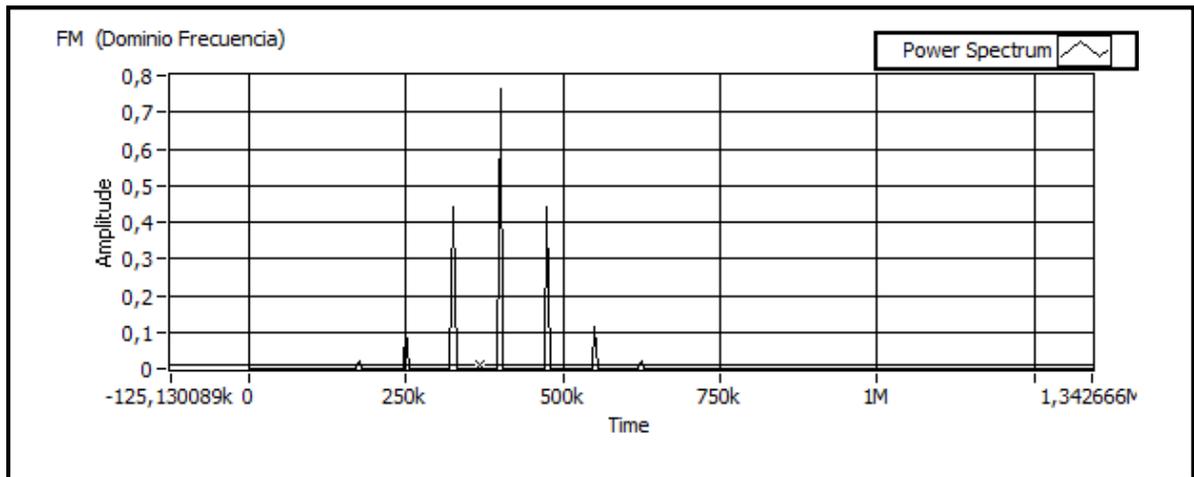


Figura 4.13. Resultado del paso b.

4.5 Ejercicio de Aplicación

Para el Modulador del ejemplo configurar el mismo para obtener un índice de modulación $m=1$, y determinar los siguientes valores:

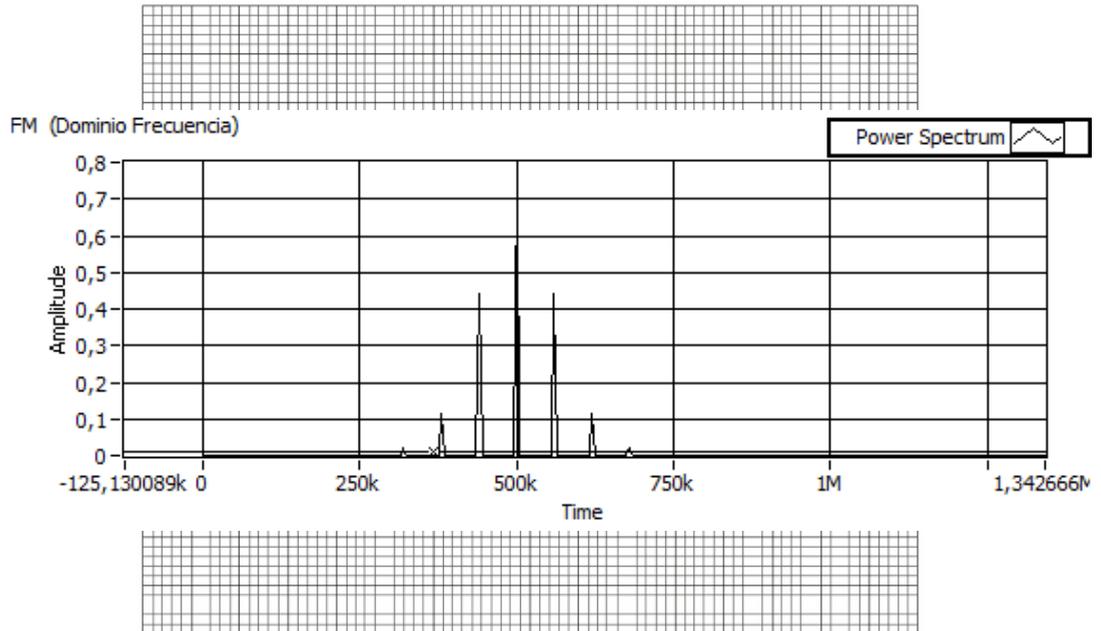
- Conjunto de frecuencias laterales significativas.
- Sus amplitudes
- Trazar el espectro de frecuencias, mostrando las amplitudes relativas.
- Obtener el ancho de banda con la ley de Carson.

Frecuencia Banda Base	Frecuencia Portadora	Δf
60KHz	500KHz	60KHz

Descripción	Frecuencia	Amplitud	Lectura VI
Portadora	500KHz	$J_0=0.77$	0.76
Banda Lateral Inferior 1 = $f_c - f_m$	440KHz	$J_1=0.44$	0.43
Banda Lateral Superior 1 = $f_c + f_m$	560KHz	$J_1=0.44$	0.43
Banda Lateral Inferior 2 = $f_c - 2f_m$	380KHz	$J_1=0.11$	0.11
Banda Lateral Superior 2 = $f_c + 2f_m$	620KHz	$J_1=0.11$	0.11

Banda Lateral Inferior 3 = $f_c - 3f_m$	320KHz	$J_1=0.02$	0.02
Banda Lateral Superior 3 = $f_c + 3f_m$	680KHz	$J_1=0.02$	0.02

c.



d.

Ancho de Banda	240KHZ
----------------	--------

4.6 Conclusiones:

FM es ampliamente usada en sistemas de comunicación prácticos. El simple diseño de receptor y el alto nivel de tolerancia al ruido de los sistemas FM hacen que sean una gran elección para muchas aplicaciones incluyendo radio de alta fidelidad y trasmisiones de televisión.

CAPÍTULO 3:

Comunicaciones Digitales.

PRACTICA 5

Tema: Teorema del Muestreo de Señales Analógicas

5.1 Objetivos

- a. Introducir los conceptos básicos de las comunicaciones Digitales.
- b. Observar los efectos del muestreo de una señal analógica en el dominio del tiempo como de la frecuencia.
- c. Comprender el Aliasing y su efecto en el muestreo de señales analógicas.

5.2 Introducción

Una operación que es básica para diseñar todos los sistemas de modulación de pulsos es el proceso de muestreo, donde una señal analógica se convierte en una secuencia de números que normalmente están uniformemente espaciados en el tiempo. Para que dicho proceso tenga utilidad práctica es necesario elegir la tasa de muestreo adecuada, de modo que esa secuencia de números identifique de forma única a la señal analógica original. Esta es la esencia del teorema de muestreo.

5.3 Muestreo Natural (por compuerta)

Si una señal continua, $S(t)$, tiene una banda de frecuencia tal que f_m sea la mayor frecuencia comprendida dentro de dicha banda, dicha señal podrá reconstruirse sin distorsión a partir de muestras de la señal tomadas a una frecuencia f_s siendo:

$$f_s > 2 f_m.$$

En la Figura 5.1 se muestra un esquema simplificado del proceso de muestreo.

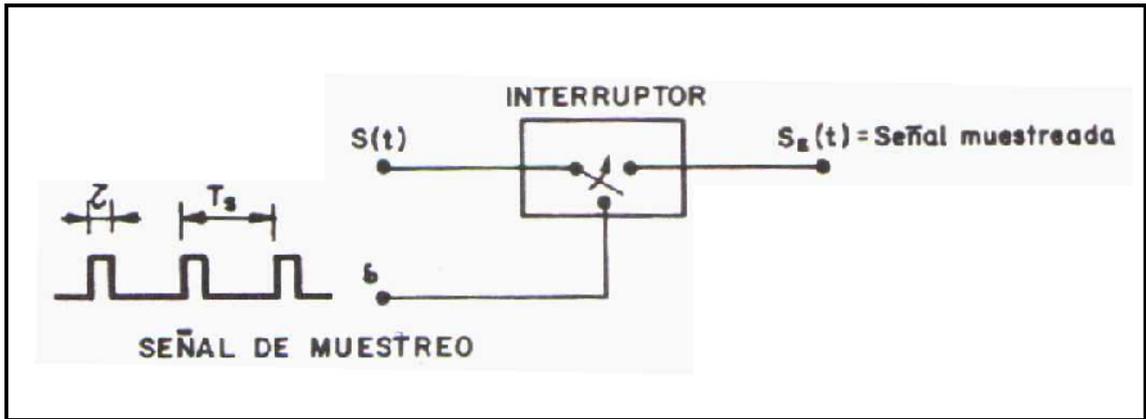


Figura 5.1. Esquema simplificado de un sistema de muestreo.
 (Fuente: STREMLER, Sistema de Comunicaciones, 1995, Pág.352).

El interruptor no es del tipo mecánico, puesto que frecuencia f_s de trabajo es elevada. Suelen emplearse transistores de efecto de campo como interruptores, para cumplir los requerimientos que se le exigen.

En la Figura 5.2 se ofrece las formas de las tres señales principales utilizadas en el muestreo de una señal analógica:

- $S(t)$ = señal a muestrear .
- d = señal muestreadora.
- $S_d(t)$ = señal muestreada.

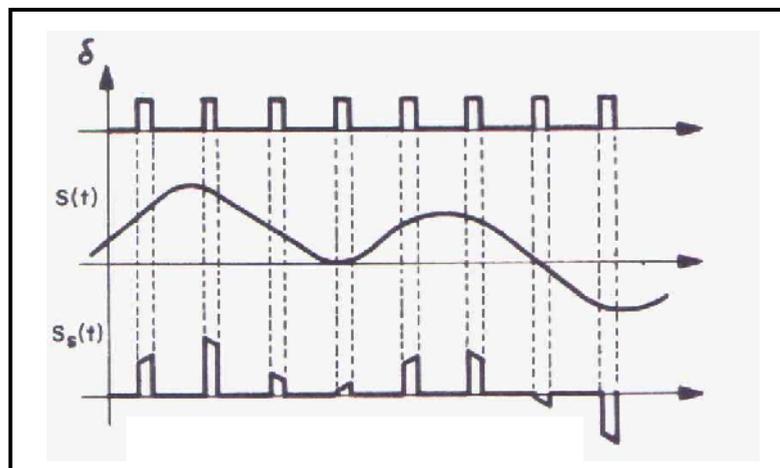


Figura 5.2. Señales utilizadas en el sistema de muestreo.
 (Fuente: STREMLER, Sistema de Comunicaciones, 1995, Pág.353).

5.4 El Solapamiento o Aliasing

En procesamiento de señales, el aliasing es el efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se les muestrea digitalmente. Cuando esto sucede, la señal original no puede ser reconstruida de forma unívoca a partir de la señal digital. Una imagen limitada en banda y muestreada por debajo de su frecuencia de Nyquist en las direcciones "x" e "y", resulta en una superposición de las replicaciones periódicas del espectro $G(f_x, f_y)$. Este fenómeno de superposición periódica sucesiva es lo que se conoce como aliasing o Efecto Nyquist.

El aliasing es un motivo de preocupación mayor en lo que concierne a la conversión analógica-digital de señales de audio y vídeo: el muestreo incorrecto de señales analógicas puede provocar que señales de alta frecuencia presenten dicho aliasing con respecto a señales de baja frecuencia. El aliasing es también una preocupación en el área de la computación gráfica e infografía, donde puede dar origen a patrones de moiré (en las imágenes con muchos detalles finos) y también a bordes dentados. El aliasing nos puede traer problemas sobre todo en el campo de visión por computadores, ya que al procesar imágenes, si no es correcta la imagen obtenida con la realidad, podemos tener problemas con el software.

Un ejemplo de aliasing puede ser observado en películas antiguas, especialmente cuando observamos ruedas de coches, ocasionalmente parece que las ruedas están girando al sentido contrario. Este fenómeno es ocasionado por la tasa de muestras de la cámara ya que esta se acerca a la tasa de giro de la rueda. Estas cámaras operan a 30 marcos por segundo.

El teorema de Nyquist establece que se necesita dos muestras por ciclo de la señal de entrada para definir esta. Por lo tanto se puede medir con precisión la frecuencia de una señal de frecuencia f , siempre y cuando las tomas de las muestras sean mayores de $2f$. Entonces si se trata de medir la frecuencia de la señal obtenida con una frecuencia de muestreo menor a la frecuencia de $2f$, se obtendrá aliasing de la señal o falsas imágenes de la señal con frecuencias cercanas a f . Estas frecuencias falsas aparecen como imágenes espejos de la frecuencia original cerca de la frecuencia Nyquist. Esta situación es llamada "aliasing back" o "folding back" y se pueden observar en la Figura.5.3

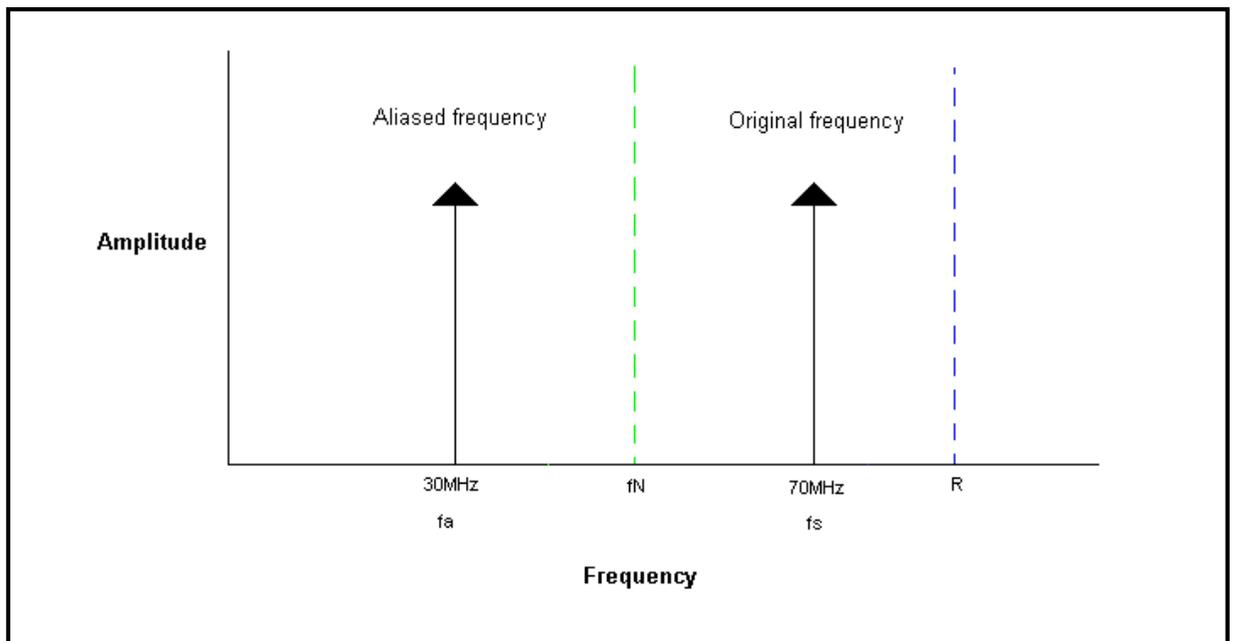


Figura 5.3. Representación de Amplitud versus Frecuencia de las frecuencias Aliasing, f_a , producida debido al “aliasing back” de la señal original de 70MHz.

(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Aliasing and sampling rate [en línea]. Austin Texas. [Consulta: 17 Marzo 2011]. Disponible en internet. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3000>>)

Donde:

R (tasa de muestreo)= 100Ms/s.

f_s (frecuencia de muestreo)= 70MHz.

f_n (Frecuencia Nyquist)=50MHz.

f_a (frecuencia aliasing)=30MHz.

La frecuencia de la señal aliasing puede ser obtenida con la siguiente ecuación:

$$f_a = |R * n - f_s|$$

Donde n es el número múltiplo entero más cercano de la tasa de muestreo R para la señal que está comenzando a ser solapada (f_s)

Aunque muestrear una señal con dos veces su componente de frecuencia máxima asegura que se obtendrán las componentes de frecuencia de tu señal, esto no es suficiente para capturar la forma de la forma de onda. Si se desea obtener la forma

de onda de la señal se debería muestrear la misma con 10 veces la teoría de Nyquist.

5.5 Desarrollo de la Práctica de Muestreo con uso de LabVIEW.

El VI que se desplegara en esta práctica permite, observar el comportamiento del muestreo de señales analógicas. Modificando los parámetros de este instrumento podremos ver los efectos de muestrear una señal analógica en diferentes tasas, y comprobar algunos de los teoremas y efectos estudiados anteriormente, como el teorema de Nyquist y el Aliasing.

1. Abrir el VI de práctica proporcionado por el instructor que tiene el nombre de "Practica 5 – Teorema Muestreo.vi".
2. Observar el panel frontal del VI, Figura 5.4:

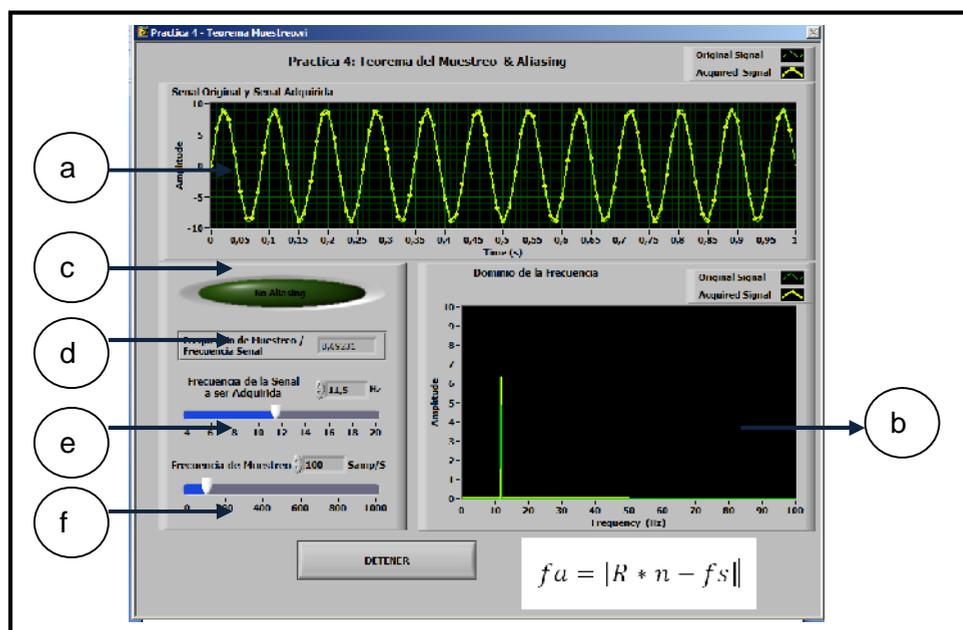


Figura 5.4. Panel Frontal de la Práctica 5.

El panel Frontal consta de las siguientes partes:

- a. Forma de onda analógica, que será muestreada y la representación de muestras adquiridas.
- b. Espectro de Frecuencia de la señal muestreada.

c. Indicador Booleano de presencia de Aliasing, este indicador se activara a la presencia de aliasing y se apagara en la ausencia del mismo.

d. Indicador Numérico de la operación matemática de la división de la frecuencia de muestreo, sobre la frecuencia de la señal muestreada.

e. Control numérico de la frecuencia de la señal analógica simulada.

f. Control numérico de la frecuencia de muestreo.

2. A continuación observemos el comportamiento del sistema de muestreo, si muestreamos la señal sinusoidal analógica, a una frecuencia de muestreo menor a la máxima frecuencia de la señal sinusoidal.

Configuremos los controles numéricos con los siguientes valores:

Frecuencia de la señal a ser adquirida = 16 Hz.

Frecuencia de Muestreo = 15HZ.

Después de configurar los controles del VI se puede observar que las muestras obtenidas puntos amarillos no son los suficientes para obtener una representación de la señal. La señal adquirida está representada sus muestras de color amarillo, y la señal senoidal original representada de rojo, observar Figura 5.5.

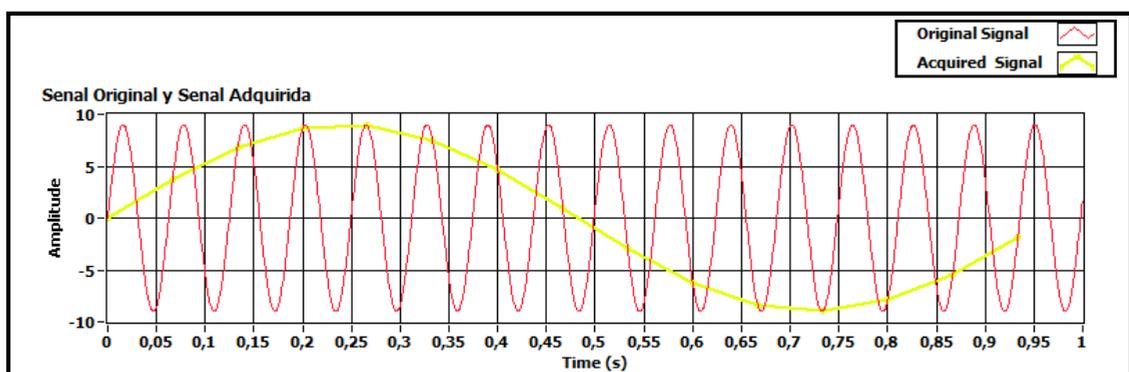


Figura 5.5. Representación de una señal muestreada con una frecuencia de muestreo pequeña.

También se puede observar la representación de la señal adquirida (amarilla) y la muestreada (roja) en el dominio del espectro, si vemos el resultado podemos notar que la señal adquirida posee una frecuencia diferente de la original esto quiere decir que no estamos muestreando con los valores adecuados la señal. Figura 5.6.

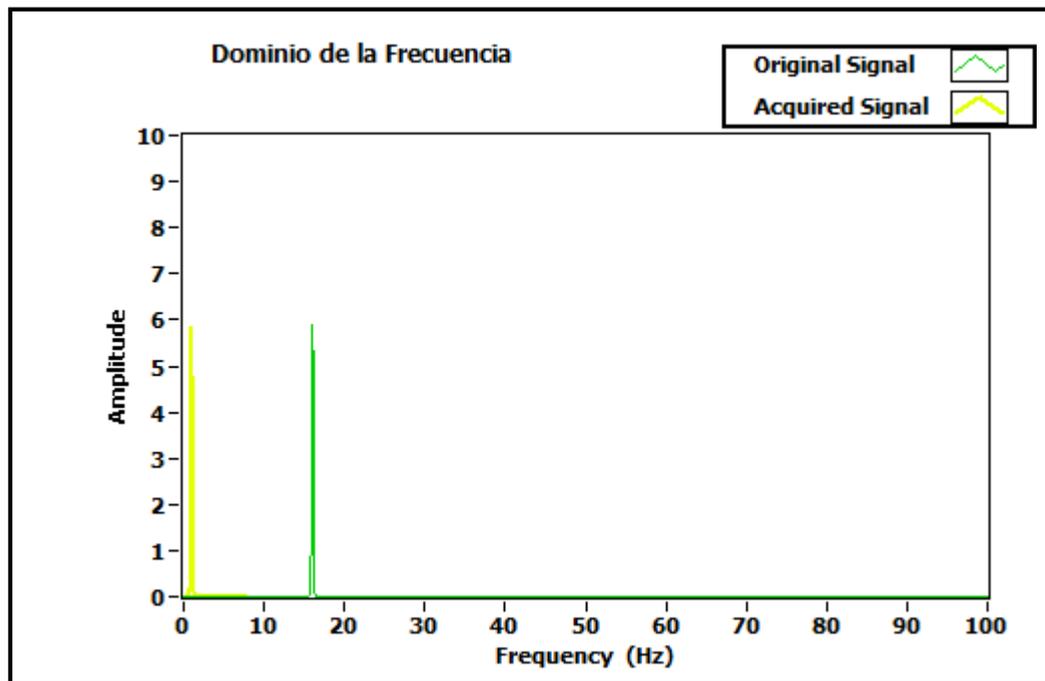


Figura 5.6. Representación en la frecuencia de la señal original y la adquirida (muestreada).

Como se observo en la Figura 5.6 se pueden distinguir dos componentes de frecuencia, la una constituye la frecuencia original y la otra la de la señal adquirida. Como se estudio en la parte teórica esta imagen de frecuencia que dispone de la misma amplitud y distinta valor de frecuencia tiene la denominación de aliasing, dando como resultado que la señal sea indistinguible.

3. Procedemos a cambiar los parámetros de simulación, ahora para observar el comportamiento del teorema de Nyquist que establece que se necesita dos muestras por ciclo de la señal de entrada para definir esta.

Configuremos los controles numéricos con los siguientes valores:

Frecuencia de la señal a ser adquirida = 20 Hz.

Frecuencia de Muestreo = 40Hz.

Si observamos primero la representación de las señales en el dominio de la frecuencia, podemos observar que las dos señales tienen la misma frecuencia ver Figura 5.7.

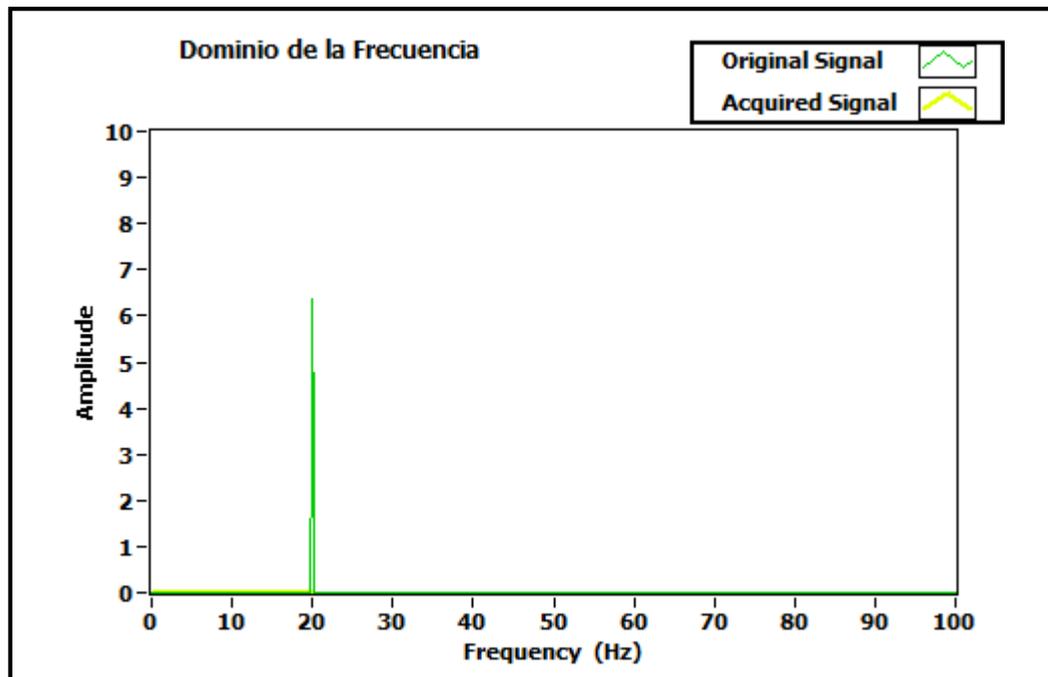


Figura 5.7. Representación en la frecuencia de la señal original y la adquirida (muestreada).

De esta manera confirmamos el teorema de Nyquist, pero a continuación observemos la representación de la señal adquirida y original en el dominio del tiempo, notamos claramente que al muestrear con esta tasa obtenemos la frecuencia de la señal, pero no la forma, para obtener la misma debemos al menos muestrear diez veces la frecuencia de Nyquist. Figura 5.8.

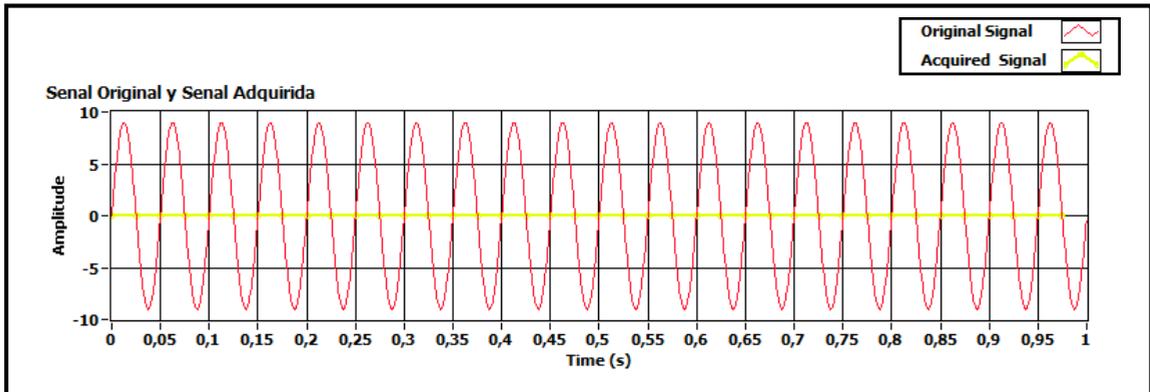


Figura 5.8.Representación en el tiempo de la señal original y la adquirida (muestreada).

4. Para comprobar la obtención de la forma de onda de la señal original es necesario muestrearla al menos diez veces la frecuencia de Nyquist, modifiquemos el VI con los siguientes parámetros.

Frecuencia de la señal a ser adquirida = 20 Hz.

Frecuencia de Muestreo = 200Hz.

Observando el indicador de onda de las señales en el dominio del tiempo, podemos ver claramente con que con los valores planteados se obtiene también la forma de la onda de la señal analógica original. Figura 5.9.

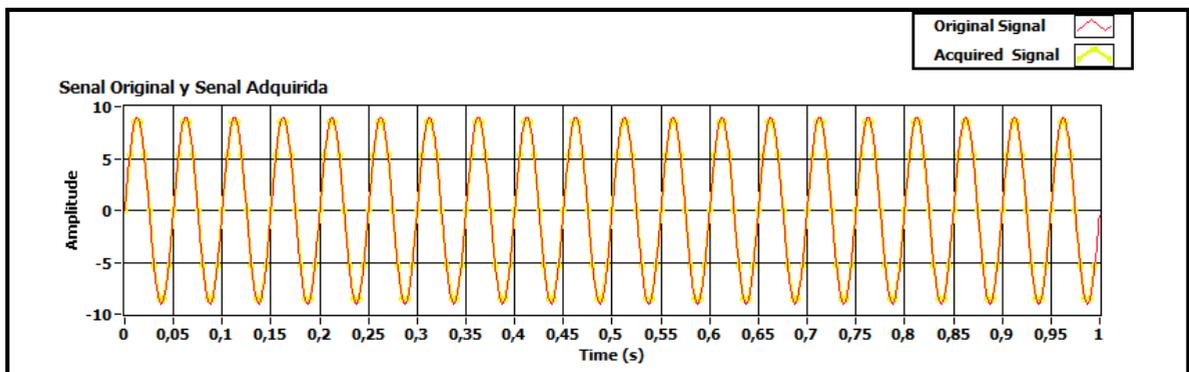


Figura 5.9.Representación en el tiempo de la señal original y la adquirida (muestreada).

Si ahora observamos la señal en el dominio de la frecuencia, comprobamos que obtenemos la frecuencia de la señal original en la señal adquirida.

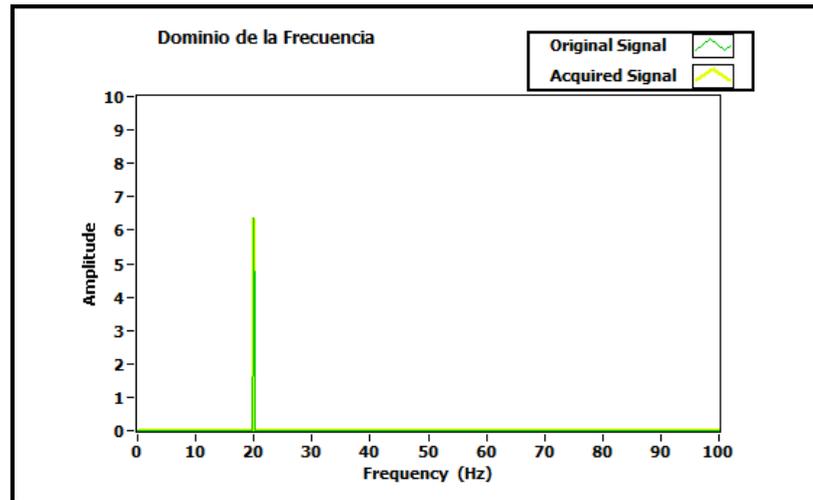


Figura 5.10. Representación en la frecuencia de la señal original y la adquirida (muestreada).

5. Para finalizar, configuraremos el VI, para muestrear la señal original con una frecuencia mayor a la frecuencia original pero menor a la frecuencia de Nyquist. Para esto configuraremos los controles con los siguientes valores:

Frecuencia de la señal a ser adquirida = 20 Hz.

Frecuencia de Muestreo = 35Hz.

Se observa claramente Figura 5.10, que la señal adquirida en el dominio del tiempo, no es la señal original, además observando la representación de la señal en el dominio de la frecuencia, se nota claramente que también posee una frecuencia diferente Figura 5.11, esta componente es un espejo de la señal original con un valor diferente que tiene la denominación de Aliasing.

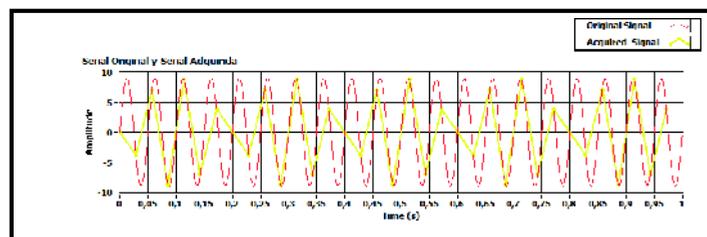


Figura 5.11. Representación en el tiempo de la señal original y la adquirida (muestreada).

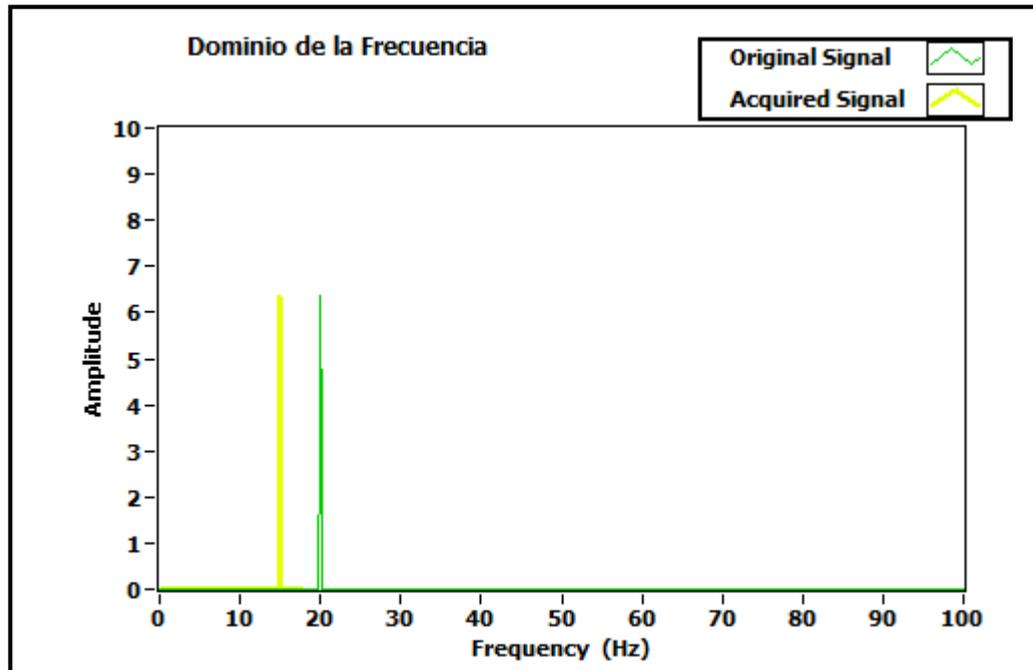


Figura 5.12. Representación en la frecuencia de la señal original y la adquirida (muestreada).

Como se estudio en la parte teórica se puede obtener el valor de la frecuencia de la señal adquirida, con aliasing con la siguiente fórmula:

$$f_a = |R * n - f_s|$$

f_a : frecuencia aliasing

n : es el numero múltiplo entero más cercano de la tasa de muestreo R en este ejemplo1.

f_s : frecuencia señal original.

Al realizar los cálculos obtenemos:

$$f_a = 35 - 20 = 15Hz$$

Podemos comprobar rápidamente que es el valor obtenido en el VI.

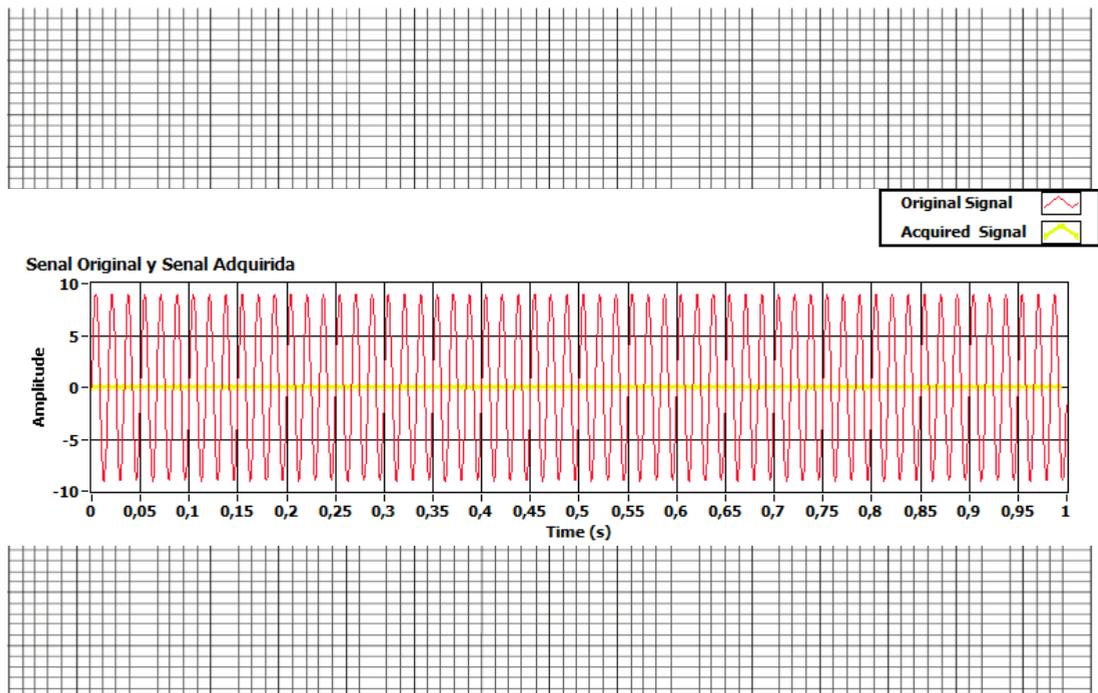
5.6 Ejercicio de Aplicación

1. Según el teorema de Nyquist cuál será la frecuencia de muestreo para la señal sinusoidal que posee una frecuencia de 60Hz.

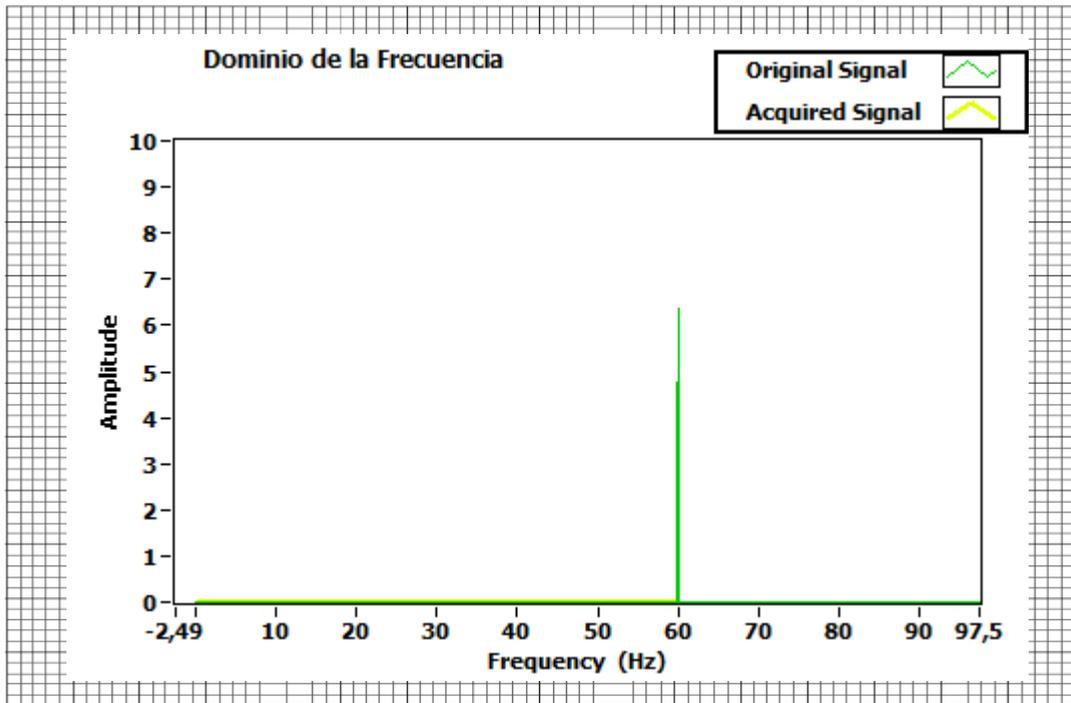
a. Obtener la frecuencia de la señal.

Frecuencia de la Señal	fs
60Hz	120Hz

b. Obtener la forma de onda de la señal.



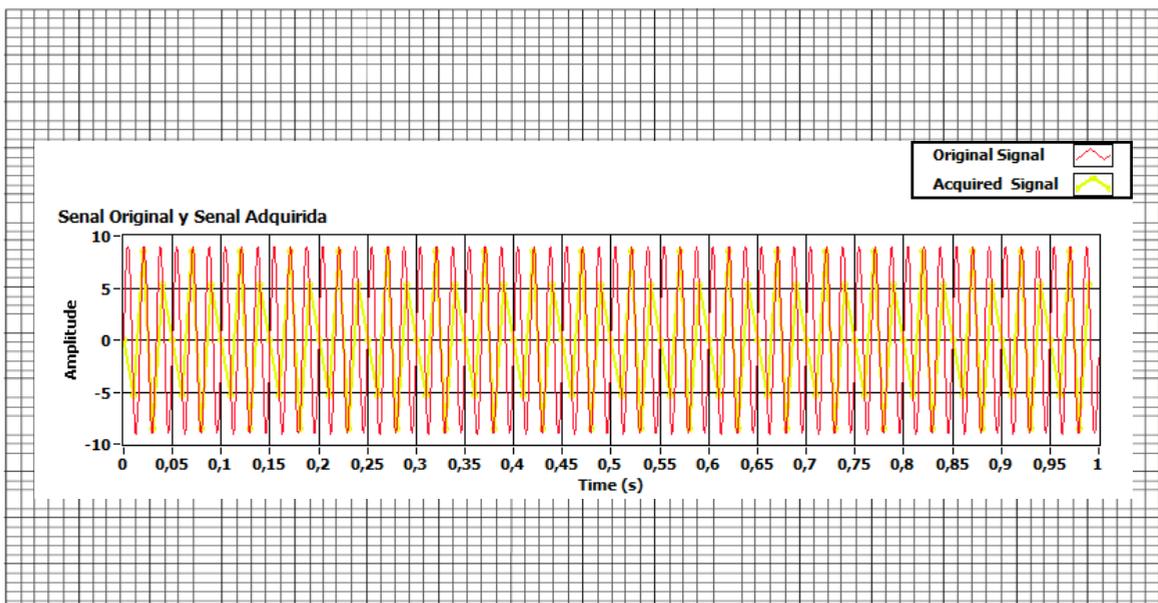
c. Graficar el espectro de frecuencia de la señal.



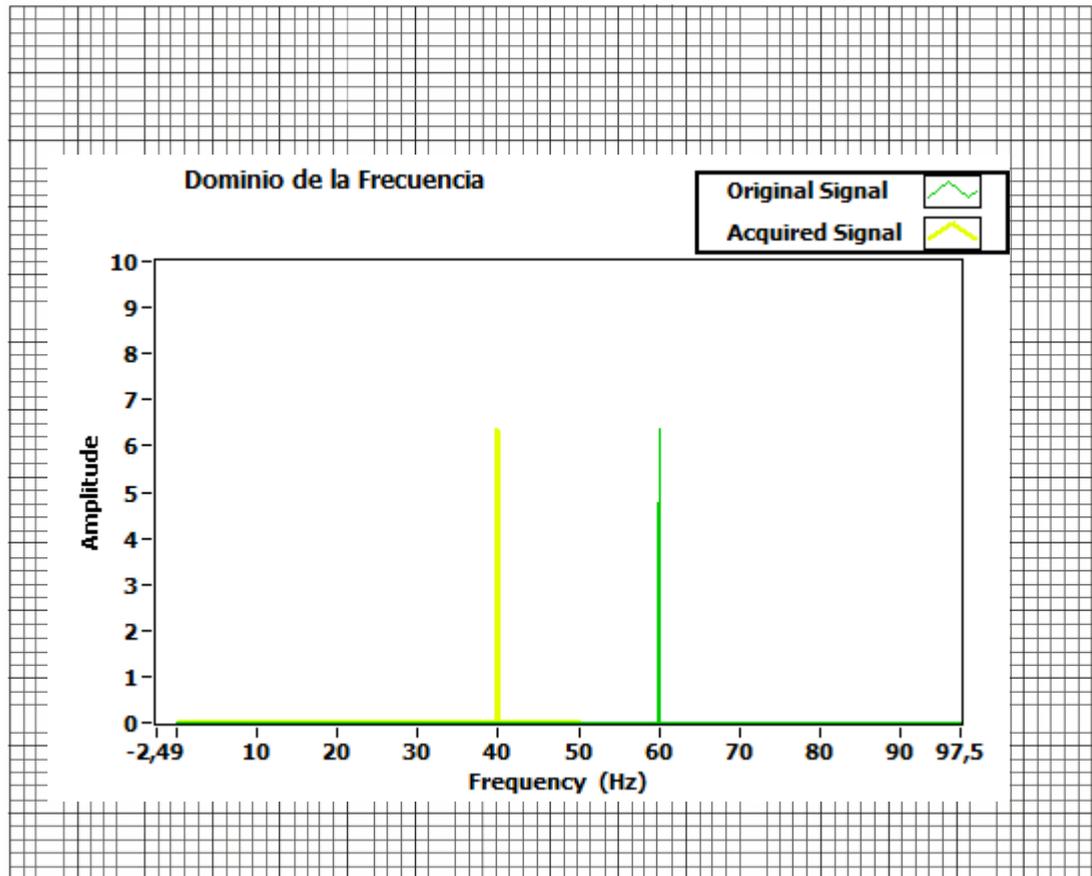
2. Repetir el ejemplo anterior, modificando la f_s , para obtener imágenes o señales aliasing de la señal original.

Frecuencia de la Señal	f_s	Fa	Fa (VI)
60Hz	100Hz	$100-60=40\text{Hz}$	40.4Hz

b. Obtener la forma de onda de la señal.



c. Graficar el espectro de frecuencia de la señal.



5.7 Conclusiones:

En la práctica sobre el teorema de muestreo, se pudo observar el comportamiento de muestrear señales con diferentes tasas, y la manera correcta de muestrear una señal analógica antes del proceso de digitalización.

PRACTICA 6

Tema: Modulación de Amplitud de Pulsos (PAM) y Multiplexión por División de Tiempo (TDM)

6.1 Objetivos

- a. Repasar los conceptos básicos de la modulación de pulsos.
- b. Estudiar cómo las formas de onda analógicas pueden convertirse en digitales.
- c. Analizar el comportamiento del esquema de modulación de amplitud de pulsos en el dominio del tiempo y frecuencia.
- d. Estudiar la multiplexión por división de tiempo de señales moduladas en amplitud de pulso.

6.2 Modulación de Amplitud de Pulso

La modulación de amplitud de pulsos (PAM, por sus siglas en inglés) es un término de ingeniería que describe la conversión de la señal analógica a una señal del tipo de pulso en la cual la amplitud del pulso representa la información analógica. La PAM se estudia al inicio debido a que el proceso de conversión de una señal analógica a una PAM es el primer paso en la conversión de una forma de onda analógica a una señal PCM (digital). En ciertas aplicaciones la señal PAM se utiliza directamente y no requiere la conversión a PCM.

El teorema de muestreo provee una manera de reproducir una forma de onda analógica mediante muestras de ésta. El propósito de la señalización por PAM es suministrar otra forma de onda que se asemeja a los pulsos, y sin embargo contiene la información presente en la forma de onda analógica. Debido a que se utilizan pulsos, se espera que el ancho de banda de la forma de onda PAM sea más ancho que el de la forma de onda analógica. No obstante, los pulsos son más prácticos de usar en los sistemas digitales. Se verá que la velocidad de pulso, f_s ,

para la PAM es la misma que la requerida por el teorema de muestreo, es decir, $f_s \geq 2B$, donde B es la frecuencia más alta en la forma de onda analógica y 2 B se conoce como la velocidad de Nyquist.

Existen dos clases de señales PAM: la que utiliza muestreo natural (por compuerta) y la que usa un muestreo instantáneo para producir un pulso plano. El tipo de PAM plana es de mayor utilidad en la conversión a PCM; sin embargo, el tipo por muestreo natural es más fácil de generar y se utiliza en otras aplicaciones.

6.2.1 Muestreo natural (por compuerta)

Si $w(t)$ es una forma de onda analógica limitada por banda a B hertz, entonces la señal PAM que utiliza muestreo natural (por compuerta) es:

$$w_s(t) = w(t)s(t)$$

Donde:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Pi\left(\frac{t - kT_s}{\tau}\right)$$

Es una forma de onda de conmutación de ondas rectangulares y $f_s = \frac{1}{T_s} \geq 2B$.

La forma de onda PAM con muestreo natural es relativamente fácil de generar, ya que sólo requiere el uso de un conmutador analógico que está listo y disponible en hardware de CMOS.

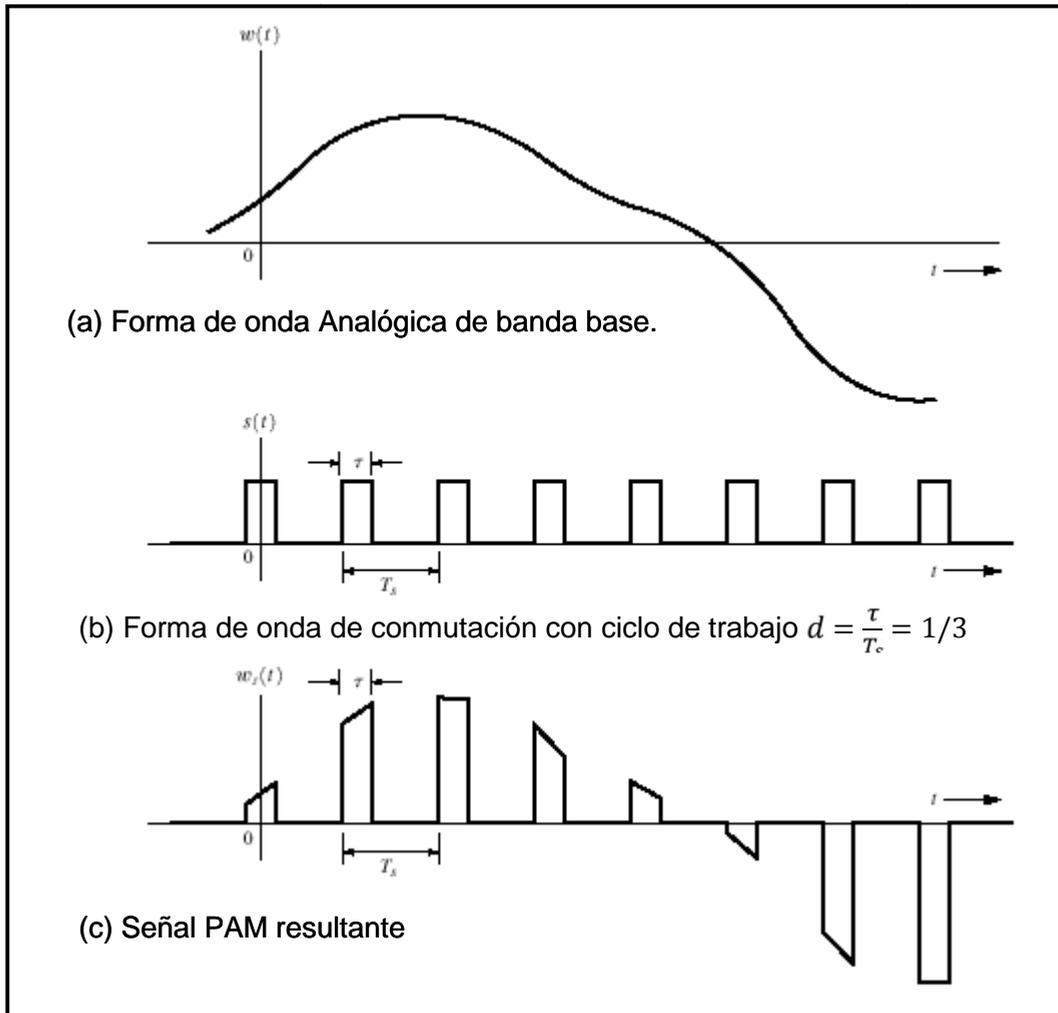


Figura 6.1. Señal PAM con muestreo natural.
 (COUCH, Sistema de Comunicaciones Digitales, 2008, Pág.130).

La Figura 6.1 muestra las señales que intervienen en un sistema PAM con muestreo natural o por compuerta.

El espectro de la señal PAM con muestreo natural se muestra en la Figura 6.2, en este caso la señal de entrada que posee un espectro rectangular, donde el ciclo de trabajo de la forma de onda de conmutación es $d = \frac{\tau}{T_s} = 1/3$ y la velocidad de muestreo es de $f_s = 4B$. Como se espera, el espectro de la forma de onda analógica de entrada se repite en las amónicas de la frecuencia de muestreo. Para este caso, donde $d=1/3$, el espectro de PAM es cero para $+3f_s$, $+6f_s$ y así sucesivamente. A partir de la figura puede observarse que el ancho de banda de la señal PAM e mucho mayor que el de la señal analógica original.

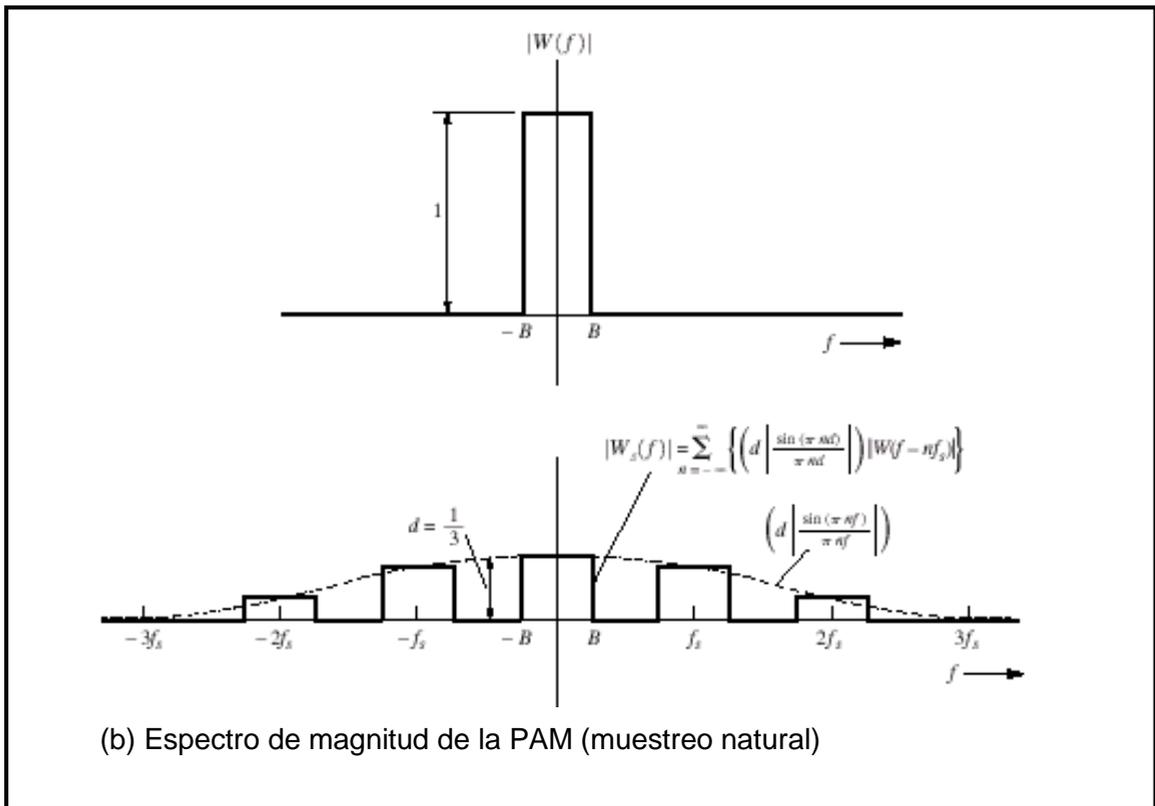


Figura 6.2. Espectro de magnitud de la PAM (muestreo natural).
 (COUCH, Sistema de Comunicaciones Digitales, 2008, Pág.132).

En el receptor, la forma de onda analógica original, $w(t)$, puede recuperarse a partir de señal PAM, $w_s(t)$, si ésta se pasa a través de un filtro pasa bajas en donde la frecuencia de corte es de $B < f_{corte} < f_s - B$. Esto se observa al comparar la Figura 6.2 (a) con la Figura 6.2(b). Debido a que el espectro a la salida del filtro pasabajos tendría la misma forma que la señal analógica original mostrada en la Figura 3.3 (a), la forma de la onda a la salida del filtro pasabajos sería idéntica a la señal analógica original, excepto para un factor de ganancia de d , el cual puede compensarse mediante un amplificador

6.2.2 Muestreo instantáneo (PAM plana)

Las formas de onda analógicas pueden también convertirse a señalización por pulsos mediante el uso de la señalización plana con muestreo instantáneo, como se muestra en la Figura 6.3.

Si $w(t)$ es una forma de onda analógica limitada por banda a B hertz, entonces la señal PAM por muestreo instantáneo está dada por:

$$w_s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(t - kT_s)$$

Donde $h(t)$ denota la forma del pulso de muestreo y, para muestreo plano, la forma del pulso es:

$$h(t) = \Pi\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1, & |t| < \tau/2 \\ 0, & |t| > \tau/2 \end{cases}$$

Donde $\tau = T_s = \frac{1}{f_s}$ y $f_s = 2B$.

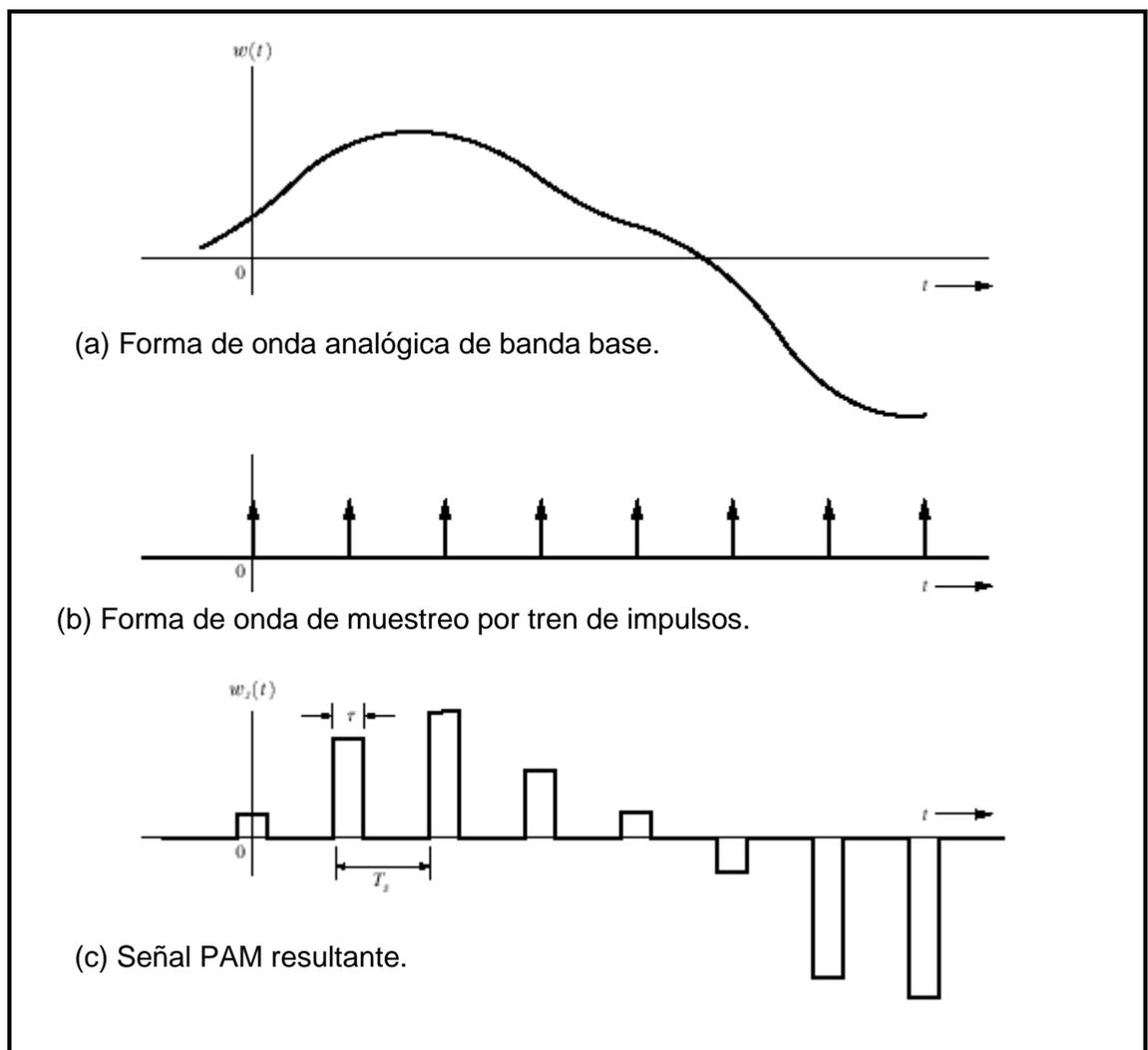


Figura 6.3. Espectro de magnitud de la PAM (muestreo natural).
(COUCH, Sistema de Comunicaciones Digitales, 2008, Pág.134).

El espectro de la señal PAM plana se ilustra en la Figura 6.4 para el caso de una de onda analógica de entrada que tiene un espectro rectangular. La señal analógica puede recuperarse a partir de la señal PAM plana empleando un filtro pasabajos. No obstante, existe una pérdida de alta frecuencia en la forma de onda analógica recuperada debido al espectro de filtrado, $H(f)$, causado por la forma de pulso plana. Esta pérdida, si es significativa, puede reducirse al disminuir τ , o si se utiliza alguna ganancia adicional en altas frecuencias en la función de transferencia del filtro pasabajos.

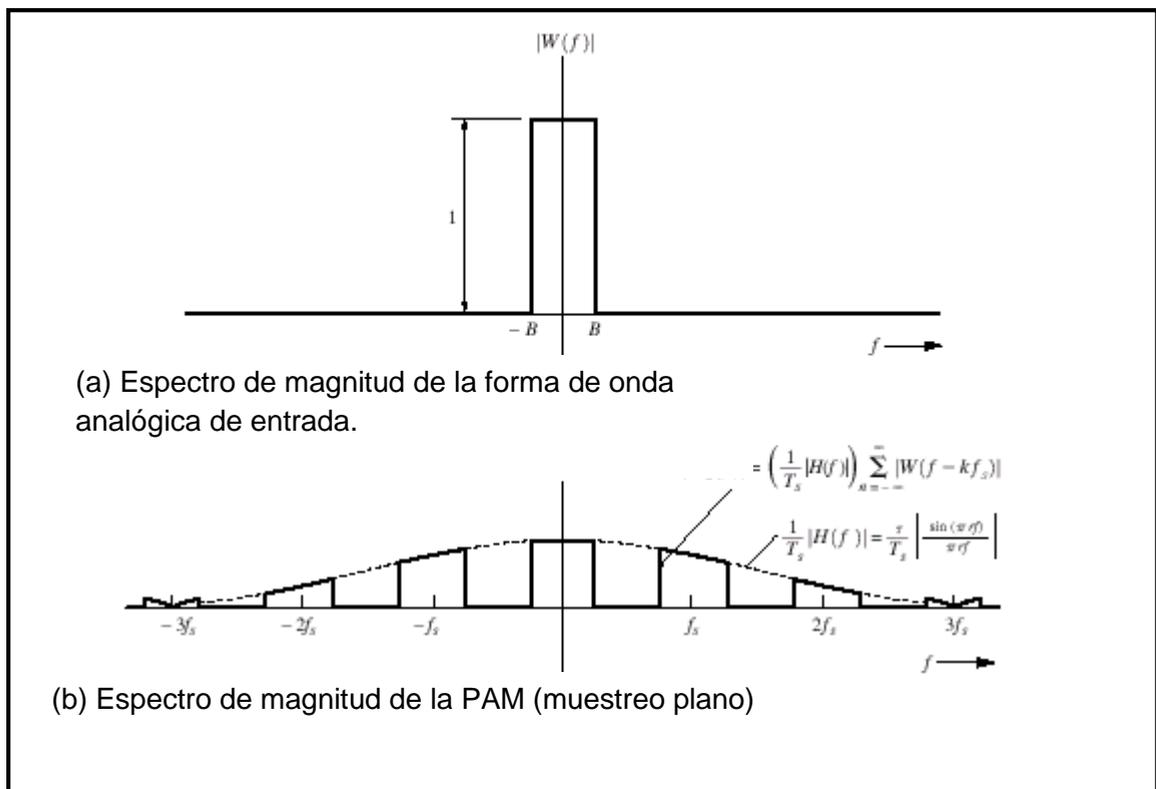


Figura 6.4. Espectro de una forma de onda PAM (muestreo plano).
 (COUCH, Sistema de Comunicaciones Digitales, 2008, Pág.136).

La transmisión por PAM con muestreo natural o instantáneo a través de un canal requiere una respuesta de frecuencia bastante ancha debido a lo estrecho del ancho del pulso, la cual impone estrictos requisitos sobre la respuesta de magnitud y de fase del canal. El ancho de banda requerido es mucho mayor que para la señal analógica original y el rendimiento del ruido del sistema PAM nunca puede ser mejor que aquel logrado mediante la transmisión directa de la señal analógica. Por lo tanto, la PAM no es muy buena opción para el caso de una transmisión de larga distancia. Pero sí provee de un medio para la conversión de una señal analógica a una señal PAM. La PAM también proporciona un medio para dividir la señal en

ranura de tiempo de tal manera que multiplique señales PAM que portan información de distintas fuentes que puedan entrelazarse para transmitir toda la información a través de un solo canal. Esto se conoce como multiplexión por división de tiempo.

6.2.3 Multiplexión por división del Tiempo (TDM)

El uso de pulsos muy estrechos en PAM, deja suficiente espacio entre muestras para la inserción de pulsos de otras señales muestreadas. El método de combinar varias señales muestreadas en determinada secuencia de tiempo se llama multiplexión por división del tiempo (TDM de sus siglas en inglés).

Si dos señales de mensajes son muestreadas en la misma tasa pero en diferentes tiempos, entonces los dos trenes de muestras pueden ser sumadas en mutua interacción. En la Figura 6.5 (a) la señal $x(t)$ y su correspondiente señal PAM son representadas. Además en la Figura 6.5 (b) la multiplexión de dos señales es mostrada.

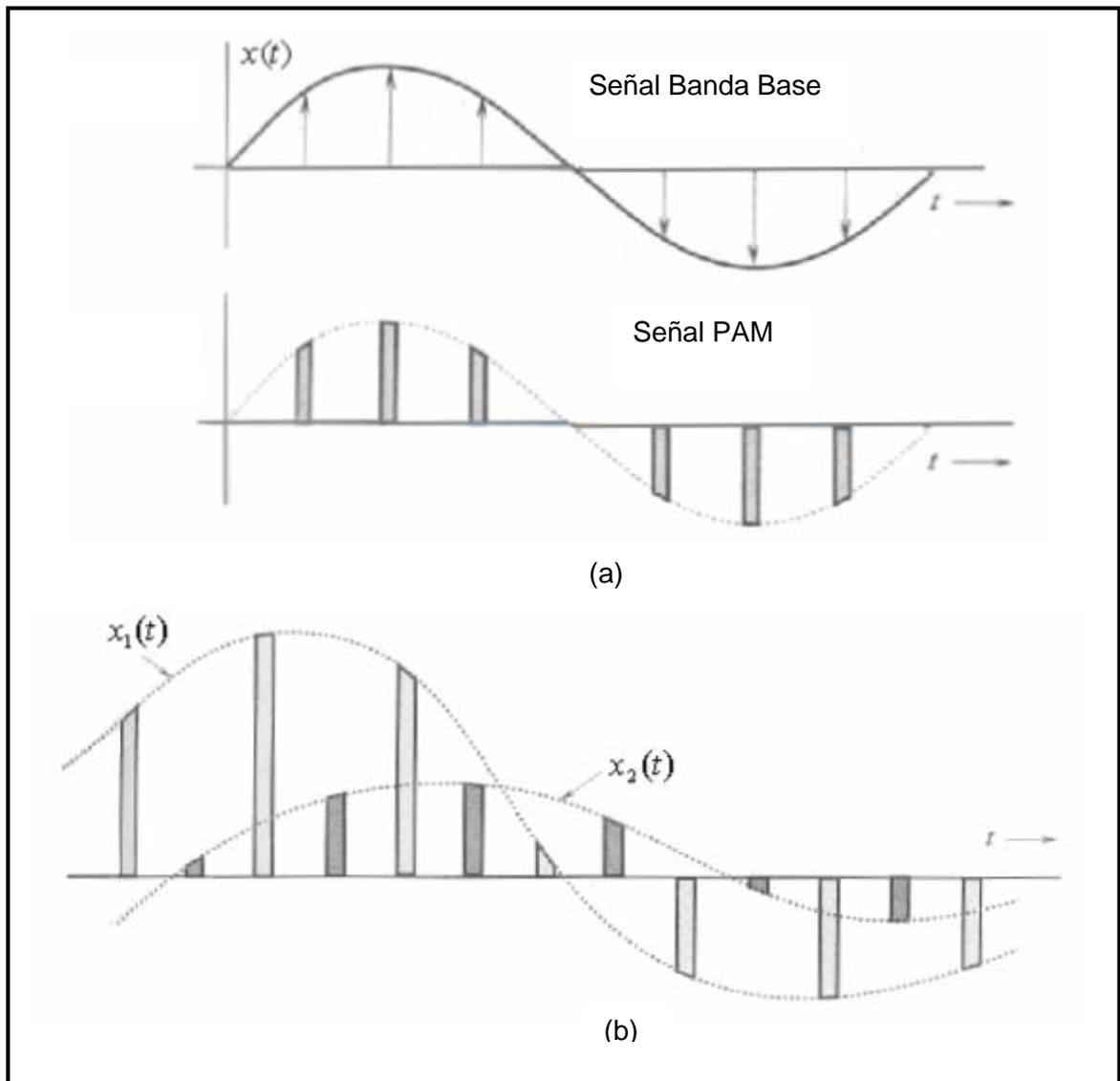


Figura 6.5.(a) Señal Banda Base y PAM (b) TDM de dos señales.
 (Fuente: HSU HWEI, Analog and Digital Communications,1993, Pág.109).

El diagrama de bloques de un sistema PAM/TDM es mostrado en la Figura 6.6.

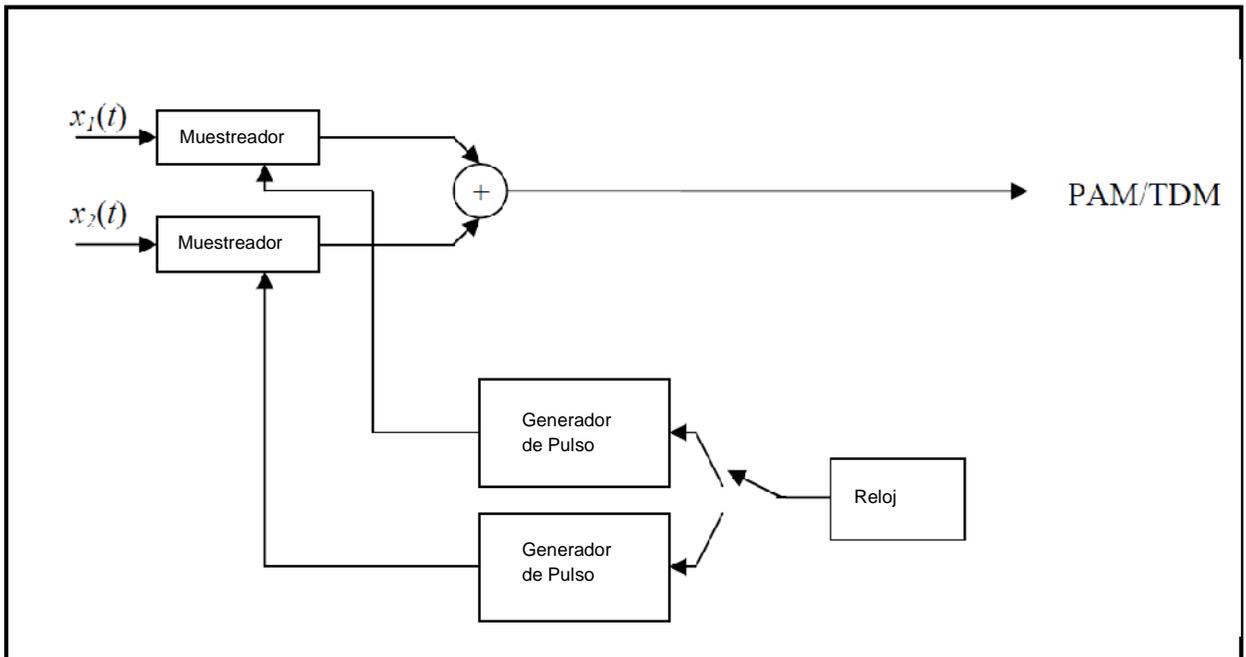


Figura 6.6. Diagrama de Bloques de un sistema TDM.

(Fuente: HSU HWEI, Analog and Digital Communications,1993, Pág.110).

En la Figura 6.6, si ambas señales de entrada $x_1(t)$ y $x_2(t)$ son pasa bajos y de banda limitada a 3KHz. El teorema de muestreo establece que debe muestrearse a razón no menor de 6KHZ, lo que requiere una velocidad del reloj mínima de 12KHZ para el sistema de dos canales. La salida multiplexada PAM puede aparecer como en la Figura 6.7. La distancia entre los pulsos es de $T_n = T_s/n$, n indica el numero de señales de entrada y T_s denota el periodo de muestreo requerido para una señal.

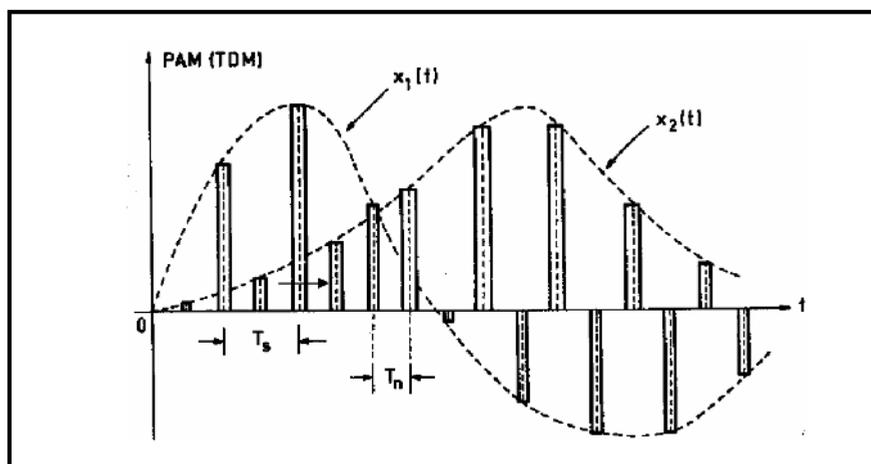


Figura 6.7. Señal PAM TDM.

(Fuente: HSU HWEI, Analog and Digital Communications,1993, Pág.110).

Como se pudo observar antes, si dos señales diferentes que poseen una frecuencia de 3KHz, el período de muestreo de cada señal será $T_s=1/6000=166.7$ useg. Si el número de señales es $n=2$ de la formula $T_n=T_s/n$, la distancia entre muestras será $T_n=T_s/2= 83.3$ useg, entonces el mínimo ancho de banda para transmitir estas muestras en TDM será:

$$B = \frac{1}{166.7 \cdot 10^{-6}} = 6\text{KHz}$$

El diagrama de un receptor TDM se muestra en la Figura 6.8. El parámetro más importante en recuperar las señales en un sistema TDM es los requerimientos de adecuada sincronización entre el receptor y trasmisor TDM. Entonces la señal de reloj debe ser transmitida de manera correcta al receptor.

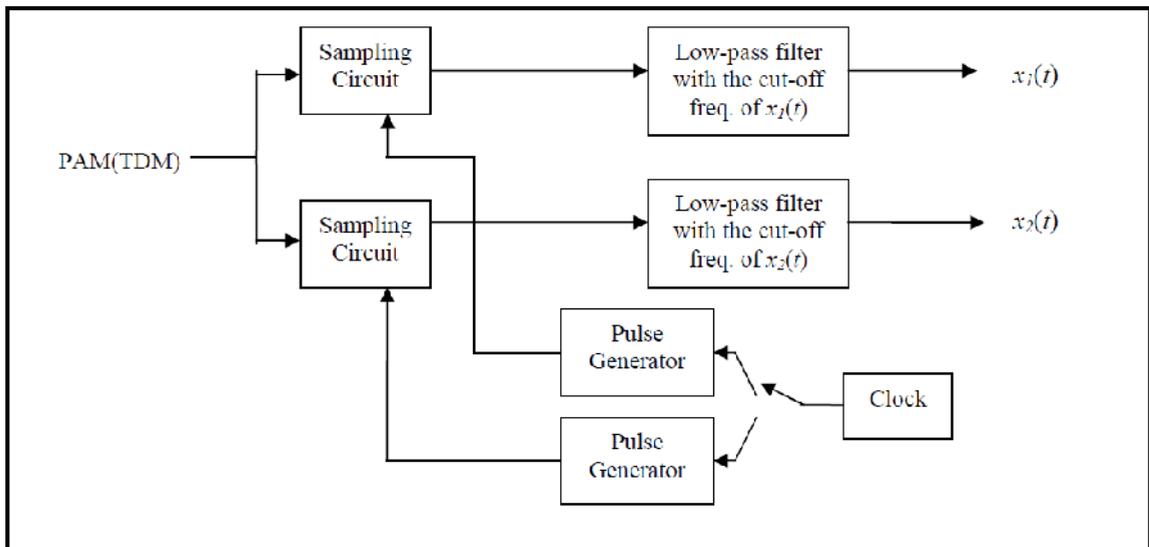


Figura 6.8. Diagrama de Bloques de un receptor TDM.

(Fuente: HSU HWEI, Analog and Digital Communications,1993, Pág.111).

6.3. Desarrollo de la práctica con uso de LabVIEW

6.3.1 Instrumento Virtual Modulación de Amplitud de Pulsos

El VI que a continuación se desplegara, nos permitirá observar el comportamiento de cada una de las señales involucradas en la modulación de Amplitud de Pulsos.

1. Abrir el instrumento virtual proporcionado por el instructor que tiene el nombre de “Práctica 6–PAM.vi”, a continuación se desplegara el panel frontal Figura 6.9.

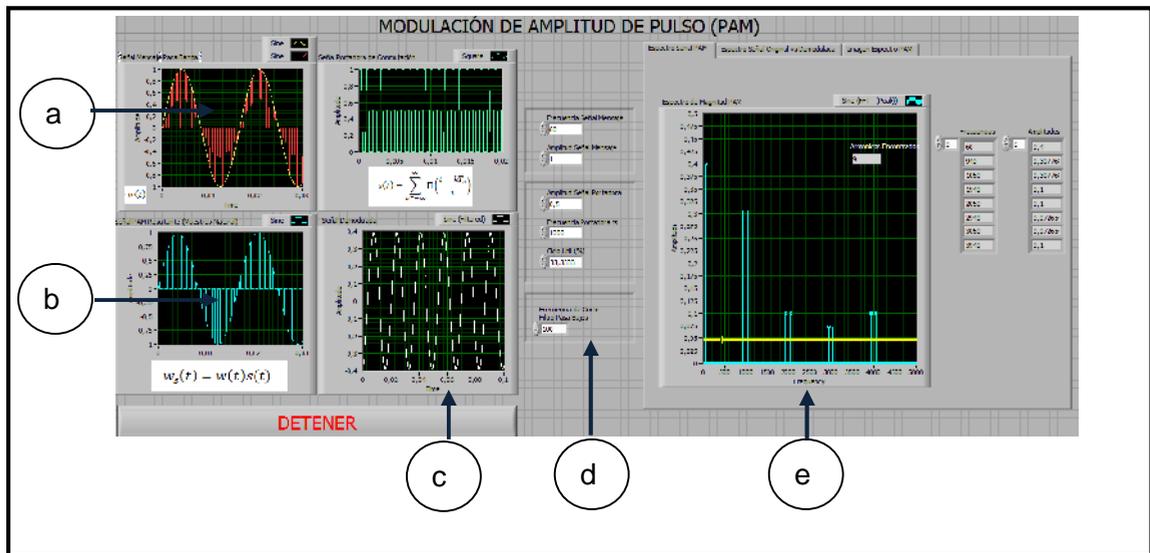


Figura 6.9. Panel Frontal del Modulador PAM.

El panel frontal del VI del modulador “PAM”, tiene las siguientes partes:

a. Indicadores de forma de onda:

- $w(t)$ (Izquierda)= Forma de onda analógica banda base (sinusoide).
- $s(t)$ (Derecha)=Forma de onda de tren de pulsos (moduladora).

b. Indicadores de Forma de onda:

- $ws(t)$ (Izquierda)= Señal PAM

c. Indicador de Forma de onda de la señal resultante del filtrado pasabajos.

d. Controladores Numéricos de las características de las señales involucradas en la modulación “PAM”.

e. Pestaña que posee la representación de la señal “PAM” en el dominio del tiempo y frecuencia.

2. A continuación observaremos el comportamiento del modulador “PAM” que modulara una señal sinusoidal mediante muestreo natural, para ello modifiquemos los parámetros de la onda original y la moduladora en los controles numéricos del “VI”, con los siguientes valores:

- Frecuencia Señal Mensaje= 60 Hz.
- Amplitud Señal Mensaje= 1 V.
- Amplitud Señal Portadora =0.5 V.
- Frecuencia Muestreo f_s = 240Hz.
- Ciclo Útil (%)=35%.
- Frecuencia de Corte Filtro Pasabajos:100Hz.

3. Con los parametros configurados observamos que la señal de mensaje es una senoide de 60Hz Figura 6.10 que sera multiplicada por una señal de forma cuadrada que se utilizara como moduladora 240Hz de frecuencia Figura 6.11 que posee un ciclo de trabajo de 35% esto quiere decir que el ciclo positivo de esta señal estara contenido en el 35% de su periodo total. La señal resultante de esta operación de señales es una señal que se la denomina “PAM” Figura 6.12.

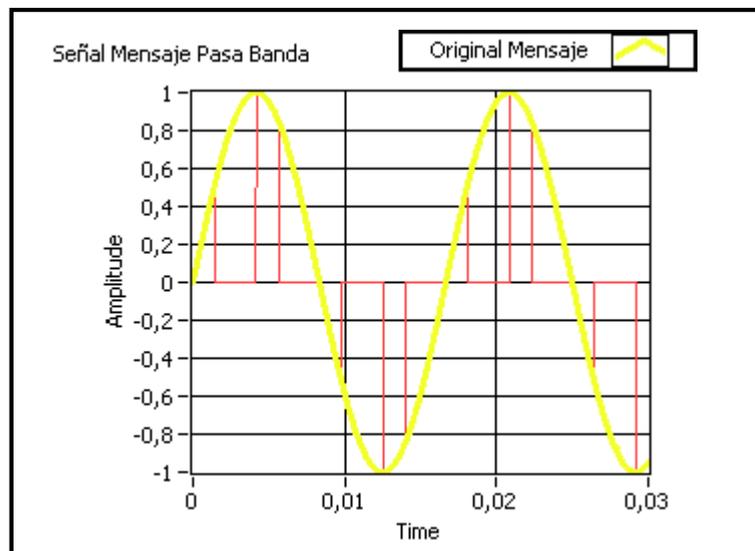


Figura 6.10. Señal de Mensaje (Original).

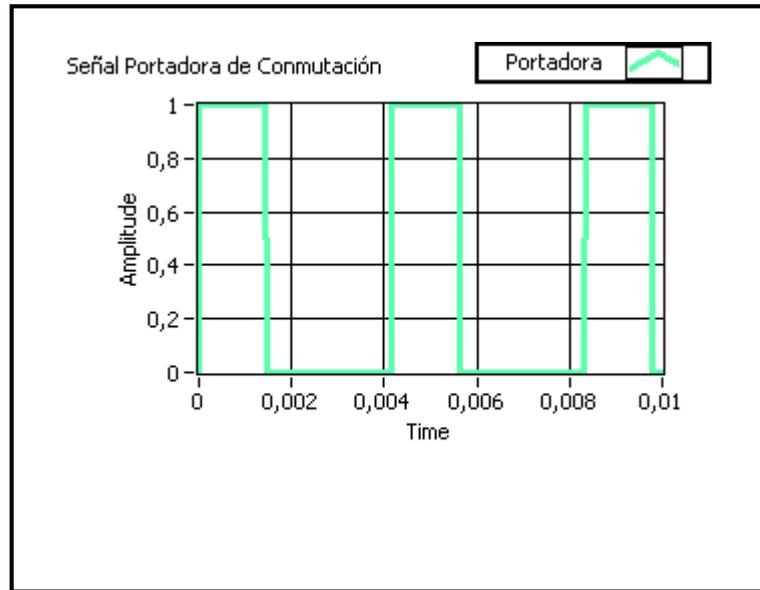


Figura 6.11. Señal de Forma Cuadrada utilizada modulador "PAM".

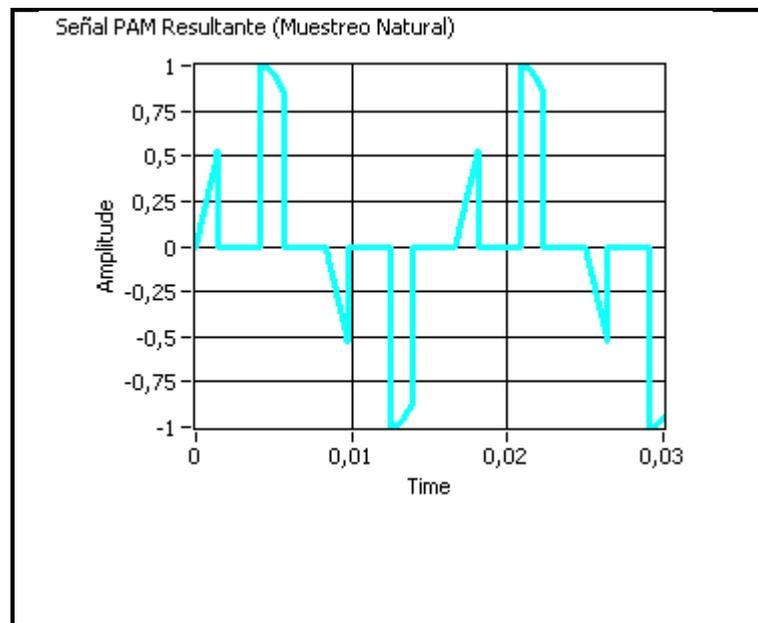


Figura 6.12. Señal "PAM" Resultante.

Se puede observar que el resultado de la modulación es una señal modulada en amplitud que posee la amplitud de la señal original.

4. A continuación podemos comprobar el espectro de la señal “PAM” con muestreo natural (compuerta) obtenida en el “VI”, basados en la Figura 6.2, comparamos con la señal resultante, observar Figura 6.13.

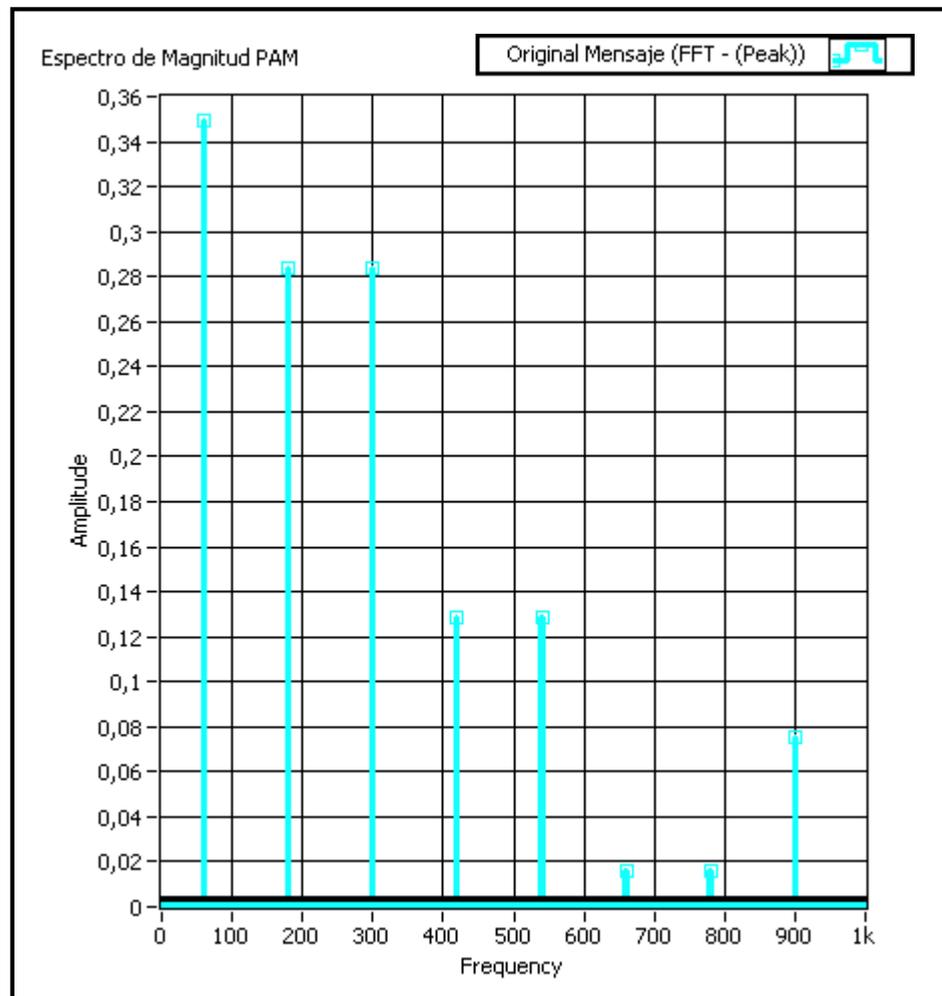


Figura 6.13. Espectro de la Señal “PAM” Resultante.

Utilizando las herramientas del “VI” podemos realizar la búsqueda de picos que nos permitirá obtener las componentes espectrales de los picos según el umbral deseado. Para realizar esto utilizaremos el ratón con el cursor del indicador gráfico que tiene la etiqueta “Espectro de Magnitud PAM” y obtenemos las siguientes componentes:

Pico Encontrado	Descripción	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V)
1	Máxima Frecuencia de la Señal de Mensaje	60 Hz	0.36V
2	Primer Armónico	180 Hz	0.28V
3	Tercer Armónico	300 Hz	0.28V
4	Cuarto Armónico	420 Hz	0.12V
5	Quinto Armónico	540 Hz	0.12 V

Tabla 6.1 Listado de Frecuencias de la Señal “PAM” resultantes en el “VI”

Basándonos en la Figura 6.2 notamos que al transformar una señal “PAM” al dominio de la frecuencia, deberíamos obtener una componente espectral con el valor de la máxima frecuencia de la señal original, si comprobamos en la Tabla 6.1 el primer pico encontrado corresponde a esta frecuencia. Las siguientes componentes espectrales que seguirían si observamos en la Figura 6.2 deberían ser dos componentes de la misma amplitud que forman un rectángulo de una amplitud Y y su lado inferior y superior equidistantes un valor X con el centro en la frecuencia de la señal portadora o de conmutación, si comprobamos esto utilizando los valores de los picos encontrados 2 y 3, obtenemos 240 Hz que corresponde a la frecuencia de la señal moduladora. De esta manera deberíamos seguir obteniendo estas componentes espectrales en $2 f_s$, $3f_s$, etc.

5. Para recuperar una señal modulada en “PAM”, podemos pasar esta por un filtro pasabajos y obtener la señal original; para realizar esto modifiquemos el control numérico del “VI” con la condición estudiada anteriormente que dice que la frecuencia de corte debe cumplir la siguiente característica $B < f_{corte} < f_s - B$.

Modifiquemos el control con la etiqueta “Frecuencia de Corte Filtro Pasa Bajas” con el valor de 100 Hz, este valor de filtrado nos da como resultado de una señal en el dominio del tiempo de la Figura 6.14.

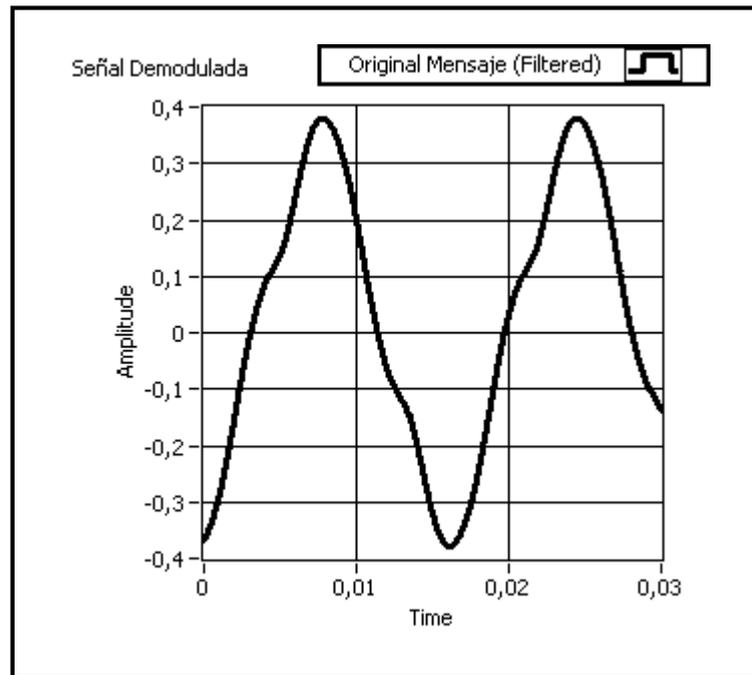


Figura 6.14. Señal "PAM" Filtrada.

Observamos que con este valor de frecuencia de corte obtenemos la componente de frecuencia pero no la forma de onda de la señal.

Para comprobar que obtenemos la frecuencia de la señal original nos ubicamos en la pestaña del "VI" que tiene la pestaña de Espectro Señal Original vs Demodulada, y observamos el resultado Figura 6.15.

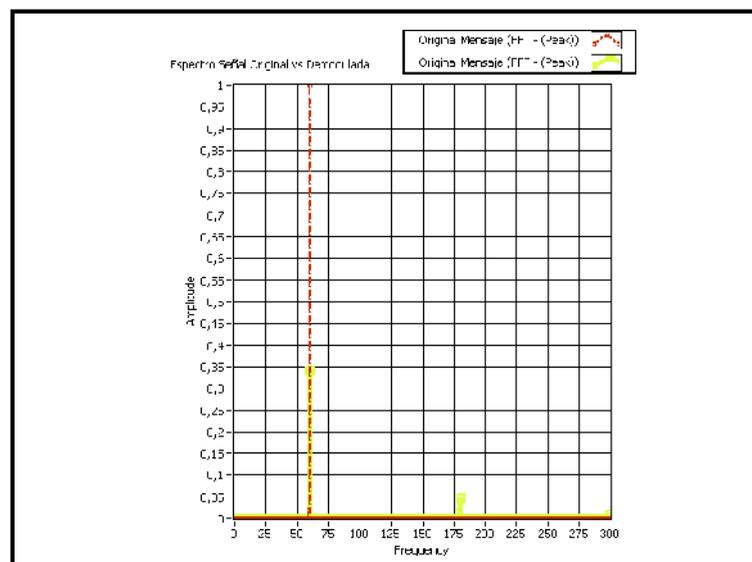


Figura 6.15. Señal Señal Original (Roja), resultado "PAM Filtrada" (Amarilla).

Se observa claramente que el resultado del filtrado es una señal que posee una frecuencia parecida, podemos mejorar esto configurando de mejor manera el filtro. La amplitud de la señal “PAM” no es la misma que la señal de mensaje como se observo en la parte teórica, para compensar esto se debe acoplar un amplificador de algún tipo.

6.3.2 Instrumento Virtual Multiplexión por División de Tiempo de señales “PAM”.

A continuación observaremos el efecto de la multiplexión de señales “PAM” en el tiempo, como se observo en la teoría.

1. Abrir el “VI ” proporcionado por el instructor que tiene el nombre de “Practica-PAM TDM.vi”. Se nos desplegara el siguiente panel frontal ver Figura 6.16.

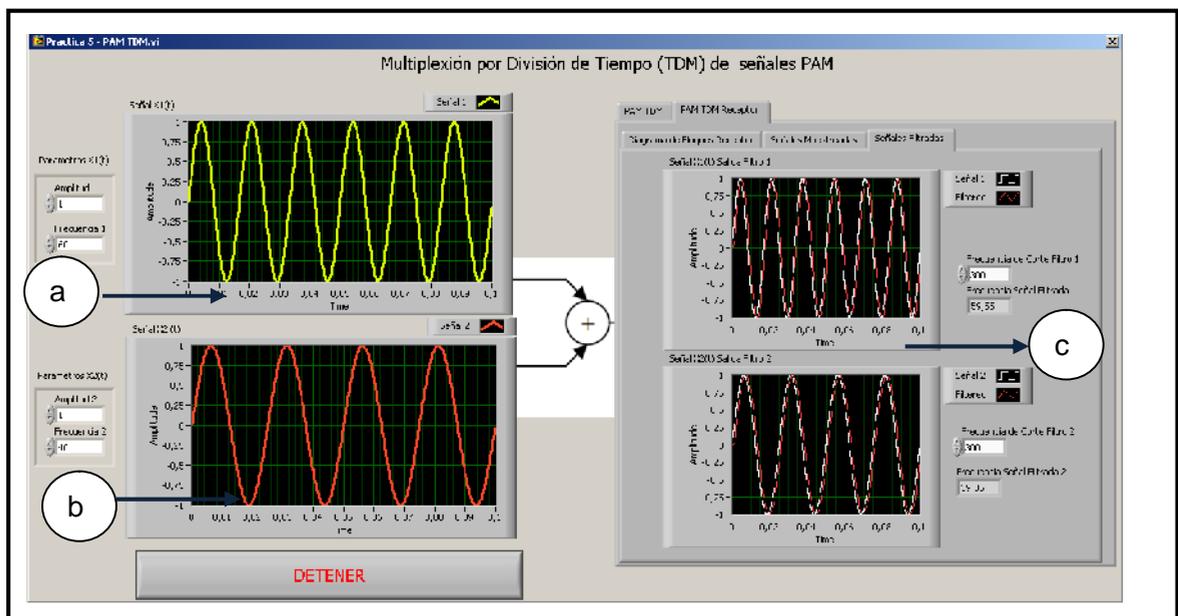


Figura 6.16. Panel Frontal Instrumento Virtual “TDM PAM”.

El panel frontal del instrumento consta de:

- a. Señal $X1(t)$: La primera señal que será modulada “PAM” y luego multiplexada.
- b. Señal $X2(t)$: La segunda señal que será modulada “PAM” y luego multiplexada.

c. Pestaña: Conjunto de indicadores gráficos, donde encontramos la señal “PAM TDM” resultante, en el dominio del tiempo como de la frecuencia, además tenemos los resultados de los filtros pasa bajas, con las señales resultantes.

2. A continuación modificaremos los parámetros del instrumento virtual para observar cómo se realiza el proceso de multiplexión en el dominio del tiempo de varias señales PAM.

En los controles numéricos de la primera y segunda señal respectivamente configurar con los siguientes parámetros:

- Amplitud de la Señal 1=1 V.
- Frecuencia de la Señal 1=60.1Hz
- Amplitud de la Señal 2=1 V.
- Frecuencia de la Señal 2=40 Hz.

Ubicarnos sobre la pestaña que tiene la descripción “PAM TDM (Domino del Tiempo)”, modifiquemos los controles numéricos que tienen las siguientes denominaciones con los siguientes valores:

- T(Periodos de la señal PAM)=10s.
- dt (Intervalo entre cada muestra)=5000 HZ.

3. Procedemos a ejecutar el “VI” y obtenemos el siguiente resultado Figura 6.17.

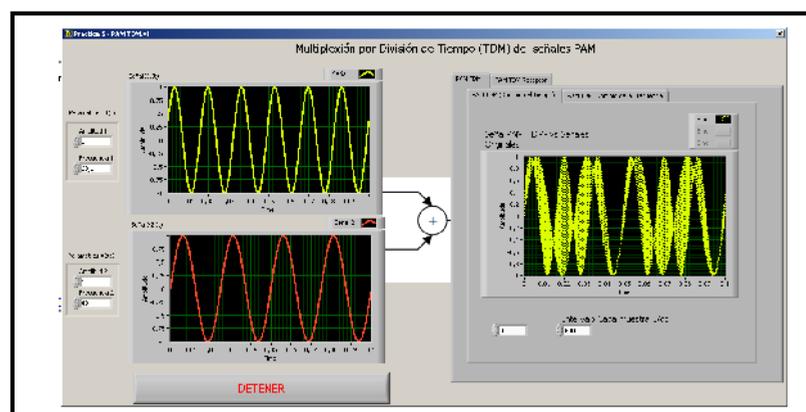


Figura 6.17. Señales “TDM PAM” paso 2.

En la Figura 6.17, se puede observar que las señales originales y la señal “PAM TDM” resultante.

Para poder observar esta señal en el dominio de la frecuencia podemos seleccionar la pestaña “PAM TDM (Dominio de la frecuencia)”, en la cual obtendremos el siguiente resultado. Figura 6.18.

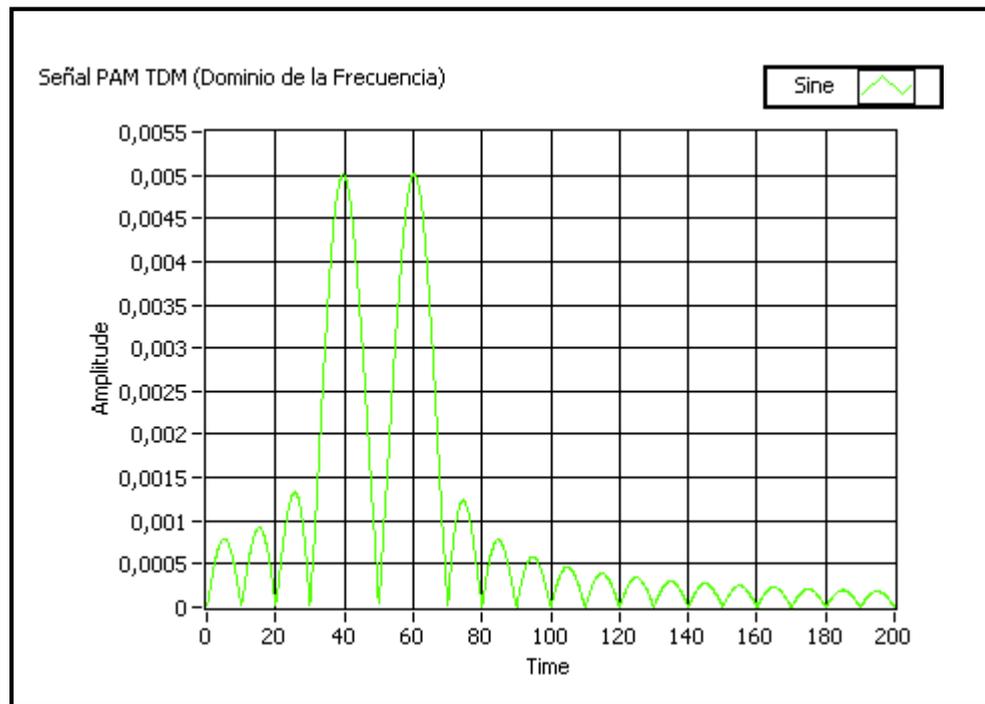


Figura 6.18. Señales “TDM PAM” en el dominio de la Frecuencia.

En la Figura 6.18 se puede notar muy claramente que las dos componentes de frecuencia obtenida corresponden al de las señales originales de 40Hz y 60 Hz respectivamente.

4. En la parte teórica se pudo observar que estas señales pueden ser recuperadas, mediante un filtro pasa bajas. Para comprobar lo anterior nos ubicamos en la pestaña “Receptor PAM TDM”, el cual podemos observar las señales muestreadas PAM ubicándonos en la pestaña del mismo nombre y como se puede observar en la Figura 6.19, se muestran dos señales PAM muy parecidas a las señales originales de mensaje.

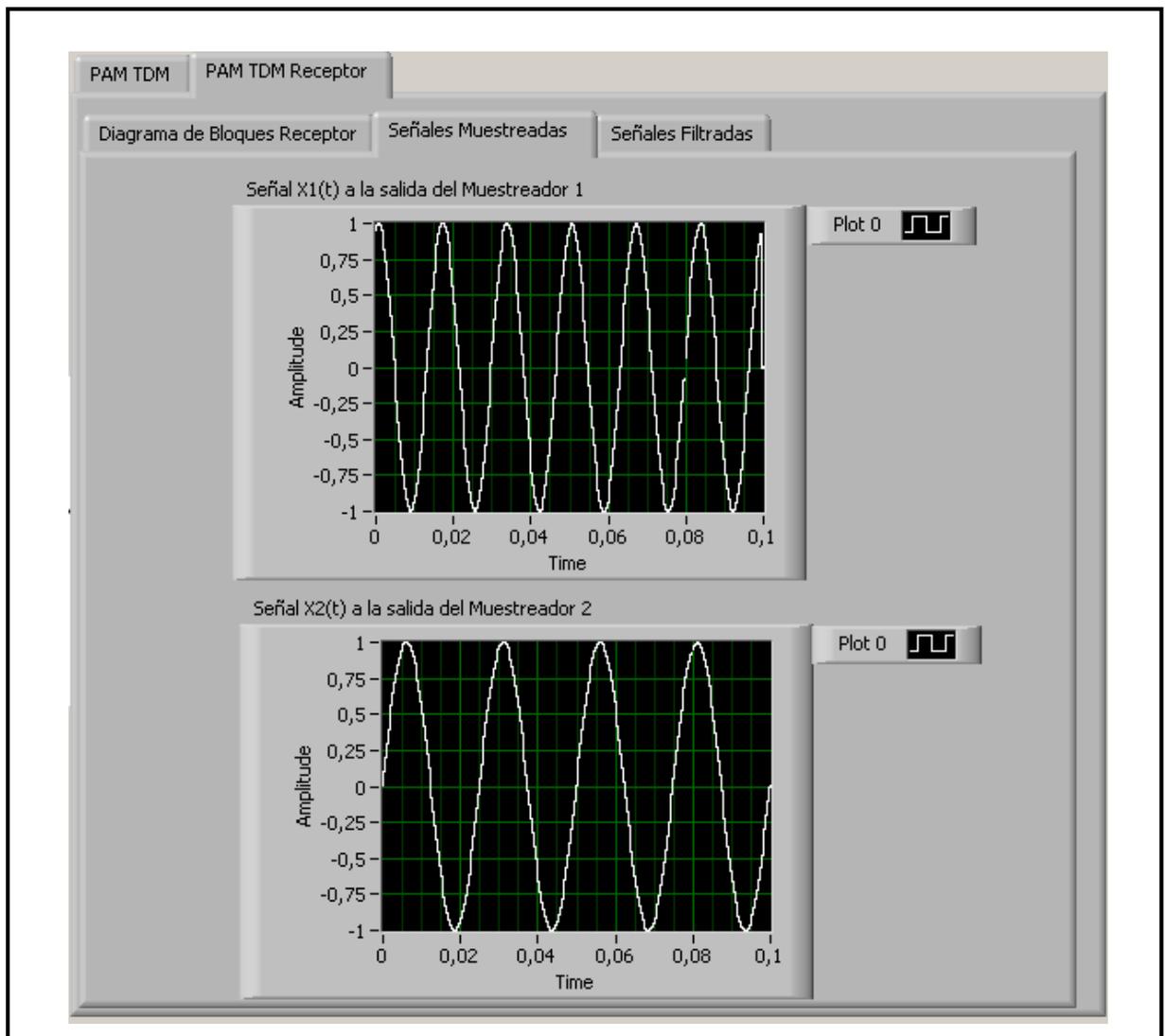


Figura 6.19. Señales PAM obtenidas antes del Filtrado.

5. Para poder obtener las señales originales no ubicaremos en la pestaña “Señales Filtradas”, y configuraremos los controles numéricos que poseen la etiqueta “Frecuencia de Corte” con una frecuencia de corte de 300Hz, y obtenemos los siguientes resultados Figura 6.20.

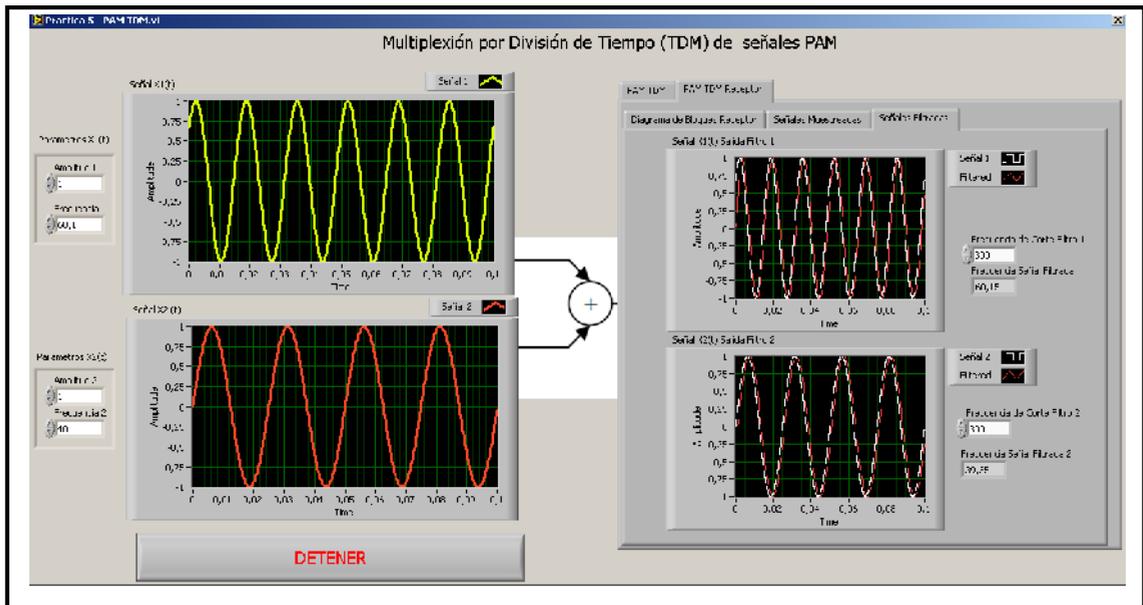


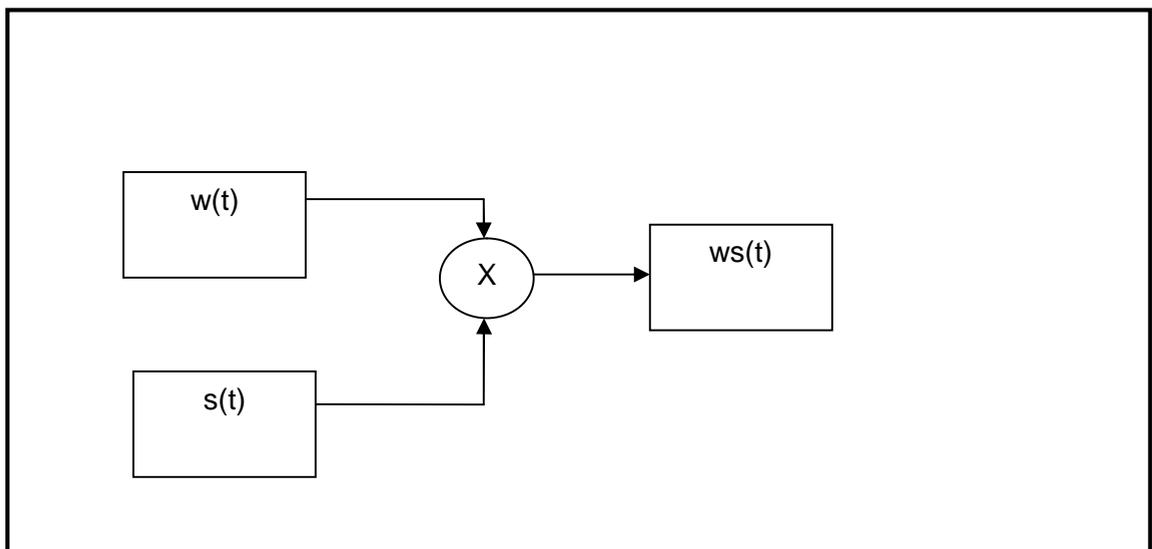
Figura 6.20. Señales PAM obtenidas después del Filtrado.

Se puede comprobar claramente con los indicadores numéricos de Frecuencia que poseen la misma frecuencia que la señal original, se puede comprobar que con otro valor de frecuencia de corte, se obtendrían diferentes resultados.

6.4. Ejercicio de Aplicación.

1. Graficar en un diagrama de bloques el proceso de modulación de PAM basados en la ecuación:

$$w_s(t) = w(t)s(t)$$



2. Abrir el VI con el nombre Practica 6- PAM.vi y graficar las señales involucradas en la modulación PAM con las siguientes características:

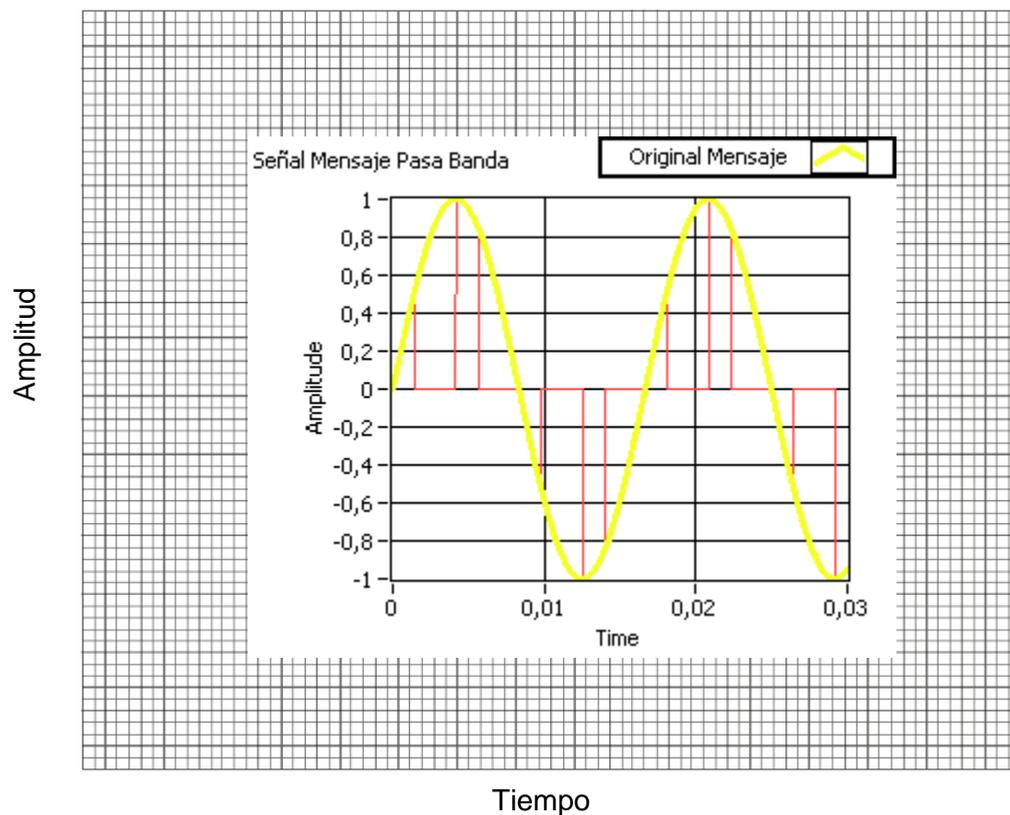
a. Para la Señal de Analógica de mensaje pasa banda $w(t)$:

- Frecuencia Señal Mensaje= 60Hz.
- Amplitud Señal Mensaje= 1V.

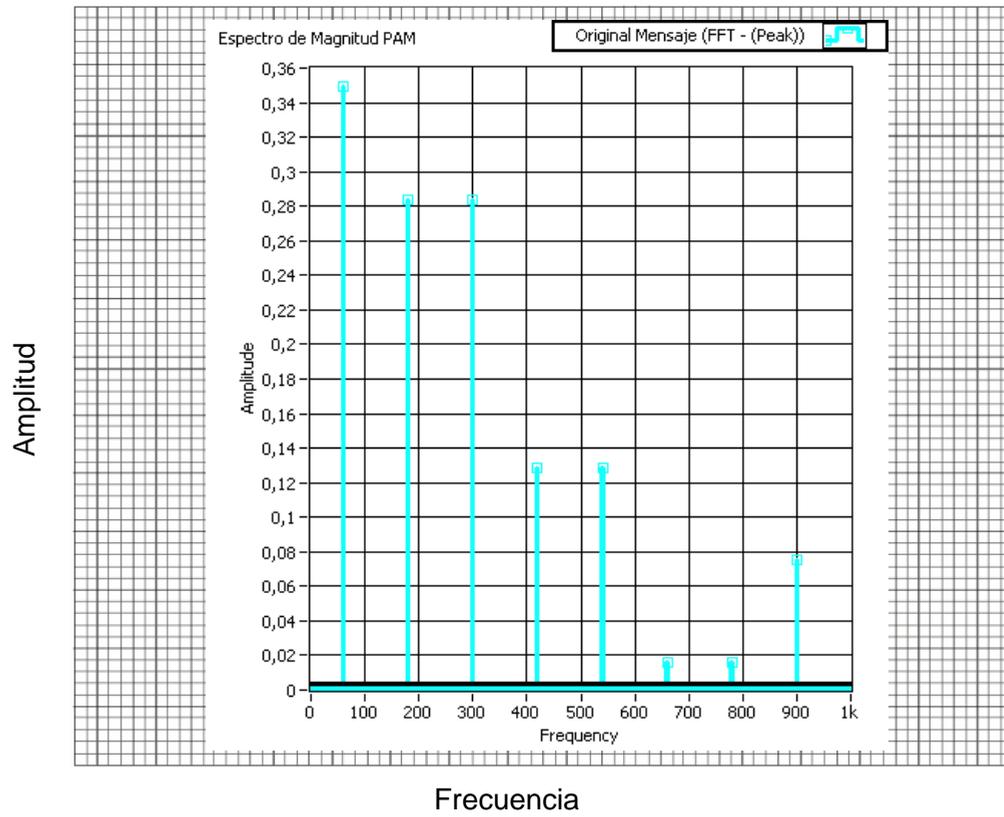
b). Para la señal Moduladora tren de pulsos $s(t)$:

- Amplitud Señal Portadora=0.5V.
- Frecuencia Portadora $f_s=1$ KHz.
- Ciclo Útil (%)=33.33%.

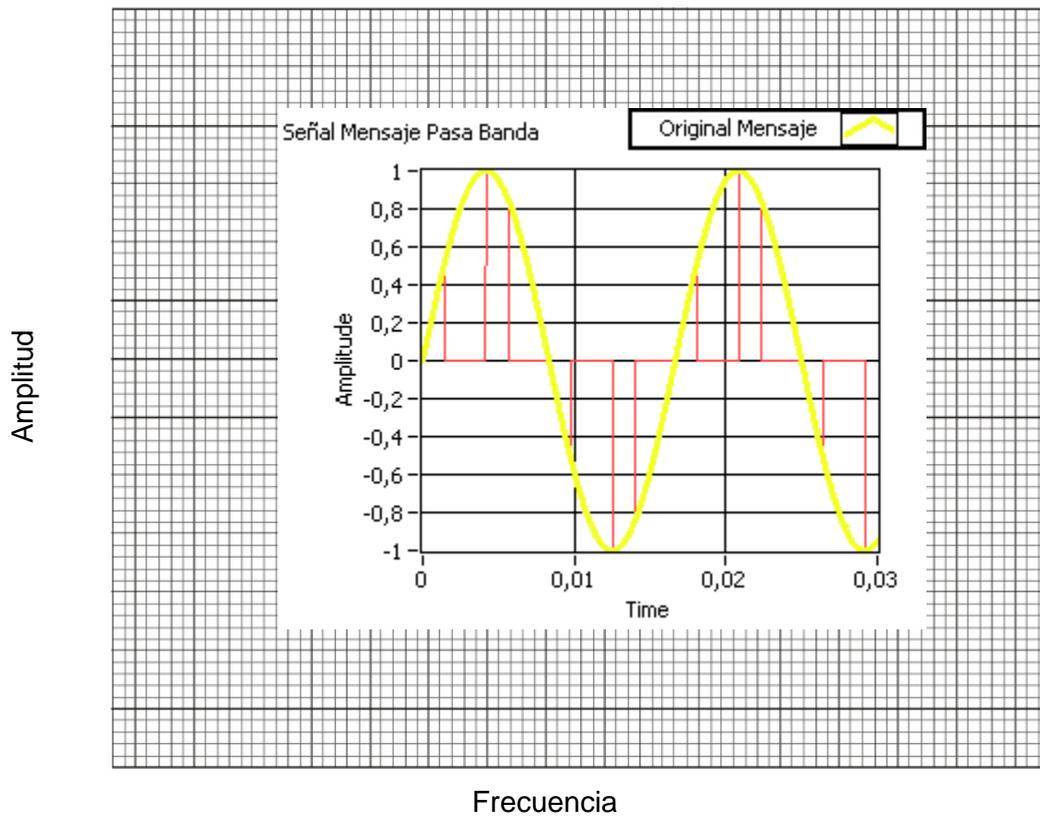
3. Graficar en el dominio del tiempo $w_s(t) = w(t)s(t)$:



4. Graficar en el dominio de la frecuencia $w_s(t) = w(t)s(t)$:



5. Graficar en el dominio de la frecuencia $w_s(t)$ versus $w(t)s(t)$:



7. Con cual frecuencia de corte del filtro pasa bajas se obtiene el mejor resultado:

100 Hz

6.5 Conclusiones:

En esta práctica se pudo observar y comprobar todo el proceso de modulación por amplitud de pulsos, además que por sus características, podemos multiplexar varias señales de este tipo en un solo medio, para poder transmitir y poseer comunicaciones más eficientes con respecto al uso del espectro.

PRACTICA 7

Tema: Modulación por Codificación de Pulsos PCM

7.1 Objetivos

- a. Repasar los conceptos básicos de PCM.
- b. Analizar el comportamiento de la digitalización de una señal analógica.
- c. Observar el esquema PCM en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

7.2 Modulación por Codificación de Pulsos

Este tipo de modulación, sin duda la más utilizada de todas las modulaciones de pulsos es, básicamente, el método de conversión de señales analógicas a digitales. PCM siempre conlleva modulación previa de amplitud de pulsos. Una señal analógica se caracteriza por el hecho de que su amplitud puede tomar cualquier valor entre un mínimo y un máximo, de forma continua. Una señal PAM también puede tener cualquier valor, pero en intervalos discretos. Esto significa que el posible número de valores de amplitud es infinito. Por otra parte, la amplitud de una señal digital sólo puede tener un número finito de valores, por lo general dos (cero y uno). Una señal analógica puede convertirse a digital mediante un proceso de muestreo y cuantificación. El muestreo la convierte en una señal PAM, la cuantificación redondea el valor de la amplitud al número permisible más cercano, generalmente en el intervalo $(0, 2^n)$ y lo codifica en un cierto número de bits. En realidad, no es estrictamente necesario transmitir con toda exactitud las amplitudes de las muestras. En el caso de señales de voz o de imagen, el receptor último es el oído o el ojo, que detectan sólo diferencias finitas, de modo que la señal original, continua, puede aproximarse por una señal formada por un conjunto de amplitudes discretas seleccionadas de forma tal que el error sea mínimo. Si las muestras de amplitudes distintas están muy cercanas entre sí, la señal aproximada prácticamente no se distinguirá de la señal continua original.

Desde un punto de vista práctico, es deseable una señal binaria, que puede tomar sólo dos valores, por su simplicidad. Para ello, la señal cuantificada a niveles discretos entre 0 y 2^n valores, puede codificarse mediante un símbolo de n bits, por lo que generalmente la cuantificación va seguida de un proceso de codificación.

El proceso de PCM se puede resumir en la Figura 7.1:

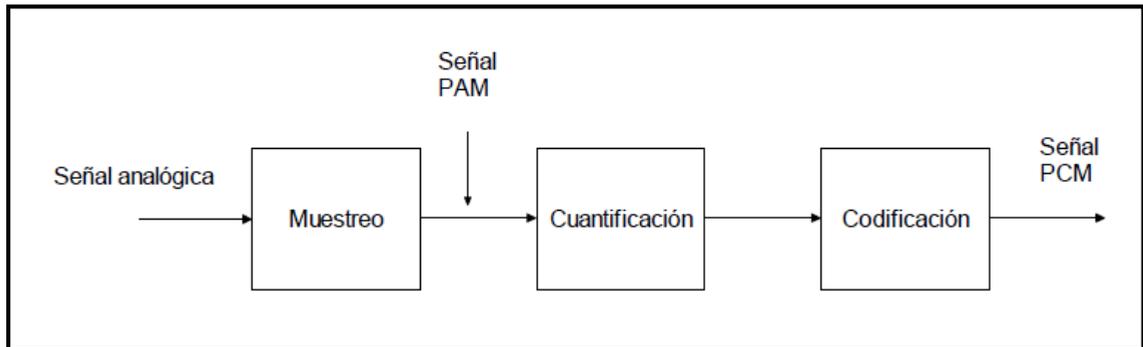


Figura 7.1 Proceso de PCM.

(Fuente: PEREZ VEGA, Ingeniería de Comunicaciones, 2010, Pág. 244)

7.2.1 Muestreo y retención señal analógica.

Teniendo una señal en formato analógico que varía en el tiempo, se toma una muestra periódica de la misma, para luego convertir el conjunto de muestras en una serie de pulsos que se puedan transformar con más facilidad a un código PCM binario o m-ario.

El método más común de muestreo y retención se conoce como muestreo de parte plana o muestreo tope plano, donde las amplitudes de los pulsos de muestreo toman el valor de la forma de onda analógica en el punto inicial del intervalo de muestreo y lo conservan durante una porción (Duty Cycle) del tiempo de muestreo.

En el muestreo natural, en cambio, los pulsos de muestreo toman los valores de la forma de onda analógica, durante la porción de Duty Cycle elegida por el usuario.

Muestreo Natural ver Figura 7.2:

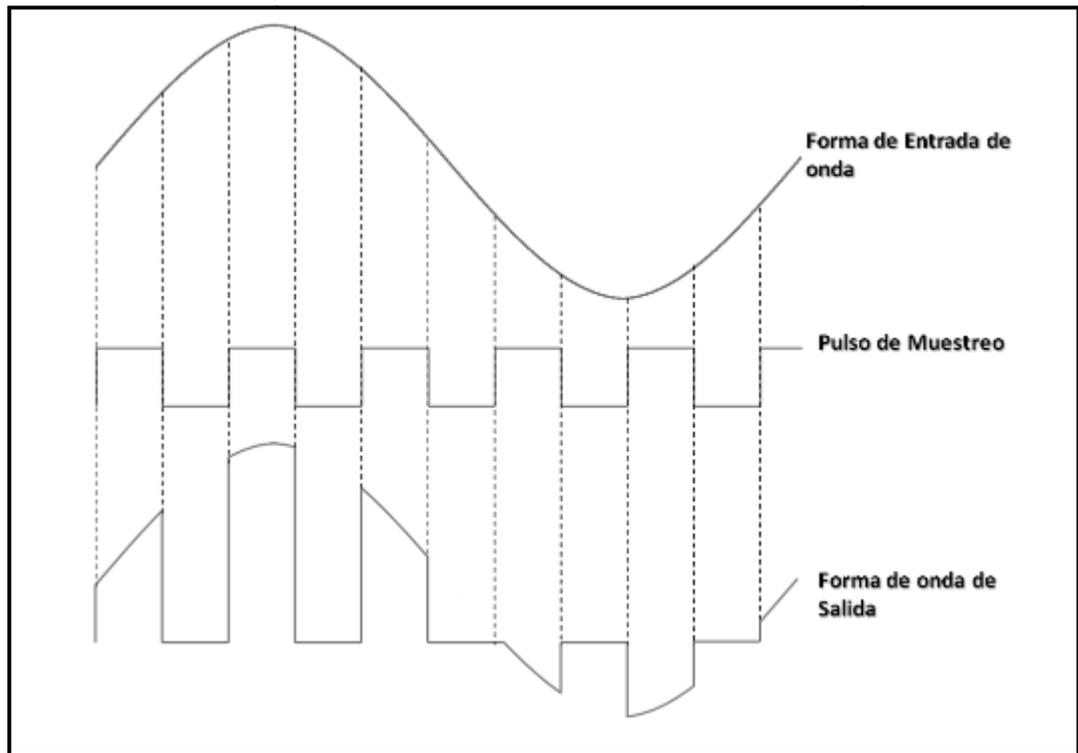


Figura 7.2 Proceso de Muestreo.

(Fuente: MEZOA, Laboratorio Digital Interactivo, 2011, Pág.10)

Muestreo Tope Plano Figura 7.3:

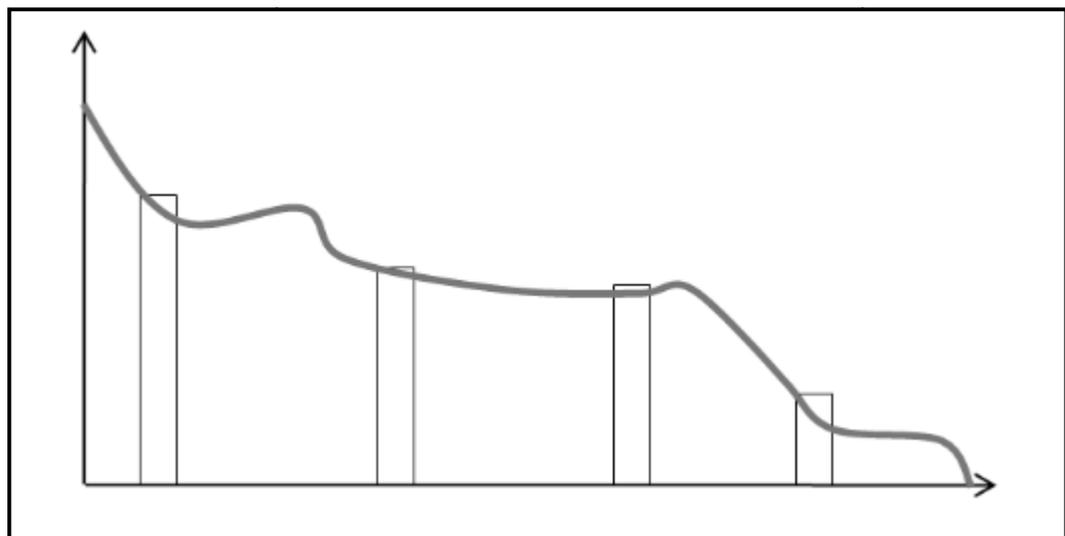


Figura 7.3 Muestreo Plano.

(Fuente: MEZOA, Laboratorio Digital Interactivo, 2011, Pág.11)

7.2.2 Cuantificación uniforme y no uniforme.

La cuantificación es uniforme cuando los niveles de cuantificación están espaciados uniformemente, o dicho de otra manera, cuando los escalones en la Figura 7.4 tienen la misma altura.

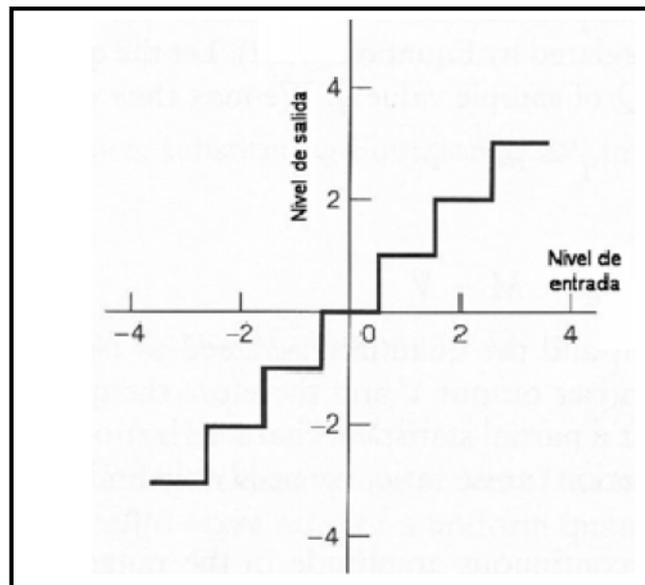


Figura 7.4 .Cuantificación Uniforme.

(Fuente: PEREZ VEGA, Ingeniería de Comunicaciones, 2010, Pág. 246)

En algunas aplicaciones de telefonía y procesado de imágenes, es conveniente cuantificar los valores pequeños de señal con niveles menores, es decir de manera más fina que los valores altos. Esto se ilustra en la figura 7.5.

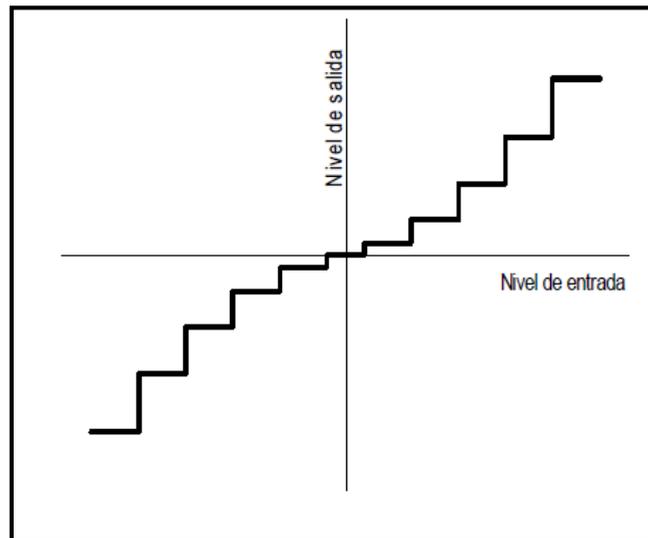


Figura 7.5 Cuantificación No uniforme.

(Fuente: PEREZ VEGA, Ingeniería de Comunicaciones, 2010, Pág. 246)

7.2.3 Ruido de cuantificación

La cuantificación de una señal introduce un *error de cuantificación*, definido como la diferencia entre el valor real de la señal y el valor de la señal cuantificada, es decir, la diferencia entre la magnitud de la señal de entrada y la de salida. Supóngase que los niveles de cuantificación corresponden a valores de 0, 1, 2,... volts y que la señal de entrada es de 1.2 V. La señal cuantificada de salida es, por ejemplo 1 V, con lo que el error de cuantificación es de 0.2 V. Si la entrada es de 1.7 V y la salida se cuantifica a 2 V, el error es de 0.3 V. El cuantificador redondea el valor de la señal de entrada al valor más cercano de los posibles niveles de cuantificación. El nivel de decisión para el redondeo hacia arriba o hacia abajo, suele tomarse a la mitad del intervalo de cuantificación. El tipo de redondeo para un nivel de entrada igual al nivel de decisión se define en el diseño.

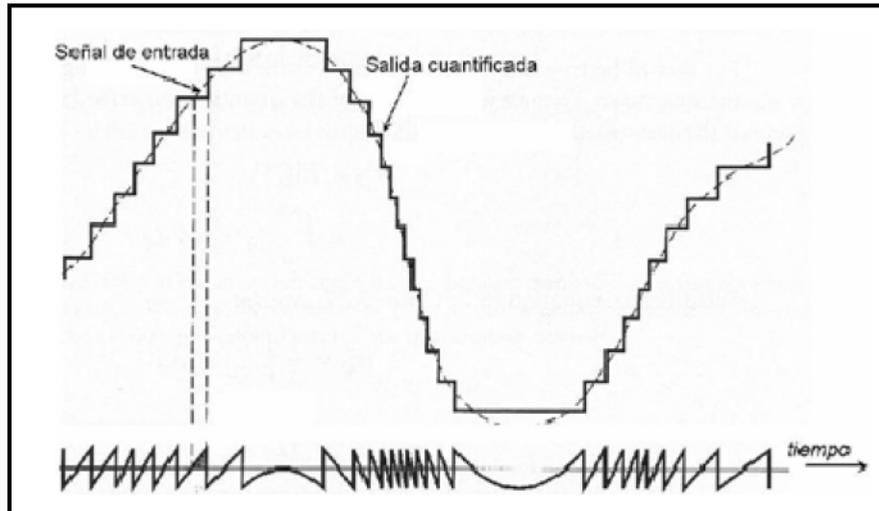


Figura 7.6 Señal Cuantificada y Error de Cuantificación.
 (Fuente: PEREZ VEGA, Ingeniería de Comunicaciones, 2010, Pág. 248)

En la figura 7.6 se ilustra la forma de una señal cuantificada y, en la parte inferior, el error de cuantificación.

El error de cuantificación representa, de hecho, ruido adicional que depende del número de niveles de cuantificación. Cuanto menor sea éste, mayor será el ruido.

En la Tabla 7.1 se ilustra la relación señal a ruido para diferentes niveles de cuantificación.

Número de niveles	Bits/muestra	S/N dB
32	5	31.8
64	6	37.8
128	7	43.8
256	8	49.8

Tabla 7.1. Relación Señal Ruido diferentes niveles de Cuantificación.

7.2.4 Cualidades e inconvenientes de PCM

La modulación por codificación de pulsos está presente, bien sea en la forma tratada antes, o en alguna de sus variantes, en la mayoría de las aplicaciones para transmitir o procesar información analógica en forma digital. Sus ventajas se

resumen en el hecho de emplear codificación de pulsos para la representación digital de señales analógicas, característica que lo distingue de todos los demás métodos de modulación analógica. Algunas de sus ventajas más importantes son:

- Robustez ante el ruido e interferencia en el canal de comunicaciones.
- Regeneración eficiente de la señal codificada a lo largo de la trayectoria de transmisión.
- Formato uniforme de transmisión para diferentes clases de señales en banda base, lo que permite integrarlas con otras formas de datos digitales en un canal común mediante el multiplexado en tiempo.
- Facilidad de encriptar la información para su transmisión segura.

El precio a pagar por las ventajas anteriores es el mayor costo y complejidad del sistema, así como el mayor ancho de banda necesario. Respecto a la complejidad, la tecnología actual de circuitos integrados en gran escala (VLSI) ha permitido la implementación de sistemas a, relativamente bajo costo y facilitado el crecimiento de este método o de sus variantes.

7.2.5 Ancho de banda en PCM

El efecto del empleo de PCM sobre el ancho de banda de una señal así modulada se puede inferir intuitivamente mediante el siguiente ejemplo. Supóngase una señal de audio con un ancho de banda de 5 KHz, muestreada a una frecuencia de 10 KHz, igual a la frecuencia de Nyquist y cuantificada a 8 bits/muestra (256 niveles), de modo que por cada muestra de la señal de entrada se producen ocho pulsos. Si pensamos en transmisión de estos pulsos en serie, la frecuencia de muestreo se ha multiplicado por 8 y, por consecuencia, también el ancho de banda. Así, una señal analógica que ocuparía un ancho de banda de 10 KHz, modulada en AM completa o 5 KHz en banda lateral única, requiere de un ancho de banda de 80 KHz modulada en PCM. Las cifras anteriores son únicamente ilustrativas, pero dan una idea bastante aproximada de la situación.

7.3 Desarrollo de la práctica de PCM con uso de LabVIEW.

En la siguiente practica, observaremos el comportamiento de los pasos necesarios para obtener una señal PCM.

1. Abrir el VI proporcionado por el instructor que tiene por nombre: "PRACTICA 7-PCM". A Continuación se desplegará el siguiente panel frontal Figura 7.7.

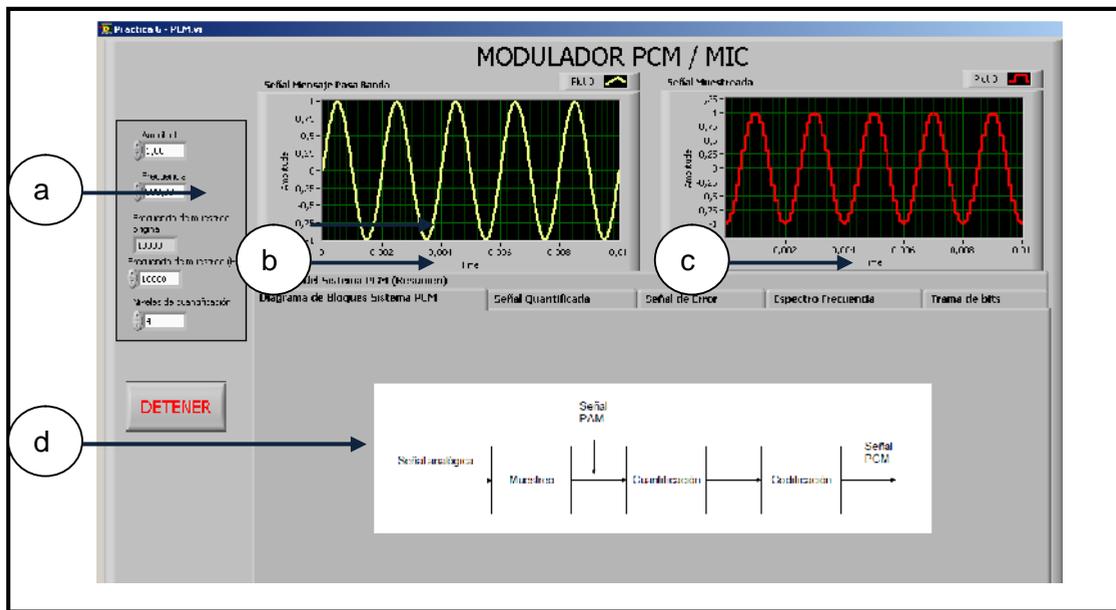


Figura 7.7. Panel Frontal Modulador PCM.

El panel frontal consta de las siguientes partes:

a. Controles numéricos de propiedades de la señal de mensaje pasa banda:

- Amplitud.
- Frecuencia.
- Frecuencia de Muestreo.
- Niveles de cuantificación.

b. Indicador de forma de onda grafica de la señal de mensaje pasa banda.

c. Indicador de forma de onda grafica de la señal de mensaje muestreada.

d. Control tipo pestaña con las siguientes categorías:

- Diagrama de bloques sistema PCM: Diagrama de los procesos de obtención de una señal PCM.
- Señal Cuantificada: Indicador gráfico de forma onda de la señal cuantificada.
- Señal de Error: Indicador gráfico de la forma de onda de error de cuantificación.
- Espectro de Frecuencia: Indicador grafico del espectro de frecuencia de la señal original y la cuantificada.
- Trama de bits: Indicador de forma de onda booleana de la trama de bits codificados.
- Señales del Sistema PCM: Indicador grafico mixto que tiene todas las señales involucradas en el proceso de PCM.

2. Basados en el diagrama de bloques del proceso de PCM de la Figura 7.1 o de la pestaña “Diagrama de Bloques”, procedemos a comprobar todas las señales obtenidas en cada paso de la obtención de la señal pulsos codificados. Se procederá a modificar las propiedades de la señal a través de los controladores numéricos con los valores a continuación indicados:

- Amplitud: 1V.
- Frecuencia 500 Hz.
- Frecuencia de Muestreo:10KHz.
- Niveles de Cuantificación: 4 niveles.

Los valores anteriormente indicados nos permitirán simular una señal sinusoidal de amplitud de 1 V y frecuencia de 500HZ; y se procederá a muestrear la misma con una tasa de 10KHZ, y estos valores muestreados serán cuantificados mediante un cuantificador uniforme.

En la Figura 7.8 se observa en la parte izquierda la señal original y a la derecha la señal cuantificada con la tasa de muestreo configurada anteriormente.

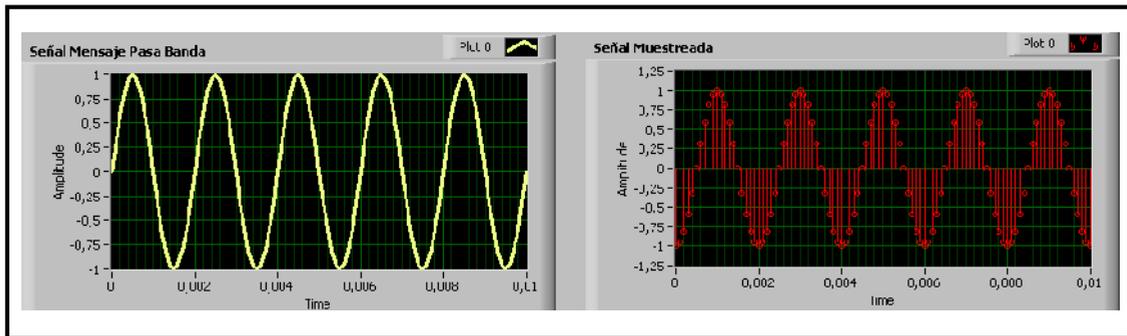


Figura 7.8. Señal de mensaje pasa banda (Izquierda), Señal Muestreada (Derecha).

3. A continuación observemos el resultado de la cuantificación de la señal muestreada anteriormente. Esto se puede observar ubicándonos en la pestaña “Señal Cuantificada”, Figura 7.9.

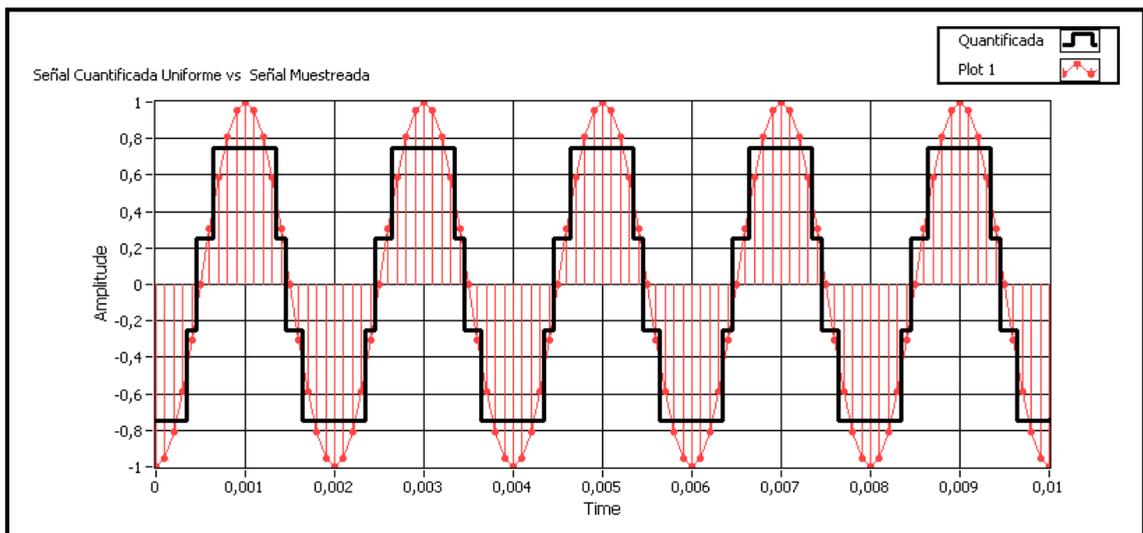


Figura 7.9. Señal Cuantificada (Negra) versus Señal Muestreada (Roja).

La Figura 7.9 muestra claramente el resultado de la cuantificación (señal negra) con 4 niveles, el cuantificador desplegado en la simulación es del tipo uniforme que quiere decir que los diferentes escalones poseen la misma altura, con esta cantidad de niveles obtenemos un error cuadrático medio de cuantificación de 0.86, este valor se obtiene del indicador numérico que se encuentra en la pestaña que estamos trabajando.

4. Al cuantificar la señal con 4 niveles, obtenemos un error de cuantificación que puede ser observado como una forma de onda, para observar esta señal de error

nos trasladaremos a la pestaña que tiene la etiqueta de “Señal de Error” Figura 7.10.

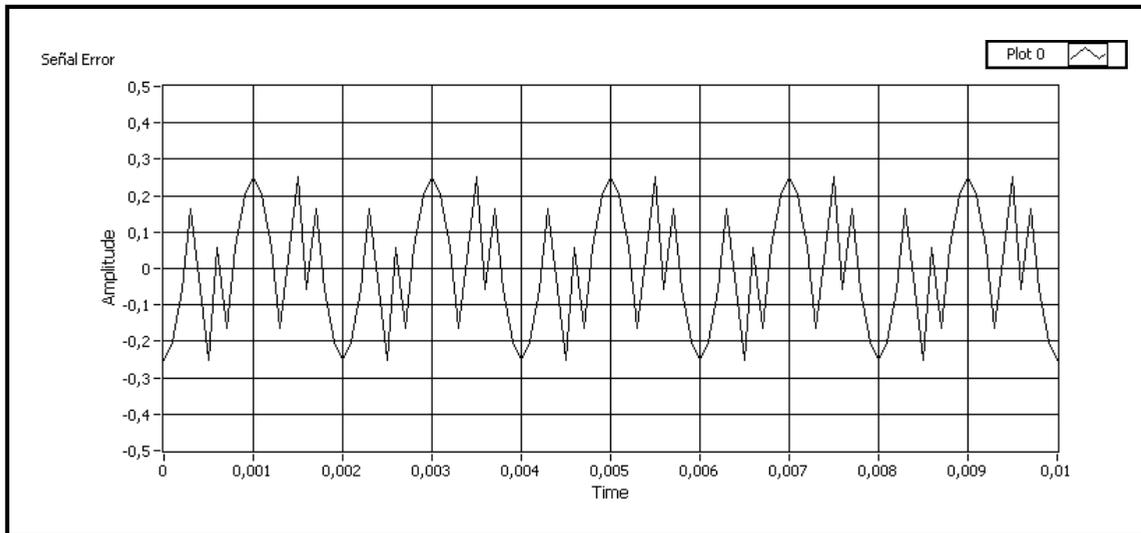


Figura 7.10. Señal de Error.

Como se puede ver la señal de error tiene diferentes picos pudiendo resaltar que en este ejemplo el valor pico positivo es de alrededor de 0.25 V.

5. Los niveles cuantificados ahora deberían ser codificados en binario. En este ejemplo nosotros poseemos 4 niveles de cuantificación lo que nos quiere decir que podemos obtener una representación de 2 bits esto se puede deducir de la formula:

$$2^n = \text{Niveles de cuantificación.}$$

$$2^n = 4$$

$$n=2.$$

Donde n es el numero de bits y 4 el número de niveles de cuantificación.

Para poder observar los bits obtenidos podemos trasladarnos a la pestaña que tiene la etiqueta “Trama de Bits” . Figura 7.11.

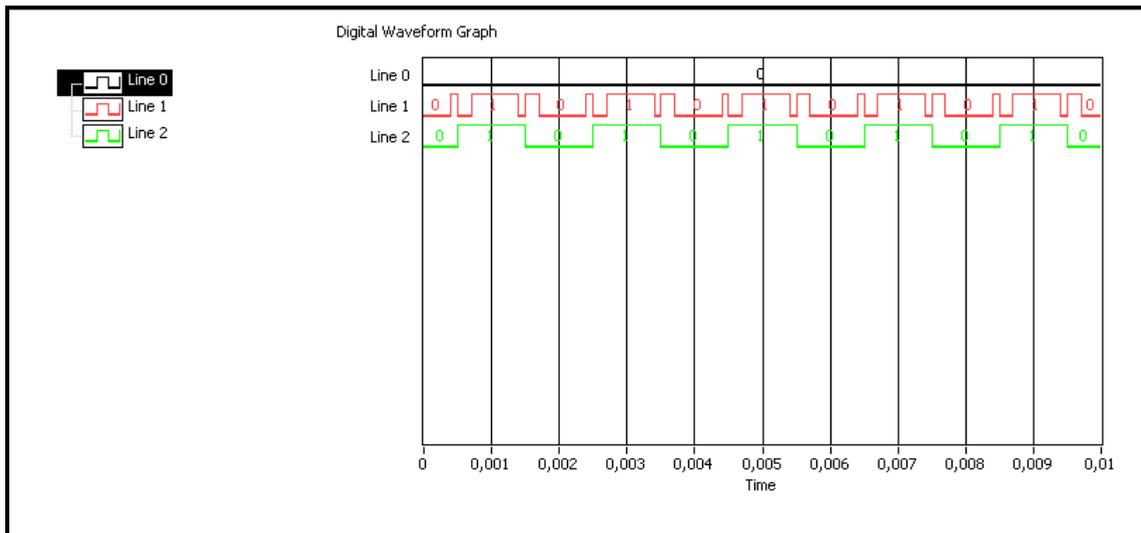


Figura 7.11. Trama de Bits.

6. Para poder comprobar el proceso completo de obtención de la señal PCM, trasladémonos a la pestaña “Señales del Sistema PCM (Resumen)” Figura 7.12. Aquí podemos ver claramente todas las señales obtenidas de este proceso y comprobar si los bits obtenidos son los correctos.

Se han marcado los diferentes niveles de cuantificación y comprobaremos los bits obtenidos:

- a. Primer escalón valor digital de 00.
- b. Segundo escalón valor digital de 01.
- c. Tercer escalón valor digital de 10.
- d. Cuarto escalón valor digital de 11.

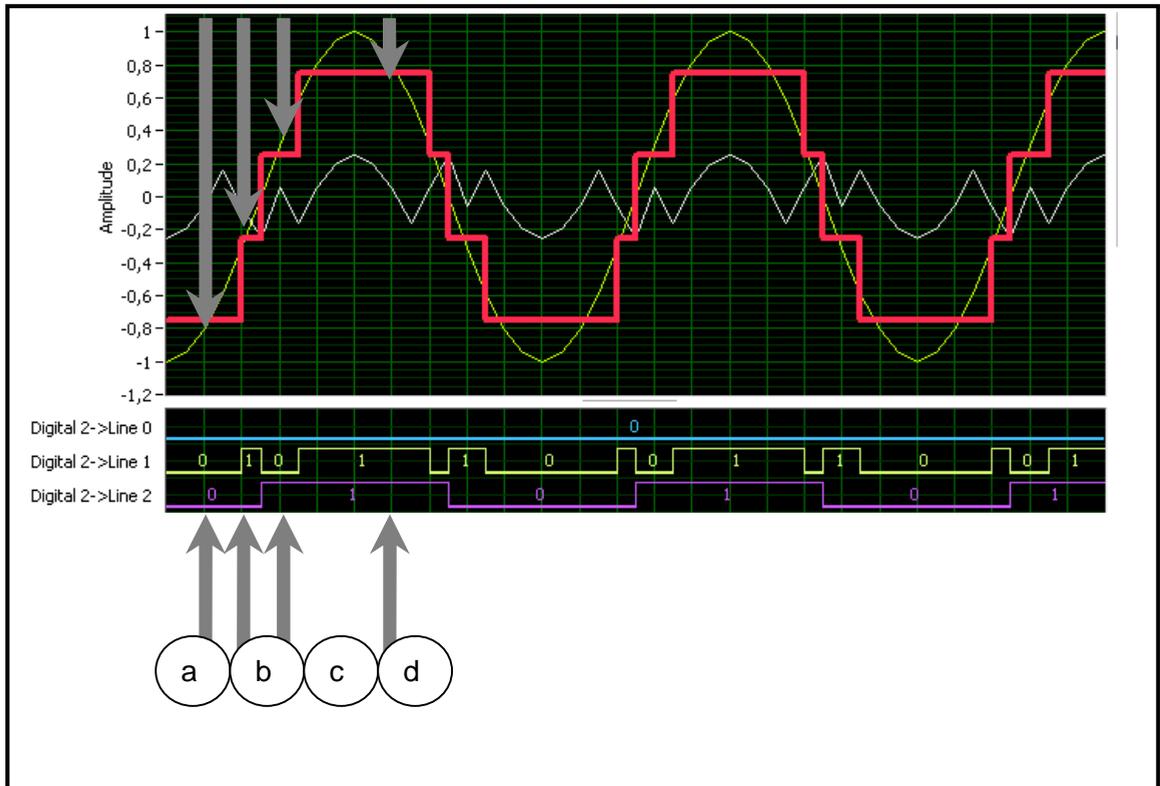


Figura 7.12. Comprobación Señales PCM.

7.4 Ejercicio de Aplicación.

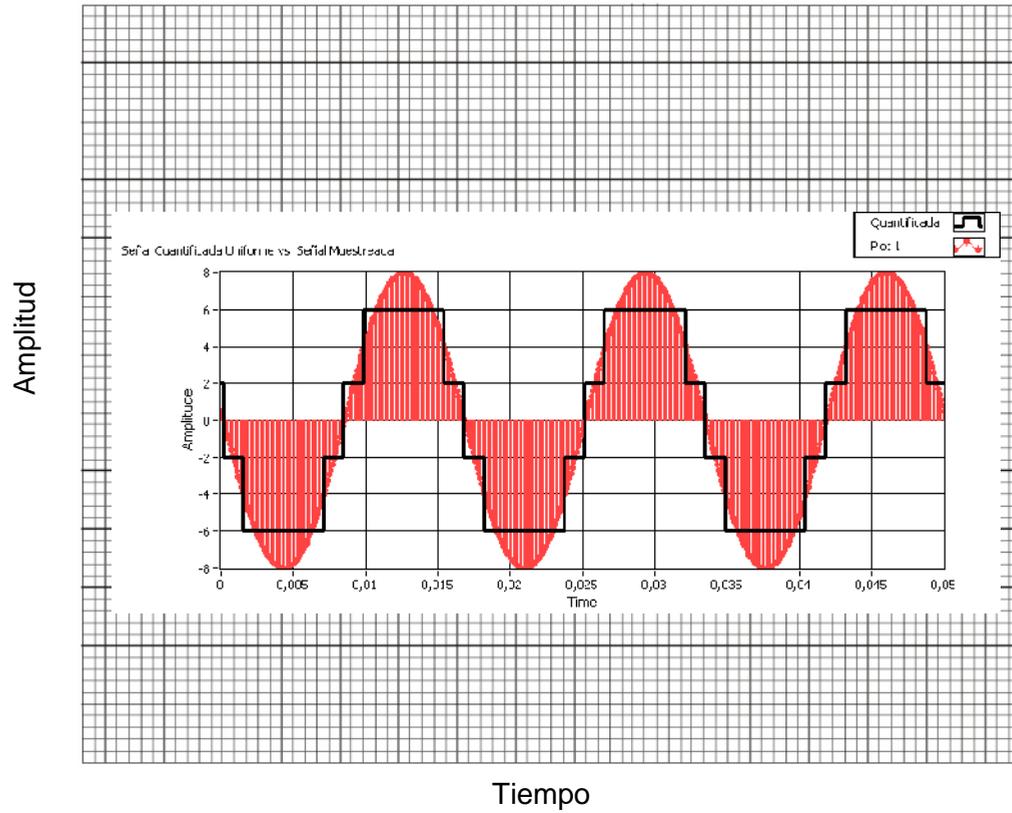
1. Abrir el instrumento virtual con el nombre de:

- Practica 7 – PCM.vi.

2. Modificar los parámetros del modulador con los datos a continuación:

- Amplitud: 8V.
- Frecuencia 60 Hz.
- Frecuencia de Muestreo:1KHz.
- Niveles de Cuantificación: 4 niveles.

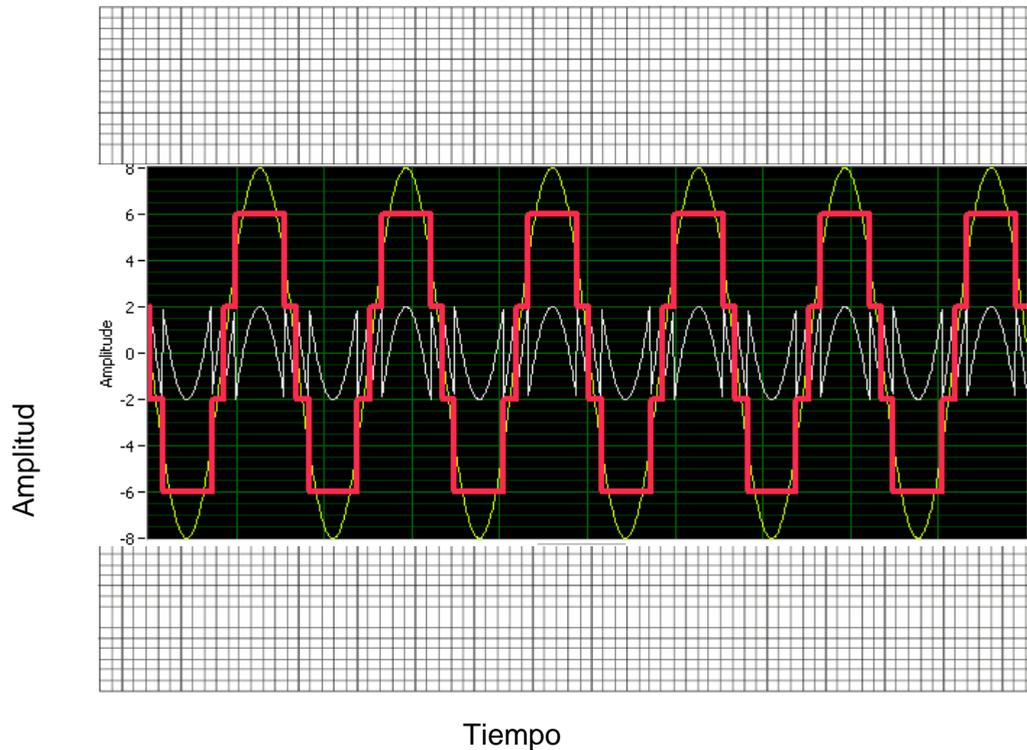
3. Graficar la señal PAM Cuantificada del sistema PCM vs Señal Mensaje.



4. Determinar el error cuadrático medio de la cuantificación:

Error: 112.97 V.

5. Graficar la Señal Cuantificada y la Señal de Error de Cuantificación.



7.5 Conclusiones:

En esta práctica se puede observar el proceso de digitalización de una señal, y el comportamiento de los diferentes pasos de la modulación PCM, y los errores que pueden ocurrir en cada uno de los mismos, se aprendió que es un esquema muy popular por su bajo costo de implementación en la actualidad.

CAPÍTULO 4:

Modulaciones Digitales.

PRACTICA 8

Tema: Sistemas de Modulación Digitales Binarias Modulación por Desplazamiento de Amplitud ASK

8.1 Objetivos

- a. Repasar los conceptos básicos de los esquemas de modulación digital por desplazamiento de amplitud ASK.
- b. Analizar el comportamiento del esquema ASK en el dominio del tiempo y frecuencia.
- c. Aprender a interpretar los Diagramas de Ojo.

8.2 Introducción

Al modular se modifica la amplitud, la frecuencia o la fase de una portadora que puede ser una senoide, en función del mensaje. En el caso de que el mensaje sea una señal binaria esto se denomina modulación por cambio de amplitudes (ASK=Amplitude Shift Keying), modulación por cambio de frecuencias (FSK= Frequency Shift Keying) o modulación por cambio de fase (PSK= Phase Shift Keying).

A continuación analizaremos las características más resaltantes de la modulación ASK como son: La potencia, el espectro, el ancho de banda, y la probabilidad de error.

8.3 Modulación por cambio de Amplitudes (ASK Amplitude Shift Keying)

Es la técnica de modulación digital más simple, es la modulación digital de amplitud, ya que el parámetro que se varía de la portadora es la amplitud. Como el mensaje es binario, entonces la amplitud de la senoide varía entre dos valores posibles. Un caso especial de esta modulación es cuando uno de los dos valores posibles es

cero, por lo que la modulación toma el nombre de OOK (On-Off Keying): Aquí la portadora se considera encendida (Valor de Amplitud V para el bit 1) o apagada (supresión de la portadora para el bit 0).

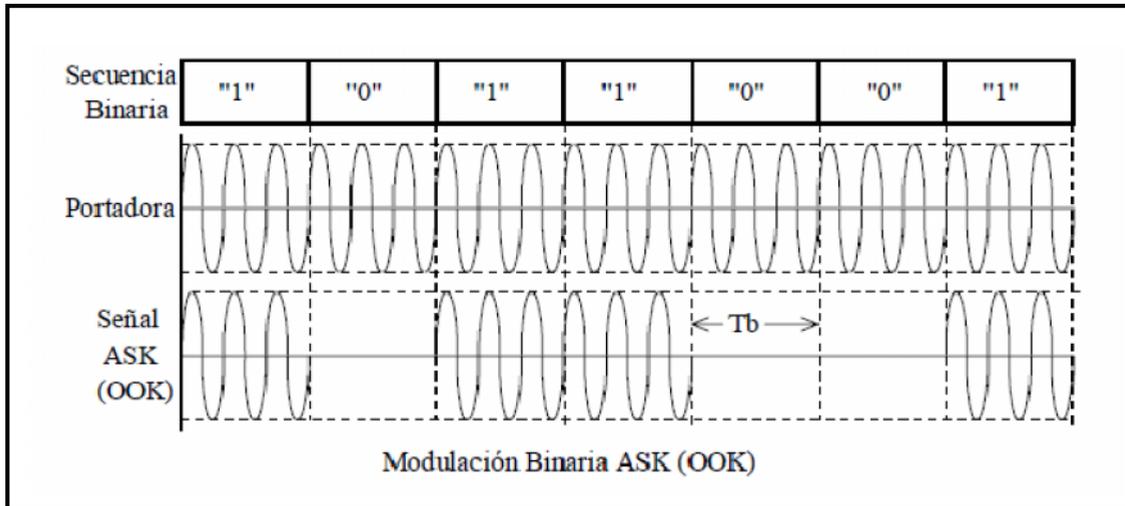


Figura 8.1 Modulación Binaria ASK (OOK).

(Fuente: BRICEÑO, Comunicaciones ULA, 2010, Pág. 11)

Una ecuación que define este tipo de modulación digital es:

$$X_{ASK}(t) = (1 + b(t)) \left(\frac{V}{2} \cos (w_c t) \right)$$

Donde:

$X_{ASK}(t)$ = Señal Modulada.

$b(t)$ = Señal Binaria Moduladora (Volts). Puede Tomar dos valores: +1 cuando el bit enviado es 1, -1 cuando el bit enviado es 0.

V= amplitud de la señal portadora (Volts).

w_c = Frecuencia de la señal portadora.(radianes por segundo).

Entonces tenemos que si $b(t) = 1$:

$$X_{ASK}(t) = (V \cos (w_c t))$$

Pero, si $b(t)=-1$:

$$X_{ASK}(t) = 0$$

Para hallar el espectro de la señal modulada OOK es necesario hacerle la transformada de Fourier a la función de auto correlación.

$$X_{ASK}(t) \rightarrow G_{ASK}(f)$$

$$X_{ASK}(t) \rightarrow \frac{V^2}{16} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c) + t_b \text{Sinc}^2((f + f_c)t_b) + t_b \text{Sinc}^2((f - f_c)t_b)]$$

Al graficar, tenemos que:

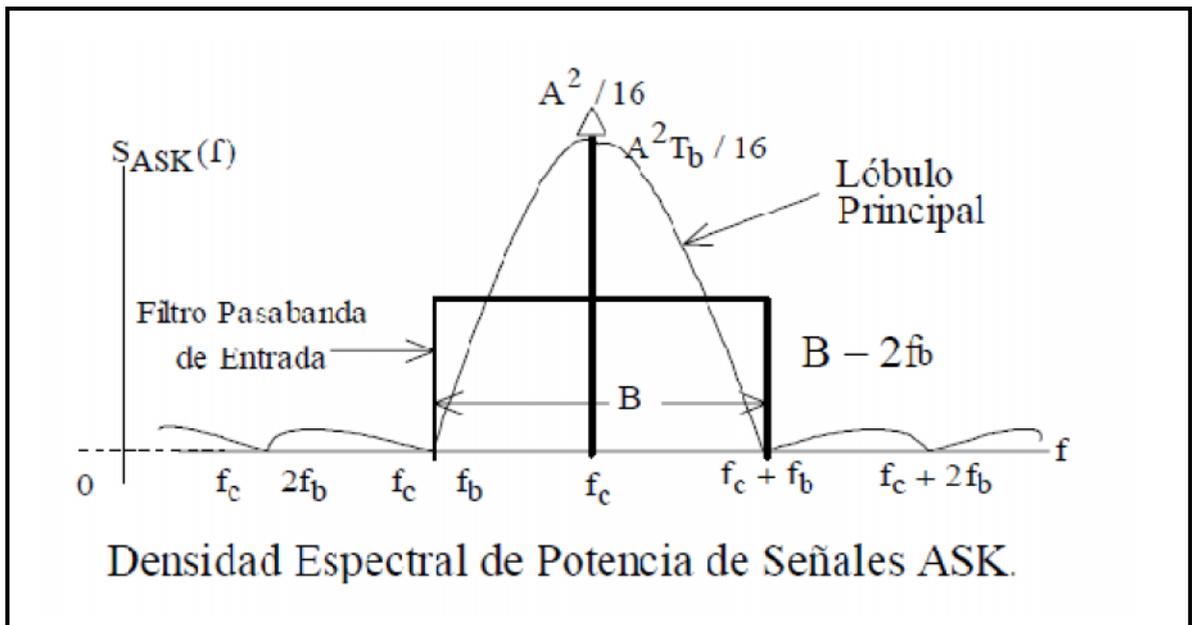


Figura 8.2 Densidad Espectral de Potencia ASK.

(Fuente: BRICEÑO, Comunicaciones ULA, 2010, Pág. 12)

La potencia puede obtenerse integrando la Densidad Espectral de Potencia o a partir de la señal en tiempo. Para equiprobabilidad la potencia resultaría V/4. El Ancho de banda puede determinarse a partir del espectro:

$$BW = f_c + f_b - (f_c - f_b) = f_c - f_c - 2f_b = 2f_b$$

Finalmente, se puede representar la señal modulada en OOK a partir de la constelación. Se define entonces la base para representar la señal:

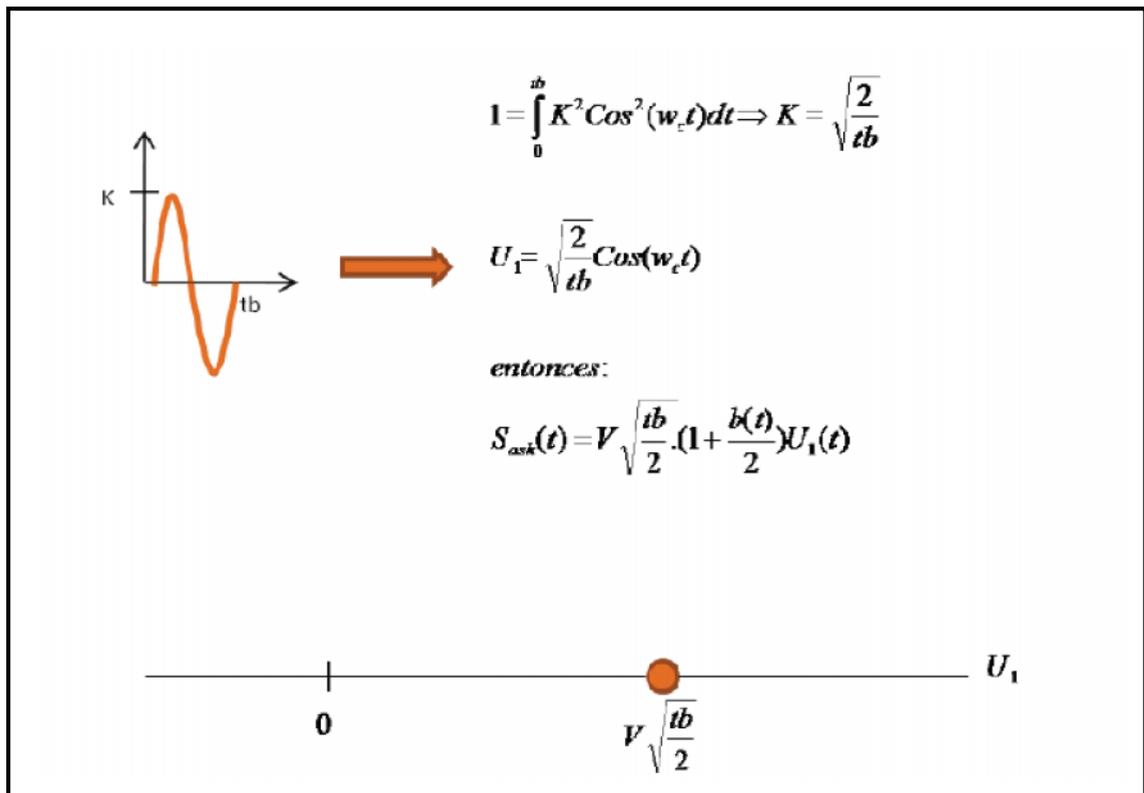


Figura 8.3 Constelación de ASK (OOK).

(Fuente: MEZOA, Laboratorio Digital Interactivo, 2011, Pág.32)

8.4 Características de la Modulación Digital en el Espectro

8.4.1 Filtrado del Canal

Una particularidad del espectro en la transmisión digital es que en un instante de tiempo todo el espectro transmitido le corresponde al mismo bit (canal de información). En cambio en la transmisión analógica el espectro en cada instante lleva información de cada uno de los canales que componen la multiplexión en frecuencia FDM.

El espectro de la señal digital antes del modulador es recortado mediante un filtro pasa bajos; luego del modulador se filtra mediante un filtro pasa banda. El espectro de la señal de banda base o de frecuencia intermedia consiste en una envolvente del tipo sinc f (sen f/f). El número de armónicas contenidas por la envolvente depende de la periodicidad de la señal. La separación entre ellas corresponde a la inversa del período expresado en segundos.

Cuando se limita la banda del canal el espectro transmitido se ve truncado y el pulso rectangular se extiende en el tiempo. Una señal rectangular en el tiempo tiene

asociado un espectro infinito en la frecuencia; en cambio, un espectro limitado en frecuencia tiene asociada una señal no limitada en el tiempo. Se produce la interferencia inter símbolo ISI producto de la superposición de las "colas" de un pulso sobre adyacentes.

La ISI se anula cuando la frecuencia de corte W del filtro es igual a la mitad de la velocidad de transmisión expresada en Hz. En la Figura 8.4 se encuentra la explicación conceptual: un espectro aproximadamente rectangular tiene asociado una señal similar a sinc t ; si se cumple $W = V_{tx}/2$ el punto de anulación de la función sinc t ocurre en el centro de los pulsos adyacentes, eliminando la interferencia del pulso sobre los otros.

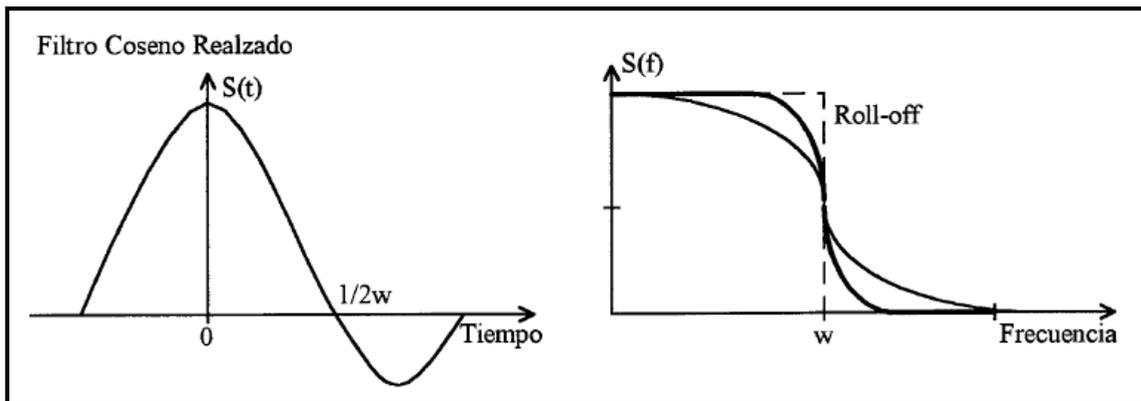


Figura 8.4 Filtro Coseno Alzado en el dominio del tiempo (i) y en el dominio de la frecuencia (d).

(Fuente: BRICEÑO, Comunicaciones ULA, 2010, Pág. 6)

El filtrado se realiza mediante la transferencia coseno levantado. Dicha transferencia se muestra en la misma Figura 8.4 y tiene la particularidad que mantiene la ISI acotada a un mínimo y es "realizable" electrónicamente.

El coeficiente Roll off es un parámetro de diseño del filtro. Cuando el Roll off tiene a cero se acorta la banda y se tiende al filtrado ideal. El valor máximo posible es uno. Generalmente se indica el valor del Roll off como un número (típico 0,2 a 0,7) o un porcentaje (20 a 70%). Los filtros en banda base se realizan mediante filtros digitales y en frecuencia intermedia mediante filtros L-C o de Onda Acústica Superficial SAW.

8.4.2 Ancho de Banda

Existen varios criterios para la definición del ancho de banda que ocupa un canal. La Figura 8.5 muestra las siguientes definiciones:

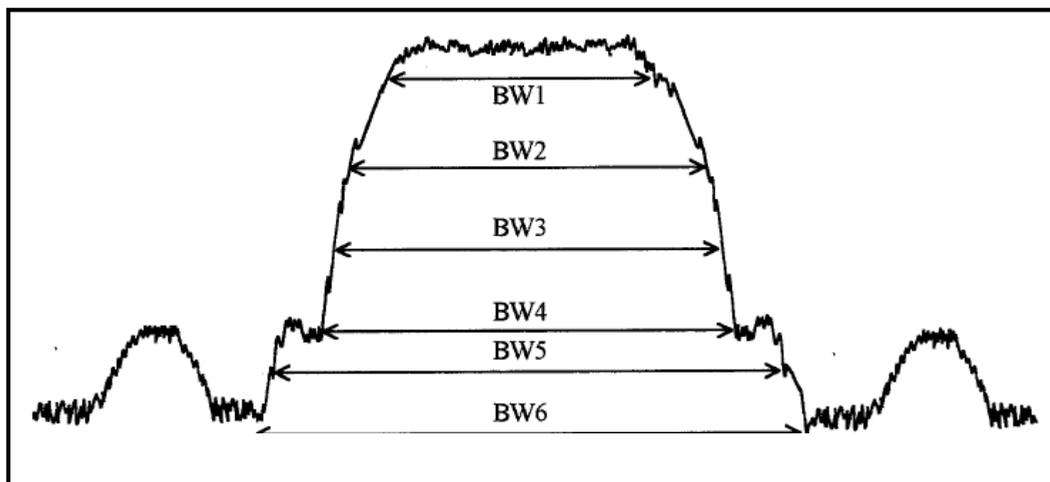


Figura 8.5 Anchos de Banda que ocupan un canal Digital.
(Fuente: BRICEÑO, Comunicaciones ULA, 2010, Pág. 30)

Ruido	BW1	El ancho de banda equivalente de ruido se trata de un espectro rectangular de ruido con igual valor de potencia que el espectro digital completo.
3 dB	BW2	El ancho de banda a mitad de potencia donde se tiene una atenuación de 3 dB respecto del valor máximo en el centro del espectro.
-50 dB	BW3	El ancho de banda con densidad de potencia delimitada consiste en declarar un umbral entre 35 y 50 dB respecto del máximo en la portadora por debajo del cual se encuentra la densidad de potencia.
Nyquist	BW4	El ancho de banda de Nyquist corresponde a la frecuencia de corte del filtrado ideal $W=V_{tx}/2$.
Nulo	BW5	El ancho de banda al primer punto de anulación del espectro corresponde al primer lóbulo coincidente con $1/T$ (T es el tiempo de duración del pulso).
99%	BW6	El ancho de banda que contiene la mayoría de la potencia es, por ejemplo, el 99% de la potencia total. La Federación de Comunicaciones de Estados Unidos adopta este criterio.

Tabla 8.1 Definiciones alternativas de Ancho de Banda.

8.5 Errores de Sincronización y Análisis en los Sistemas Digitales

La sincronización es uno de los factores más importantes en los sistemas digitales. La fiabilidad y exactitud de las comunicaciones digitales son basadas en la calidad de su sincronismo. En mundo real de los sistemas de comunicaciones digitales, existen numerosos errores de temporización. Dos de los más importantes son el Jitter y Drift.

8.5.1 Jitter

“Jitter” es un término utilizado en el dominio digital, aún si sus causas y efectos resultantes sean muy parecidos a los de naturaleza análoga. La información binaria es transmitida como bits en un flujo de datos de unos y ceros aleatorios. De manera ideal estos bits estarán estrictamente a disposición en un cierto momento y estarán presentes exactamente para un periodo predeterminado. Más aún, tendrán niveles altos y bajos uniformes. Desafortunadamente, el mundo real está muy lejos de ser ideal. Los diseñadores tienen que batallar contra una variedad de factores influyentes y la calidad de la señal de datos transmitidos que son una fuente de jitter. Comúnmente el Jitter es reconocido como una cantidad de alta frecuencia. El comportamiento del jitter a frecuencias por debajo de 10 Hz es llamado “wander” y “drift” aún a frecuencia más bajas.

A pesar de ser una preocupación en sistemas síncronos de gran escala, el “wander” y el “drift” son irrelevantes en sistemas síncronos ya que son fácilmente rastreados por las unidades de recuperación de información de reloj. Los sistemas asíncronos utilizan relojes de referencia independientes para los transmisores y los receptores. La frecuencia de reloj necesaria en el receptor serial es extraída del flujo de datos entrante, donde las transiciones de bit son utilizadas para sincronizar el oscilador controlado por voltaje (VCO) por medio del lazo de enganche de fase de la unidad de recuperación de información del reloj (CDR).

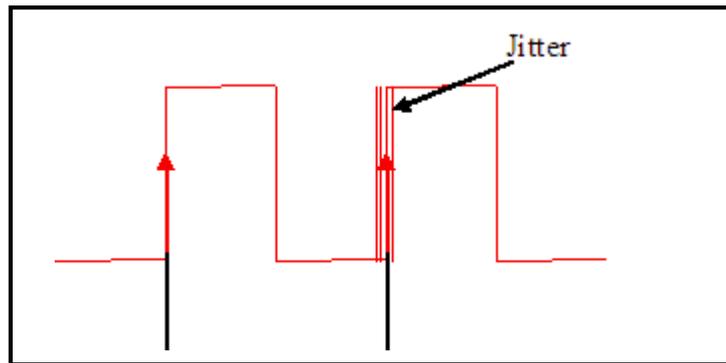


Figura 8.6 Ejemplo de Jitter.

(NATIONAL INSTRUMENTS. Digital Waveform Timing [en línea]. Austin Texas. [Consulta: 15 Abril 2011]. Disponible en internet. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3299>>)

8.5.2 Medición de Jitter: Diagrama de Ojo y BER

¿Cómo medir los flujos de datos de alta velocidad y analizar la integridad de los flujos de datos transmitidos o recibidos? La manera común de llevar a cabo esta medición es determinando la tasa de error de bit (BER). Un flujo de bits (pseudo-) aleatorio es inyectado en el dispositivo bajo prueba (DBP). La salida del DBP es comparada con el patrón de datos conocido y se cuentan los posibles errores de bit:

$$\text{BER} = \text{NErr} / \text{NBits}$$

Donde BER es la tasa de error de bit medida, NErr el número de bits errados y Nbits el número total de bits comparados. Esto requiere de un equipo de medición muy sofisticado que permita la comparación de la amplitud y tiempo de transición de cada bit y ofrezca una capacidad de ajuste del retardo de la propagación de la señal vinculado al DBP. La condición ideal se usa como referencia para medidas de jitter y se llama intervalo unidad (IU):

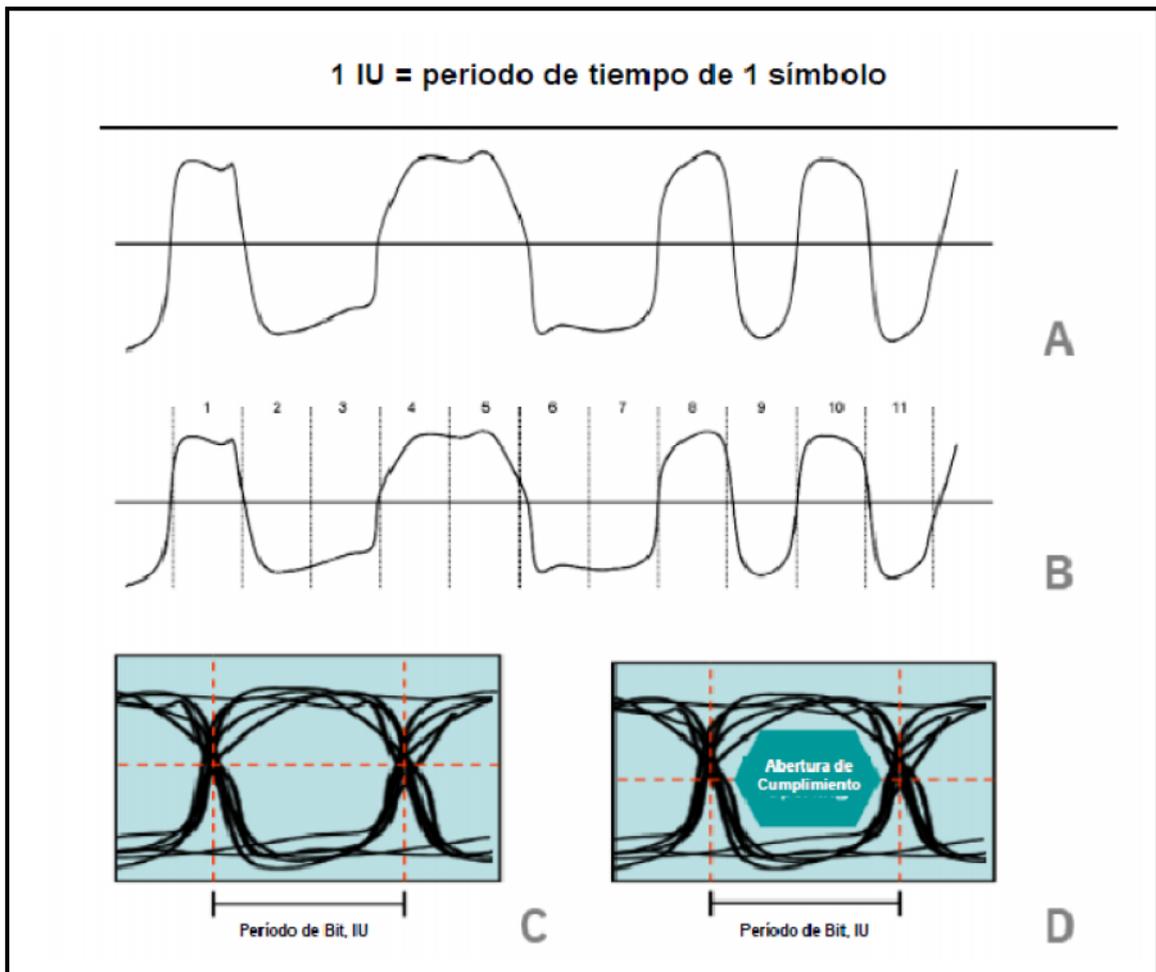


Figura 8.7 El diagrama de ojo presenta el comportamiento de flujos muy largos de datos en una ventana de 2IU. El flujo de datos completo está envuelto dentro de la ventana. El diagrama de ojo permite la determinación del cumplimiento de una señal con los requerimientos definidos por el estándar tecnológico. El eje X en los diagramas de ojo C y D está ensanchado en un factor de 2.5 para una mejor resolución.

(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Digital Waveform Timing [en línea]. Austin Texas. [Consulta: 15 Abril 2011]. Disponible en internet. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3299>>)

El tiempo de transición y la amplitud (diferencial) influyen en el resultado de las mediciones y determinará el valor binario de un bit en particular. Instrumentos de prueba de BER especiales u osciloscopios representan el flujo total de datos a través de un diagrama de ojo. Todos los bits medidos son mostrados al mismo tiempo. Mientras la tecnología de medición debe ser sofisticada debido a las altas velocidades de los datos y niveles de señal relativamente bajos, el principio de creación de un diagrama de ojo es muy simple (Figura. 8.7). En nuestro ejemplo, un flujo de datos (A) es cortado en incrementos iguales: I1 a I11 (B), cada uno del

tamaño de un periodo de bit, lo que por definición significa 1 IU. Para permitir un análisis detallado de las partes más importantes de la señal – las transiciones – en incrementos de 2IU; se graban periodos de 0.5 IU para pre-transición, de 1IU para muestra de bit y de 0.5 IU para post-transición y se superponen en una ventana de 2IU de ancho. El resultado es el diagrama de ojo que se muestra en (Figura 8.5 C).

8.5.3 Diagrama de Ojos

Un diagrama de ojos es construido observando las salidas de un transmisor digital sobre tres periodos de tiempo. Estos tres periodos de tiempo son tres periodos del reloj del sistema principal, t_p , demarcado por la línea entre puntada de color azul en las Figura 8.8. Si la salida del transmisor son tres valores 0 lógicos se puede observar el comportamiento será como las líneas verdes en la Figura 8.8. Un diagrama de ojos, mostrado en la Figura 8.8 es construido al sobre montar todas las posibles combinaciones de ceros y unos lógicos. (0 1 1 en rosado, 1 1 0 en amarillo, 0 0 1 en azul, 10 0 0 en verde) en una sola gráfica.

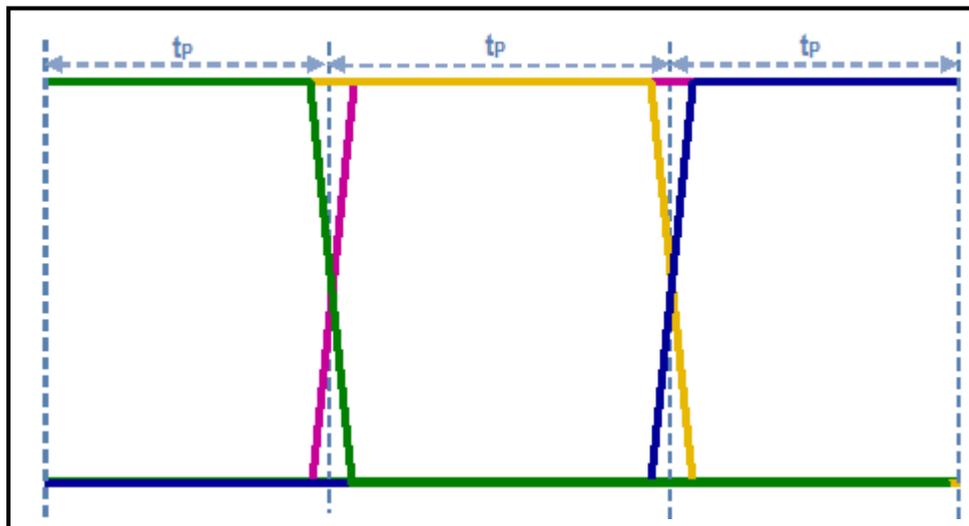


Figura 8.8 Ejemplo de Diagrama de Ojos.

(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Digital Waveform Timing [en línea]. Austin Texas. [Consulta: 15 Abril 2011]. Disponible en internet. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3299>>)

El diagrama de ojos es una herramienta de sincronización que proporciona al usuario una buena visualización de los errores en los niveles y en la sincronización. Figura 8.9. En la vida real, errores como Jitter son difíciles de cuantificar, entonces el diagrama de ojos es una buena herramienta, para encontrar el máximo Jitter

como un error de voltaje, como estos errores incrementan, el espacio en blanco en el centro del diagrama de ojos disminuye de tamaño. Estos espacios son definidos como características de tamaño de ojo y ancho de ojo.

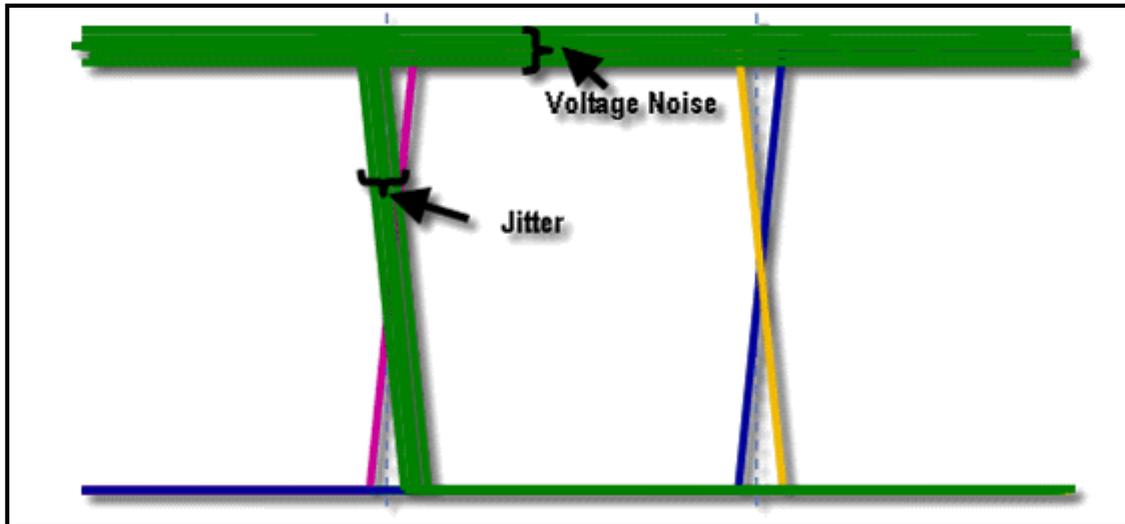


Figura 8.9 Jitter y Errores de Voltaje visto desde un diagrama de ojos.

(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Digital Waveform Timing [en línea]. Austin Texas. [Consulta: 15 Abril 2011]. Disponible en internet. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3299>>)

El ancho del espacio en blanco del final del diagrama de ojos es llamado sencillamente anchura del ojo. Si un diagrama de ojos es compuesto por algunas muestras (millones y millones de periodos de transición), el ancho del ojo es una buena medición de la cantidad de tiempo, en cualquier periodo dado, que las líneas de datos son estables. Esto puede ser una buena idea de cuánto tiempo en la configuración y espera son permisibles.

La altura del espacio en blanco del diagrama en ojo final se llama la altura de los ojos. Si un diagrama de ojo se compone de las muestras suficientes (en millones y millones de tres transiciones período de tiempo), la altura de los ojos puede decir que el receptor de VIH y VIL deben ser muestreados correctamente.

La mejor calidad de la transmisión de señales digitales, el espacio en blanco más abierta que debería estar en el ojo. Dicho de otra manera, el ancho de los ojos y la altura de los ojos deben ser tan grandes como sea posible.

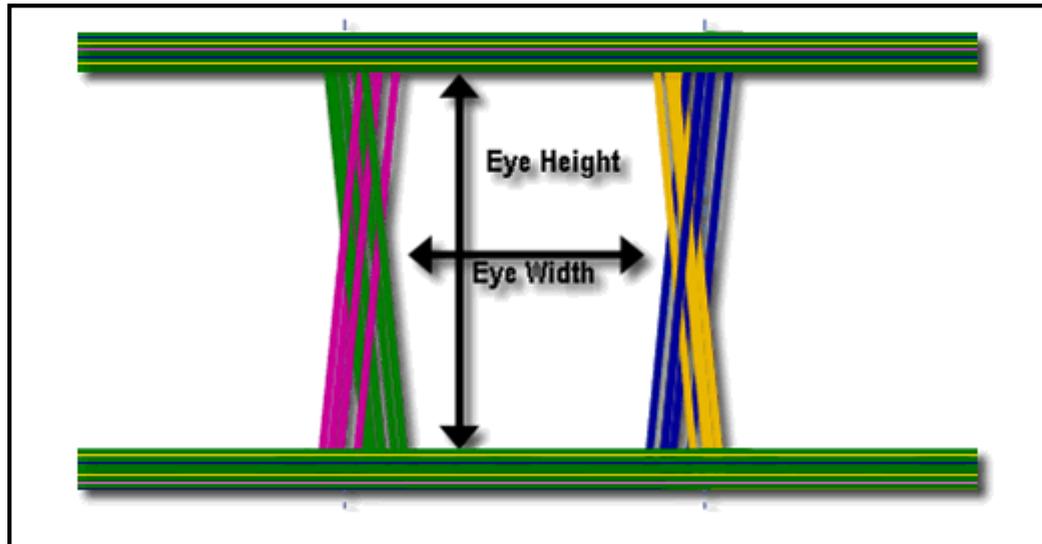


Figura 8.10 Ancho y Alto de un Diagrama de Ojos.

(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Digital Waveform Timing [en línea]. Austin Texas. [Consulta: 15 Abril 2011]. Disponible en internet. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3299>>)

8.5.4 Ejemplos de Análisis de sincronización de Señales Digitales

Un diagrama de ojo real es mostrado en la Figura 8.11, es un grafico de intensidad de las transiciones sobre montadas por un digitalizador de alta velocidad. El color del gráfico es una medición del porcentaje de transiciones superpuestas para cualquier pixel. El diagrama de ojos mostrado en la Figura 8.9 representa lo siguiente:

1. Punto de cruce de las transiciones de datos sobre montados del VIH del receptor. Esto es el tiempo más temprano que puede ocurrir para garantizar un muestreo confiable. Si el reloj fuera muy temprano, la línea de dato podría todavía se cambiado durante el tiempo del periodo de establecimiento. En este sistema el VIH es el voltaje de nivel de limitación.
2. Esta intersección marca el punto valido para el tiempo de reloj de afirmación + el tiempo de espera.
3. Tiempo de establecimiento del Receptor.
4. Tiempo de espera del Receptor.
5. Porcentaje bajo de transiciones sobre puestas.

6. Porcentaje alto de transiciones.

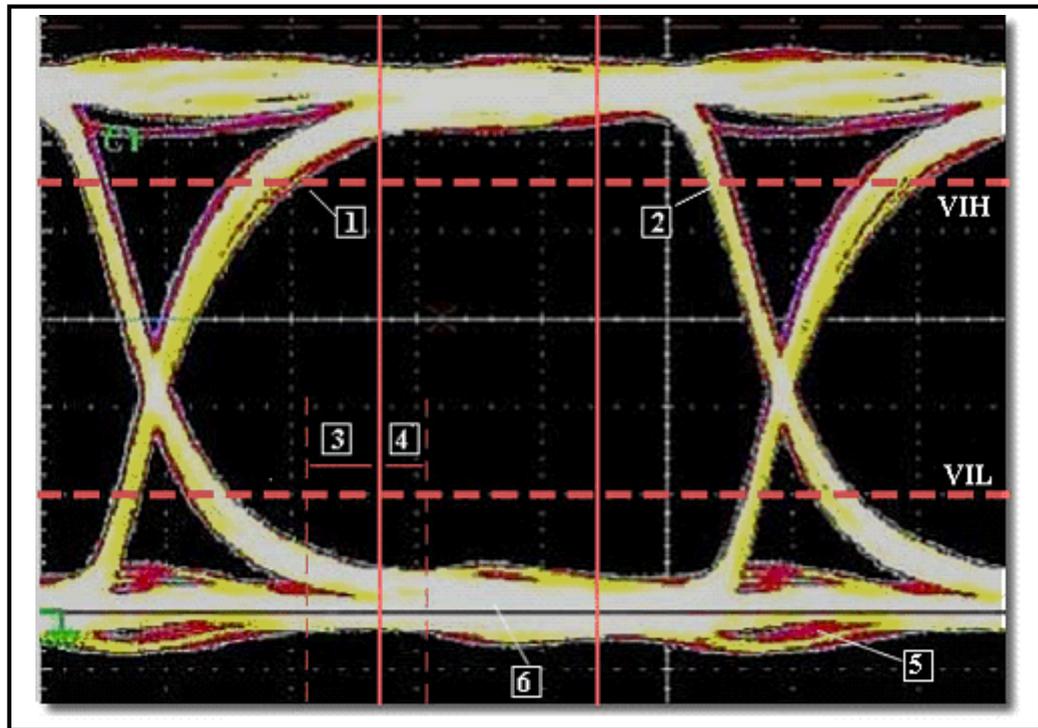


Figura 8.11 Captura de un Diagrama de Ojos real.

(Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. Digital Waveform Timing [en línea]. Austin Texas. [Consulta: 15 Abril 2011]. Disponible en internet. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3299>>)

8.5.4.1 Resumen del Diagrama de Ojos

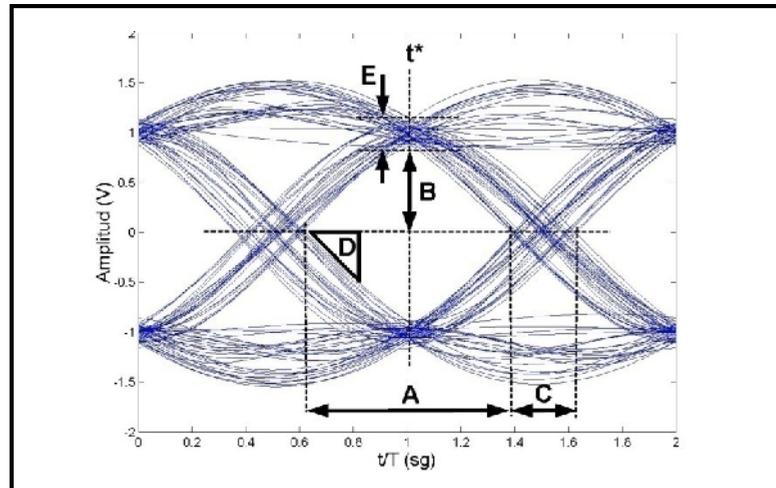


Figura 8.12. Diagrama de ojo.

(NATIONAL INSTRUMENTS. Digital Waveform Timing [en línea]. Austin Texas. [Consulta: 15 Abril 2011]. Disponible en internet. <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3299>>)

- A:** Intervalo de tiempo en el que se puede muestrear la señal para decidir.
- B:** Margen de ruido
- C:** Distorsión de los cruces por cero
- D:** Pendiente: Sensibilidad a errores en el instante de muestreo
- E:** Distorsión máxima
- t*:** Instante óptimo de muestreo medido con respecto al origen de tiempos. Si el período de símbolo es T_s , la forma de onda se muestreará en t^* , en t^*+T_s , t^*+2T_s ,... para recuperar la información transmitida.

8.5.5 E_b/N_0

E_b/N_0 (relación energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido) es un parámetro importante en comunicaciones digitales y transmisión de datos. Es una medida de la SNR (relación señal a ruido) normalizada, y también se conoce como "SNR por bit". Es especialmente útil cuando se comparan las BER (bit error ratio) de distintos esquemas de modulación digitales, sin tener en cuenta el ancho de banda. Es una magnitud adimensional.

a. Controles numéricos de configuración del modulador ASK con las siguientes propiedades:

- Symbol Rate (Hz): Tasa de símbolos, especifica cuantas veces cambia de estado una señal digital en un periodo de tiempo.
- Carrier Frequency(Hz): Frecuencia de la portadora analógica.
- M-ASK: Control que permite modificar el esquema ASK a simular, en esta práctica se simulara un sistema 2-ASK o ASK binario, el cual solo dispone de dos representaciones de símbolos.
- Pulse shapping filter: Control que nos permite elegir entre algunos filtros de forma de pulso.
- Impedimentos: Control numérico que nos permitirá agregar algún tipo de impedimento en la modulación, este valor hace referencia al E_b/N_0 (relación energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido).

b. Pestañas de indicadores de gráficos de forma de onda entre las representaciones tenemos:

- Formas de onda: Representaciones de la señales ASK en el dominio del tiempo.
- Constelación: Indicador gráfico del diagrama de constelación de ASK.
- Espectro de Potencia: Indicador gráfico del espectro de potencia de la señal ASK.
- Diagrama de Ojos: Indicador gráfico del diagrama de ojos.
- Bits Trasmitidos: Indicadores de los arreglos de bits trasmitidos.

2. Configuremos los controles numéricos con los siguientes valores:

- Symbol Rate (Hz): 200KHz.
- Carrier Frequency(Hz): 1MHz.
- M-ASK: 2(Binario).
- Pulse Shaping filter:None(Ninguno).
- Impedimentos (E_b/N_0)=50.

3. Al modificar los parámetros anteriores obtenemos las siguientes formas de ondas
Figura 8.14.

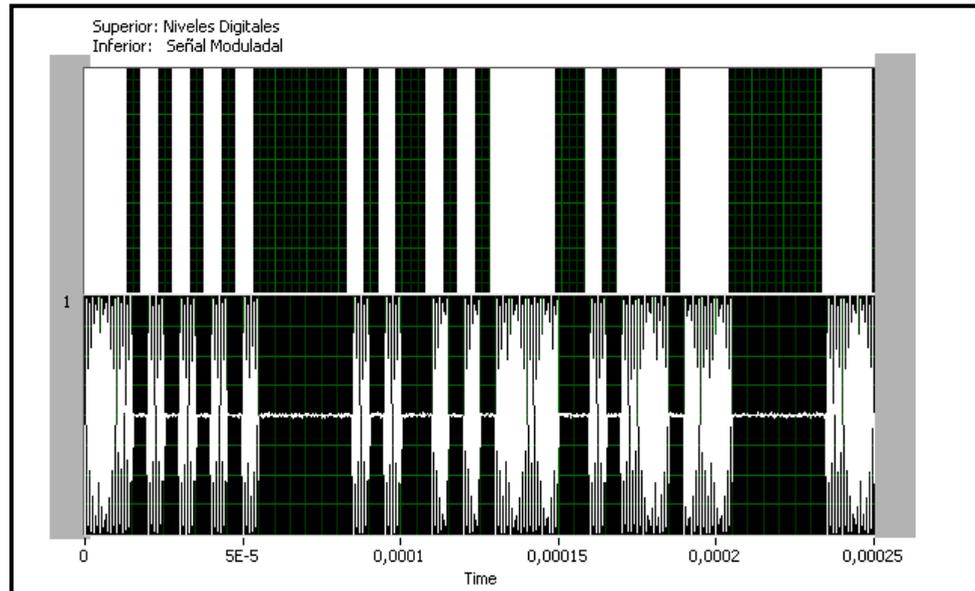


Figura 8.14. Señal ASK en el dominio del tiempo.

En la Figura 8.14 se observa claramente dos señales la primera (superior) una señal digital la cual representa la señal de mensaje digital, que tiene dos niveles de voltaje esto porque estamos estudiando la modulación ASK binaria. La segunda señal (inferior), representa la señal de la portadora modulada en ASK, se nota claramente que se tiene dos amplitudes en la señal de la portadora modulada, estas amplitudes son la que representa a los símbolos altos que desplaza en amplitud a la portadora en un voltaje de 1V y la amplitud de 0V que representa los símbolos bajos de la señal de mensaje. Esto nos muestra que la señal binaria ASK dispone solamente de dos desplazamientos de amplitud.

4. A continuación observaremos la representación en constelación de la señal ASK transmitida Figura 8.15.

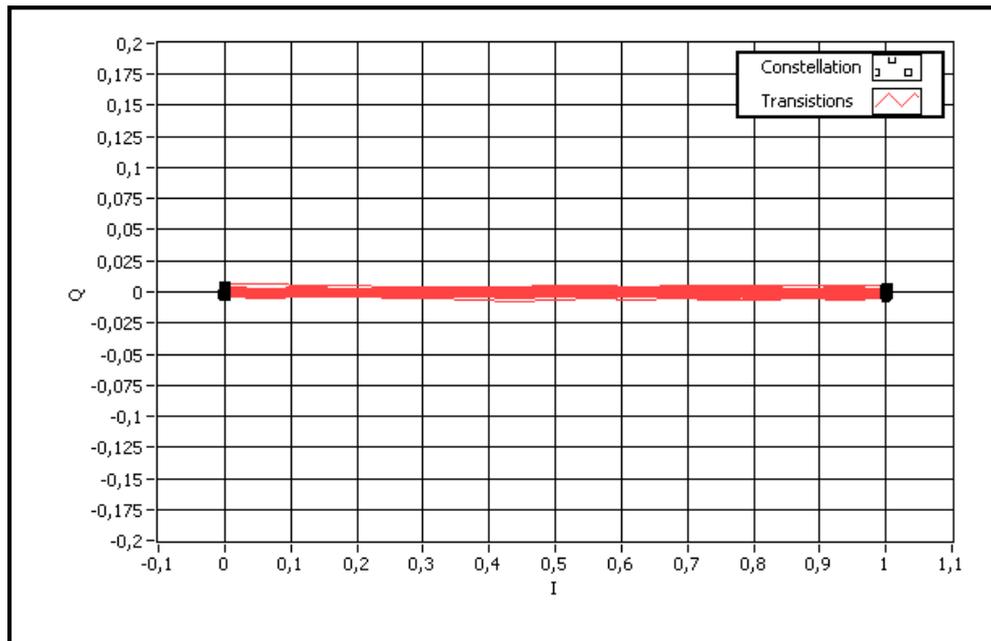


Figura 8.15. Diagrama de constelación de ASK.

La Figura 8.15 se muestra claramente la representación de los símbolos del modulador ASK binario, lo que quiere decir que deberíamos tener solamente la representación de dos símbolos en el diagrama de constelación.

En este caso es un canal de transmisión ideal, sin ruido ni interferencias, todos los símbolos son reconocidos por el demodulador sin errores. Como se observa claramente en la Figura 8.15 los símbolos son representados en el diagrama de constelación como puntos bien definidos que impactan en la misma zona formando un punto muy concentrado, esto quiere decir que el modulador está obteniendo de forma correcta los símbolos.

5. En este punto, nos ubicaremos en la pestaña de espectro de potencia, donde podemos observar la densidad espectral de potencia de la señal ASK. Figura 8.16.

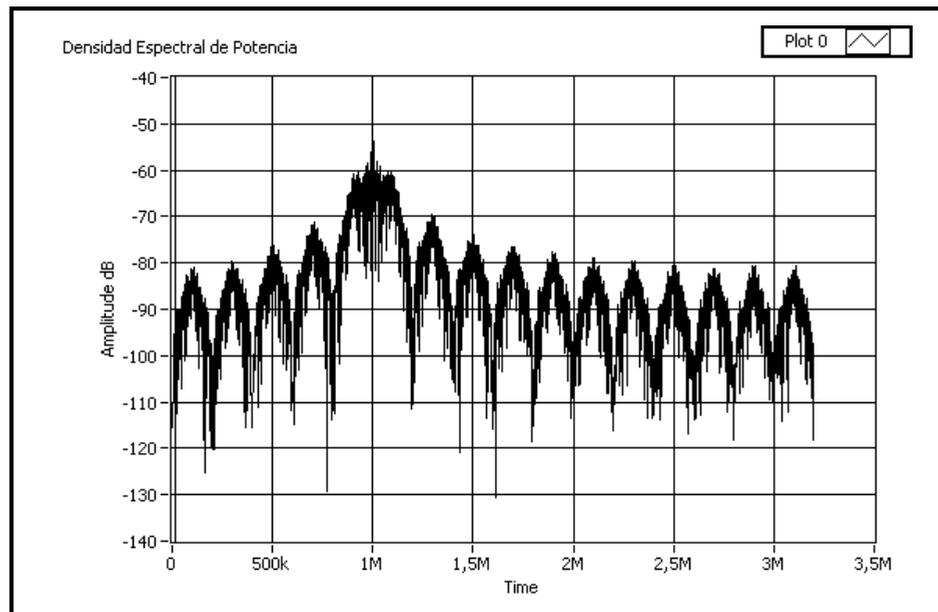


Figura 8.16. Densidad Espectral de Potencia de ASK.

A partir de la Figura 8.16, podemos obtener la Densidad Espectral de potencia de la señal que en este ejemplo tiene un valor de aproximadamente -55dBm , y comprobar el ancho de banda.

Para comprobar el ancho de banda, utilizaremos los cursores del indicador de gráfico de forma de onda, para ubicarnos en el área del gráfico donde se nota claramente que el 99% de la potencia de la señal se encuentra.

Ubicar los cursores de color amarillo sobre el gráfico de la densidad espectral como muestra la Figura 8.17

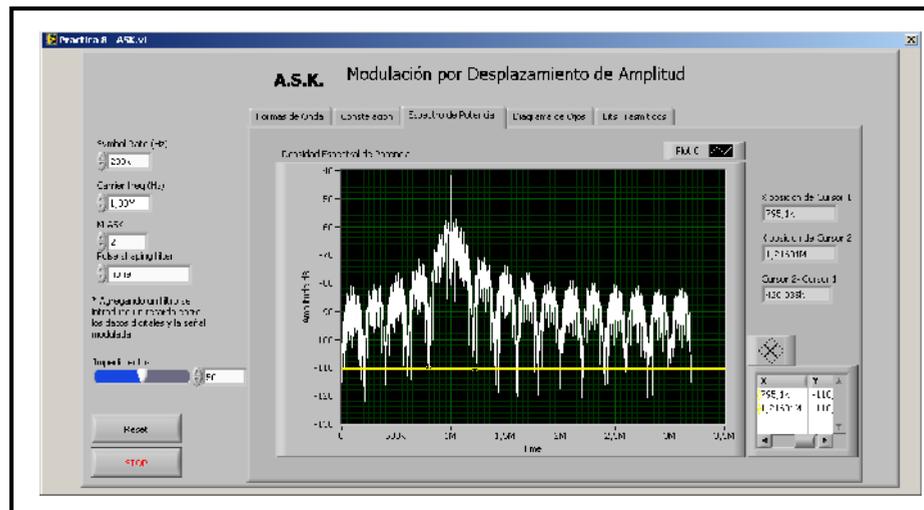


Figura 8.17. Ubicación de los cursores para obtener el ancho de banda de ASK.

Como se muestra en la Figura 8.17, el VI posee en la parte derecha unos indicadores numéricos que nos permitirán observar, el valor de los cursores y además la diferencia de los dos. Claramente se observa que los cursores están encerrando el 99% de la potencia de la señal; para comprobar el ancho de banda primero utilizaremos la formula ya vista en la teoría para obtener la misma:

$$B = 2 * f_b$$

Donde:

B= Ancho de banda.

fb= tasa de bits.

A partir de la formula anterior obtenemos que el ancho de banda aproximado del modulador ASK es:

$$B = 2 * 200(KHz)$$

Donde B= a 400Khz, para comprobar esto observamos la pantalla del VI y confirmamos que obtenemos con la diferencia de cursores un valor de 420KHz, un valor muy cercano tomando en cuenta que nosotros estamos midiendo este parámetro solamente observando la gráfica.

6. Ahora observaremos un diagrama conocido como de ojos, para el análisis de la señal ASK, este diagrama es muy útil para diseñadores para observar el comportamiento del sistema ASK y determinar algunos parámetros que analizaremos a continuación. Figura 8.18.

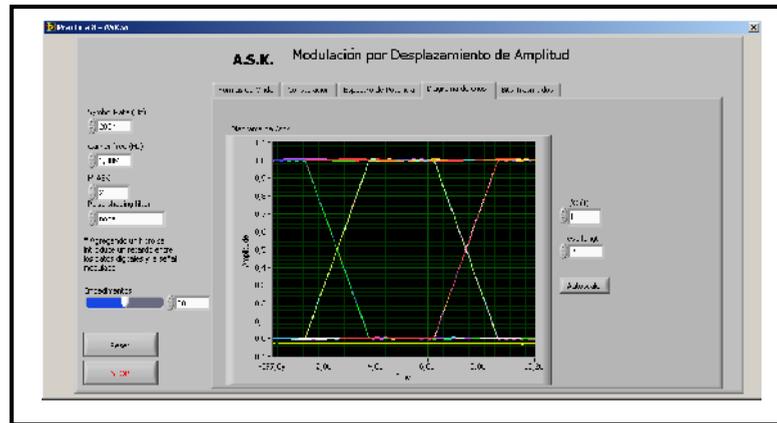


Figura 8.18. Diagrama de ojos del sistema ASK.

Para analizar el diagrama de ojos de la Figura 8.18, utilizaremos como referencia la Figura 8.12 y los resultados que obtenemos son los siguientes Figura 8.19.

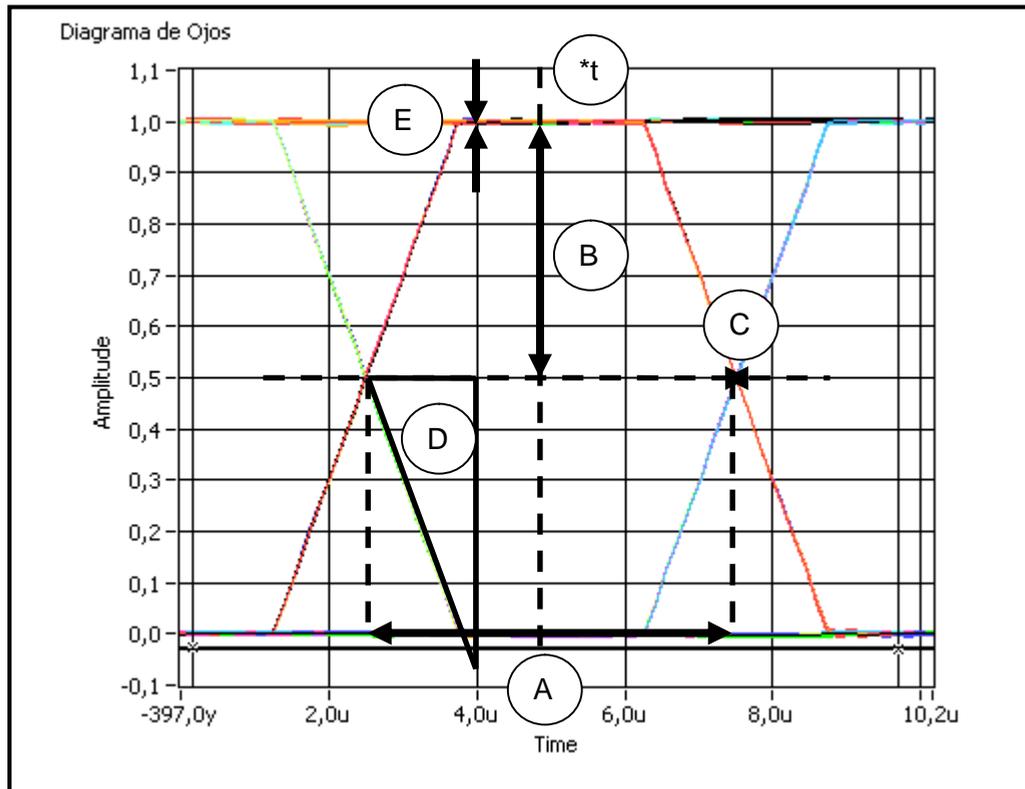


Figura 8.19. Diagrama de ojos para el análisis del sistema ASK.

- A:** Intervalo de tiempo en el que se puede muestrear la señal para decidir. = $5.0\mu\text{seg}$.
- B:** Margen de ruido= 0.5V.
- C:** Distorsión de los cruces por cero= 0
- D:** Pendiente: Sensibilidad a errores en el instante de muestreo
= $0.5/2.5\mu = 0.2E+5$
- E:** Distorsión máxima=0.1V
- t*:** Instante óptimo de muestreo medido con respecto al origen de tiempos. Si el período de símbolo es T_s , la forma de onda se muestrearía= $5\mu\text{seg}$

7. Los valores obtenidos anteriormente son el resultado de un sistema ideal, a continuación modifiquemos los parámetros del modulador ASK para observar el comportamiento del sistema con presencia de ruido y un filtrada de forma de pulso para limitar la banda. Para lo anterior configuraremos el VI con los siguientes valores:

- Symbol Rate (Hz): 200KHz.
- Carrier Frequency(Hz): 1MHz.
- M-ASK: 2(Binario).
- Pulse Shaping filter: Raised Cosine (Coseno alzado).
- Impedimentos (E_b/N_0)=35.

8. Observemos el comportamiento de la señal de mensaje y ASK en el dominio del tiempo en presencia de un ruido AWG (Blanco Gaussiano), este ruido es aquel que tiene todos las componentes de frecuencia audible. Figura 8.20.

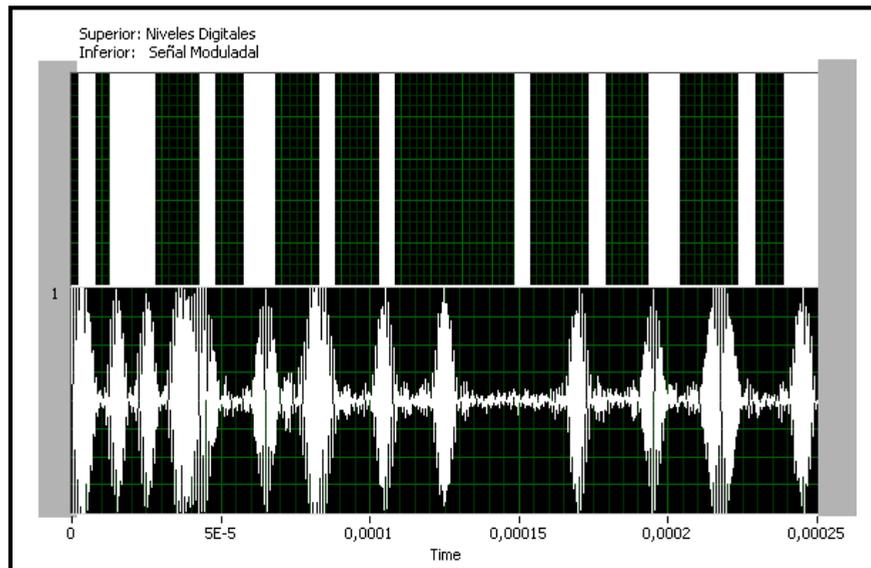


Figura 8.20. Señal ASK en el dominio del tiempo con presencia de AWG.

En la Figura 8.20 se puede observar que la señal ASK binaria (inferior), posee amplitudes no fijas como el ejemplo anterior esto se debe que está en presencia del ruido.

9. Al ubicarnos en la pestaña que tiene por etiqueta “Espectro de Potencia”, observaremos la densidad espectral de potencia del sistema ASK con presencia de ruido AWG y el filtrado de canal mediante un filtro de coseno alzado, este filtrado es realizado porque al enviar datos digitales es común utilizar un pulso rectangular a modo de función “generadora”, sin embargo, esto nos da un problema en frecuencia, la transformada de Fourier de un pulso rectangular es una sinc, que tiene un ancho de banda infinito. Como el espectro es un recurso limitado, tendremos que limitar esa señal de alguna manera, con el consiguiente aumento de la probabilidad de error. Por ello, se usa la función coseno alzado que decrece mas rápidamente que la sinc conforme aumenta la frecuencia (esta más limitada).
Figura 8.21.

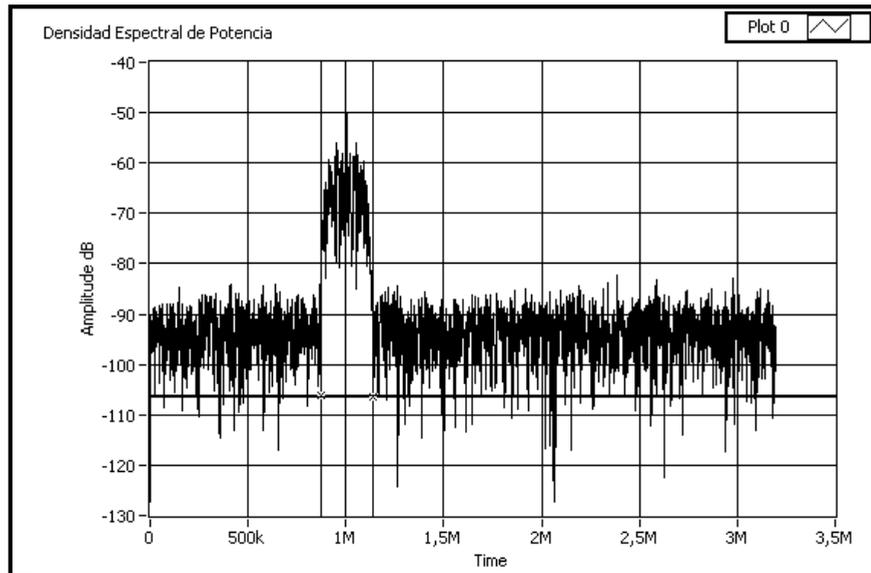


Figura 8.21. Densidad Espectral de Potencia del sistema ASK en presencia de ruido AWG y Filtrado de coseno alzado.

Claramente se nota en la Figura 8.21, que el espectro de la señal ASK es reducido y solo se limita casi al lugar donde se ubica el 99% de la potencia de la señal, aquí se puede observar el uso del filtrado que permite limitar la banda.

Para comprobar el ancho de banda sea igual al estudiado, de igual manera como se realizó en los ejemplos anteriores utilizaremos los cursores que cuenta el VI y procederemos a medir el valor obtenido por el indicador numérico que posee la etiqueta de “Cursor 2 –Cursor 1”, obteniendo el valor de: 405,345KHz, que es un valor muy aproximado a los 400KHz que se obtiene en el cálculo teórico.

10. A continuación observemos, el diagrama de constelación del sistema ASK con presencia de ruido y filtrado, ubicándonos en la pestaña que tiene el mismo nombre. Se puede observar que el ruido y las interferencias provocan que el demodulador no siempre lea los símbolos de forma correcta. En este caso los impactos se dispersan y se crean diferentes formas Figura 8.22.

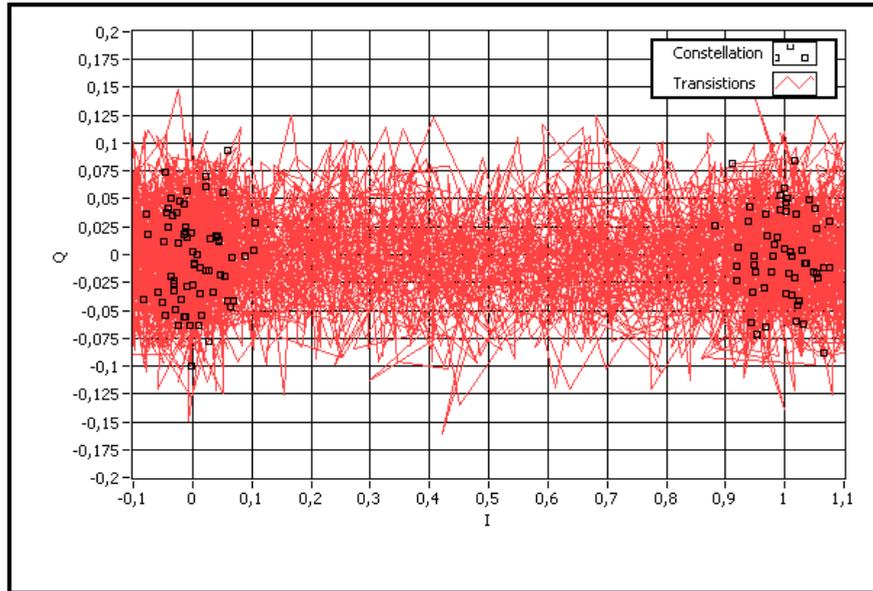


Figura 8.22. Diagrama de constelación del sistema ASK en presencia de ruido AWG y Filtrado de coseno alzado.

11. Ubicarnos en la pestaña “Diagrama de Ojo”, para observar el comportamiento del mismo con presencia de ruido y filtrado de canal Figura 8.23.

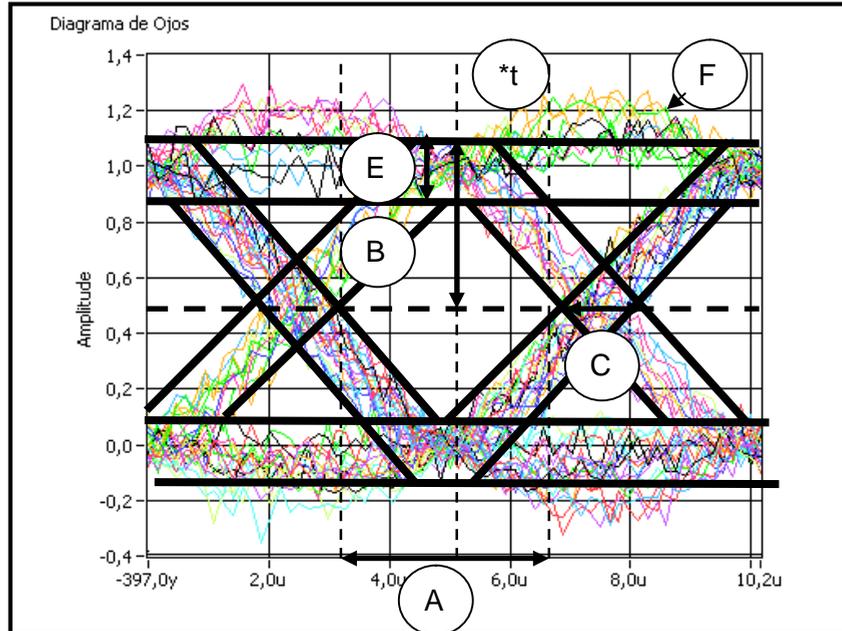


Figura 8.23. Diagrama de ojo del sistema ASK en presencia de ruido AWG y Filtrado de coseno alzado.

La Figura 8.23, muestra un diagrama de ojos muy parecido al que obtendríamos en la vida real, a continuación procederemos al análisis de cada parte del diagrama:

- A:** Intervalo de tiempo en el que se puede muestrear la señal para decidir. = $4.0\mu\text{seg}$.
- B:** Margen de ruido= 0.6V.
- C:** Distorsión de los cruces por cero= $0.755\mu\text{seg}$
- E:** Distorsión máxima=0.2V
- t*:** Instante óptimo de muestreo medido con respecto al origen de tiempos. Si el período de símbolo es T_s , la forma de onda se muestreará= $5\mu\text{seg}$.
- F:** Energía desperdiciada.

8.7 Ejercicio de Aplicación.

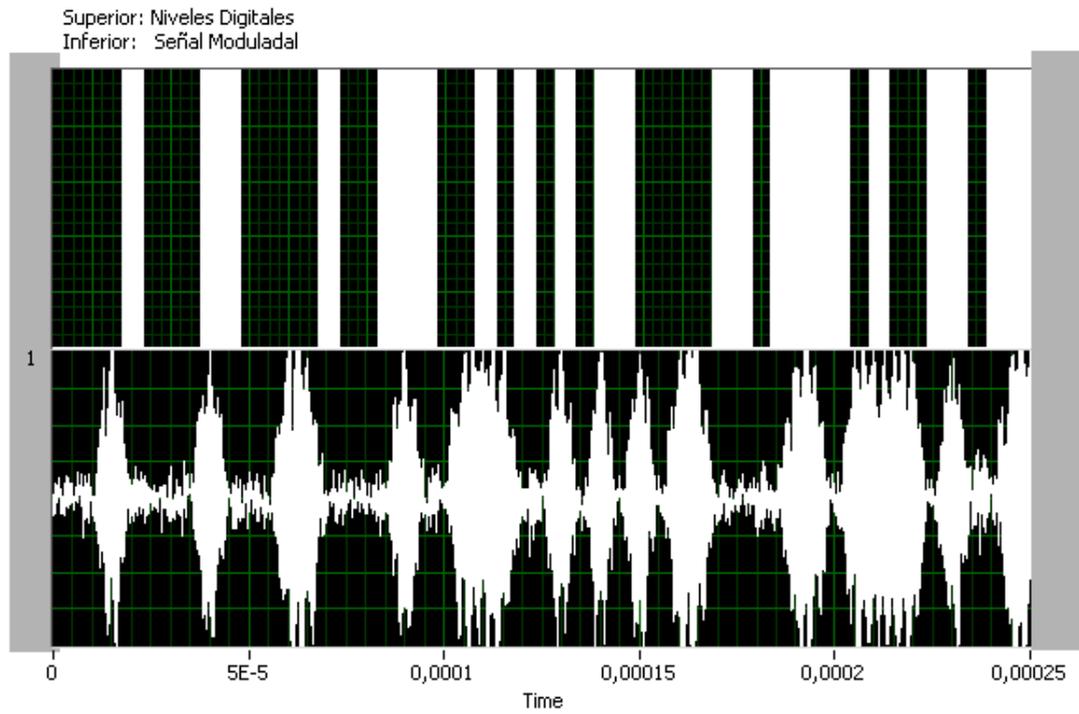
1. Basados en el modulador proporcionado por el instructor configurar el mismo con los siguientes parámetros:

- Symbol Rate (Hz): 200KHz.
- Carrier Frecuency(Hz): 2MHz.
- M-ASK: 2(Binario).
- Pulse Shaping filter:None(Ninguno).
- Impedimentos (E_b/N_0)=30.

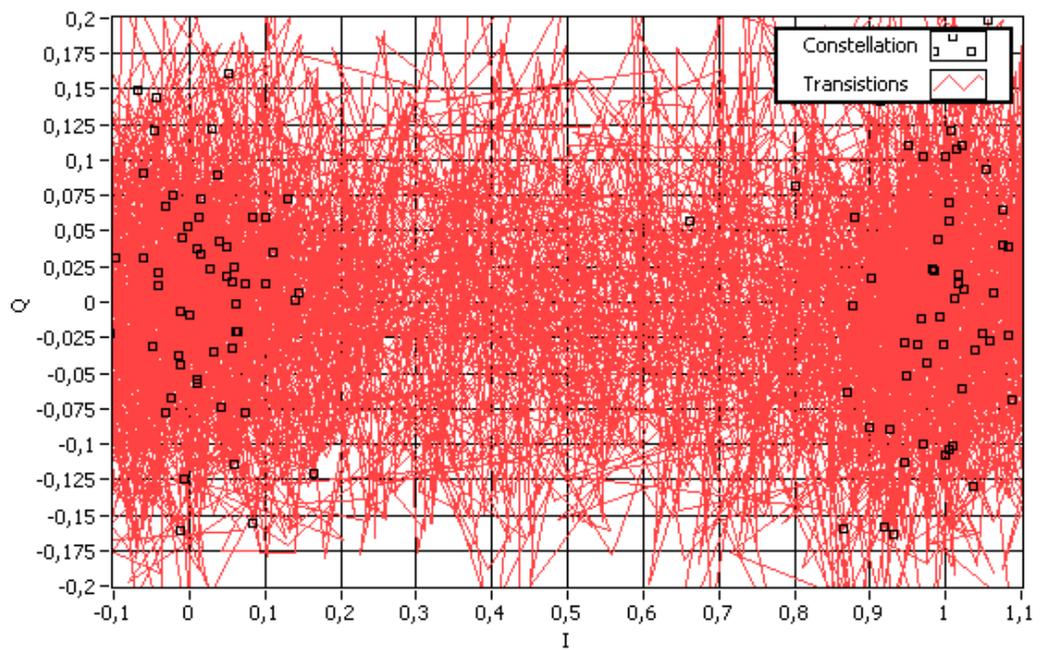
2. A continuación realizar las siguientes Graficas.

a. Señal Digital no modulada.

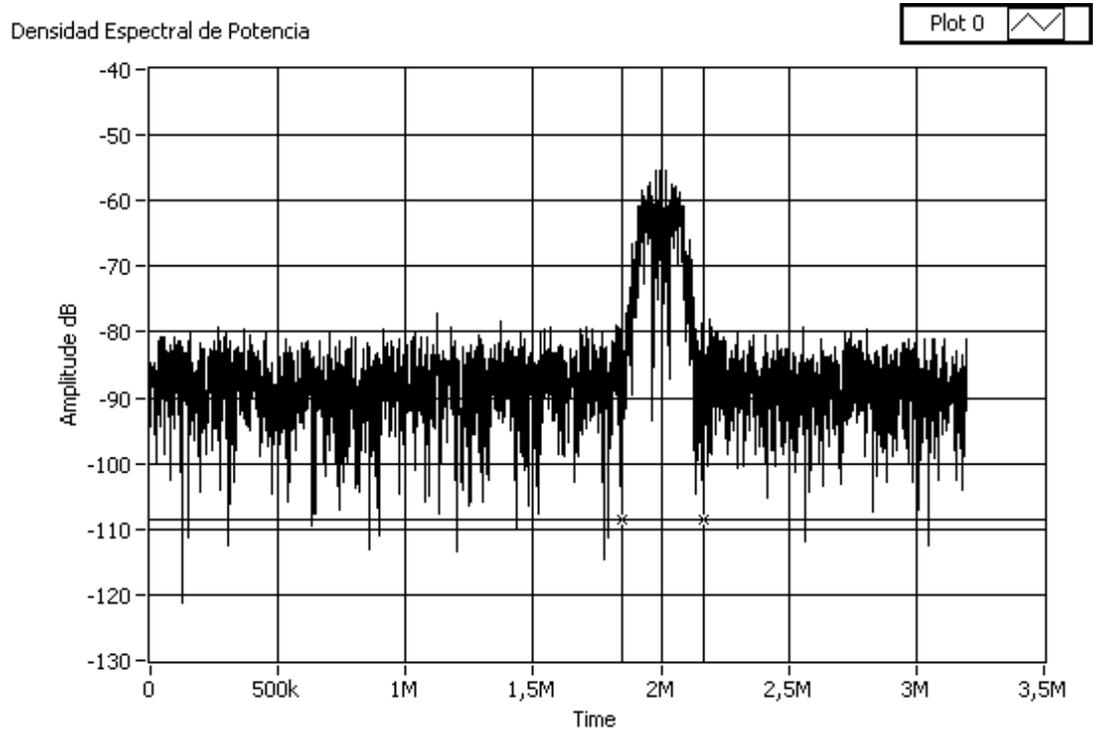
b. Señal Portadora Modulada.



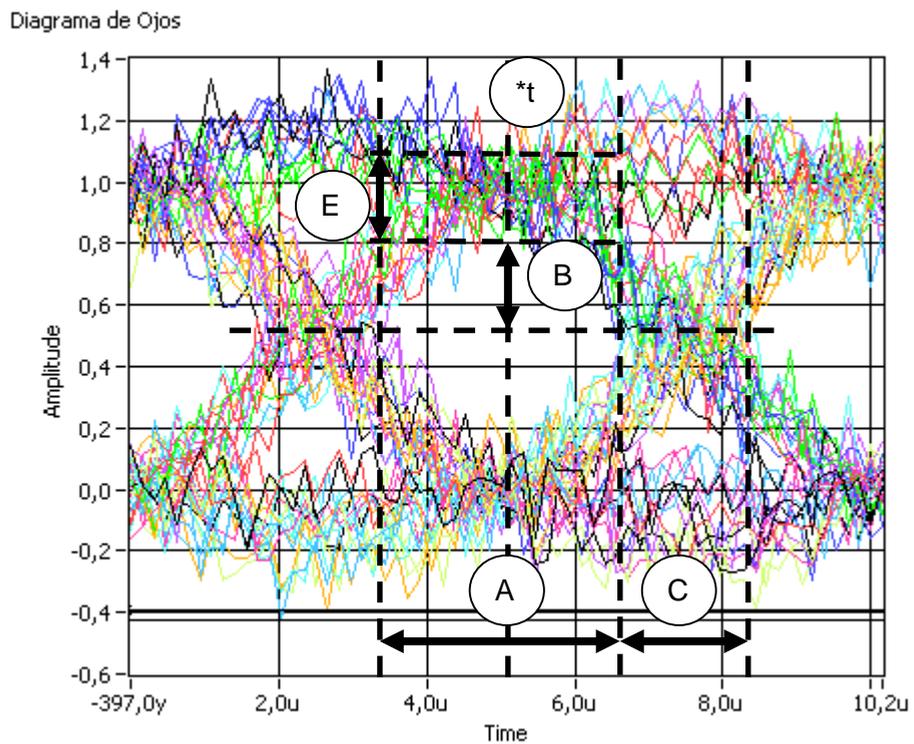
c. Diagrama de Constelación.



d. Espectro de Densidad de Potencia.



3. Realizar un diagrama de ojos calcular e indicar la siguiente información:



- A:** Intervalo de tiempo en el que se puede muestrear la señal para decidir. = $3.5\mu\text{seg}$.
- B:** Margen de ruido= 0.3V.
- C:** Distorsión de los cruces por cero= $1.75\mu\text{seg}$
- E:** Distorsión máxima=0.25V
- t*:** Instante óptimo de muestreo medido con respecto al origen de tiempos. Si el período de símbolo es T_s , la forma de onda se muestreará= $5\mu\text{seg}$.

8.8 Conclusiones:

En esta práctica se pudo observar el proceso de modulación digital binaria ASK, ideal y en presencia de algún impedimento, se aprendió a interpretar los diagramas de ojos para analizar el comportamiento del sistema estudiado.

PRACTICA 9

Tema: Sistemas de Modulación Digitales Binarias Modulación por Desplazamiento de Frecuencia FSK

9.1 Objetivos

- a. Repasar los conceptos básicos de los esquemas de modulación digital por desplazamiento de frecuencia.
- b. Analizar el comportamiento del esquema FSK en el dominio del tiempo y frecuencia.

9.2 Introducción

A continuación analizaremos las características más resaltantes de la modulación por desplazamiento de Frecuencia FSK como son: La potencia, el espectro, el ancho de banda, y la probabilidad de error.

9.3 Modulación por desplazamiento de Frecuencia FSK

El FSK binario es una Forma de modulación angular de amplitud constante, similar a la modulación en frecuencia convencional, excepto que la señal modulante es un flujo de pulsos binarios que varía, entre dos niveles de voltaje discreto, en lugar de una forma de onda analógica que cambia de manera continua.

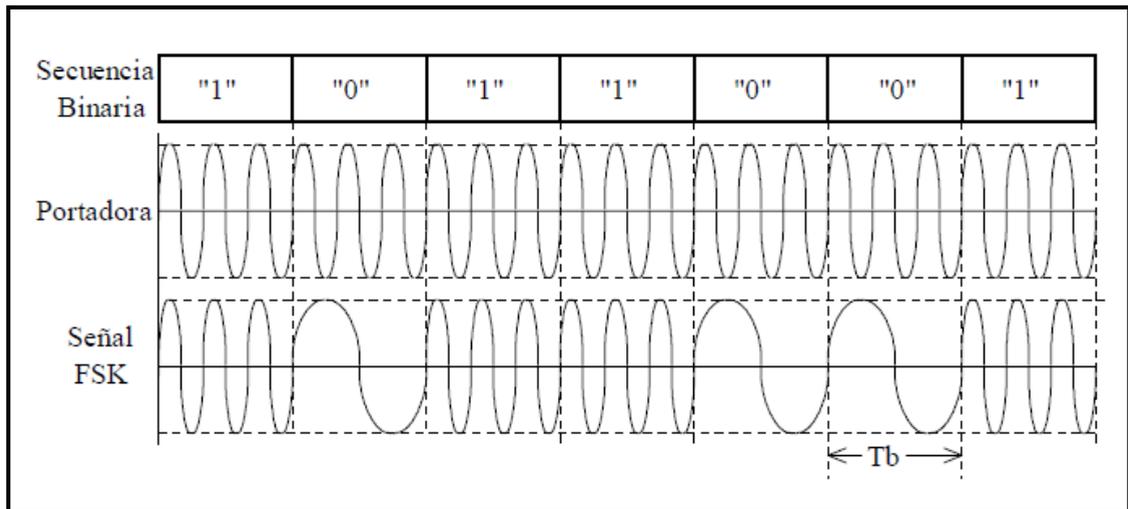


Figura 9.1 Modulación Binaria FSK.
 (Fuente: BRICEÑO, Comunicaciones ULA, 2010, Pág. 14)

La expresión general para una señal FSK binaria es:

$$X_{fsk}(t) = V \cos(2\pi(f_c + b(t)\Delta f)t)$$

Donde:

$X_{fsk}(t)$ = Señal Modulada.

$b(t)$ = Señal binaria moduladora (volts). Puede tomar dos valores: +1 cuando el bit enviado es 1, y -1 cuando el bit enviado es 0.

V = Amplitud de la señal portadora (volts).

f_c = Frecuencia de la señal portadora (Hertz).

Δf = Desviación máxima de frecuencia alrededor de la portadora. $f_A = f_c + \Delta f$; $f_B = f_c - \Delta f$.

Entonces tenemos que si $b(t) = 1$:

$$X_{fsk}(t) = V \cos(2\pi(f_c + \Delta f)t)$$

Pero si $b(t) = -1$:

$$X_{fsk}(t) = V \cos(2\pi(f_c - \Delta f)t)$$

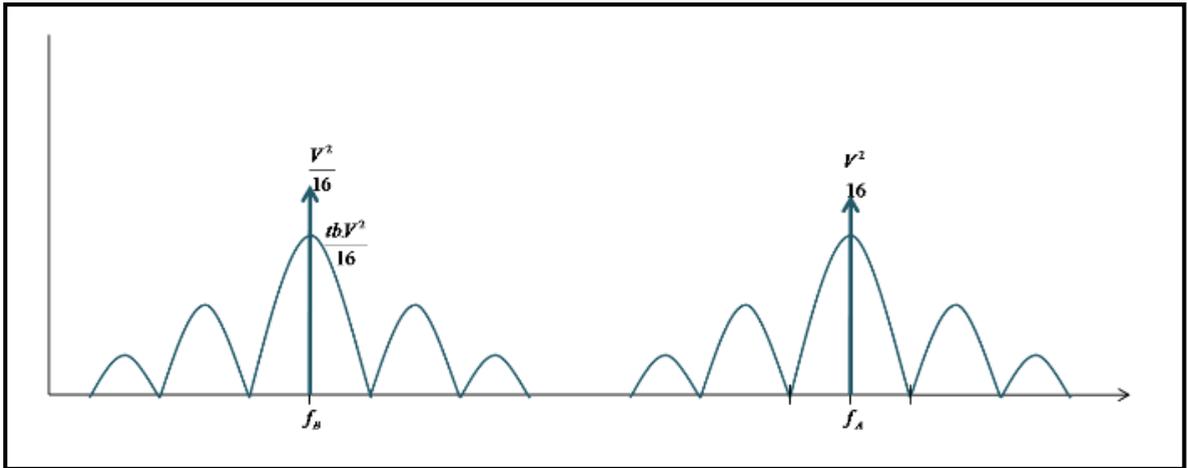


Figura 9.2 Modulación Binaria FSK en el dominio de la Frecuencia.
 (Fuente: MEZOA, Laboratorio Digital Interactivo, 2011, Pág.35)

La densidad Espectral de Potencia de la señal FSK puede obtenerse modelándola como la suma de dos señales OOK, en este caso:

$$G_{fsk} = \frac{V^2}{16} [\delta(f - f_A) + \delta(f + f_A) + \delta(f - f_B) + \delta(f + f_B)] + \frac{V^2}{16} [tb \cdot \text{Sin}^2((f - f_A)tb) + tb \cdot \text{Sin}^2((f + f_A)tb) + b \cdot \text{Sin}^2((f - f_B)tb) + tb \cdot \text{Sin}^2((f + f_B)tb)]$$

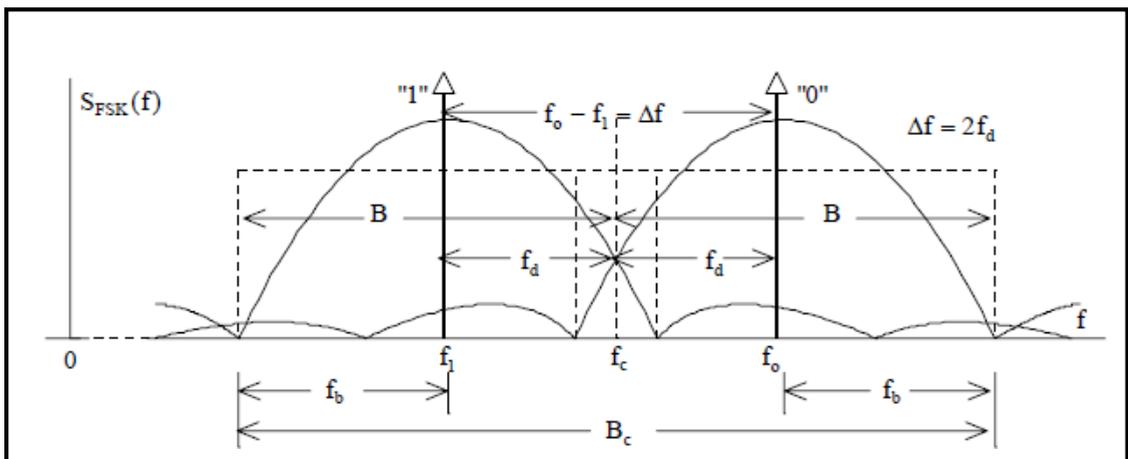


Figura 9.3 Resumen Modulación Binaria FSK en el dominio de la Frecuencia.
 (BRICEÑO, Comunicaciones ULA, 2010, Pág. 15)

El ancho de banda total de la señal es:

$$BW = (f_A - f_B) + 2f_b$$

Y su constelación:

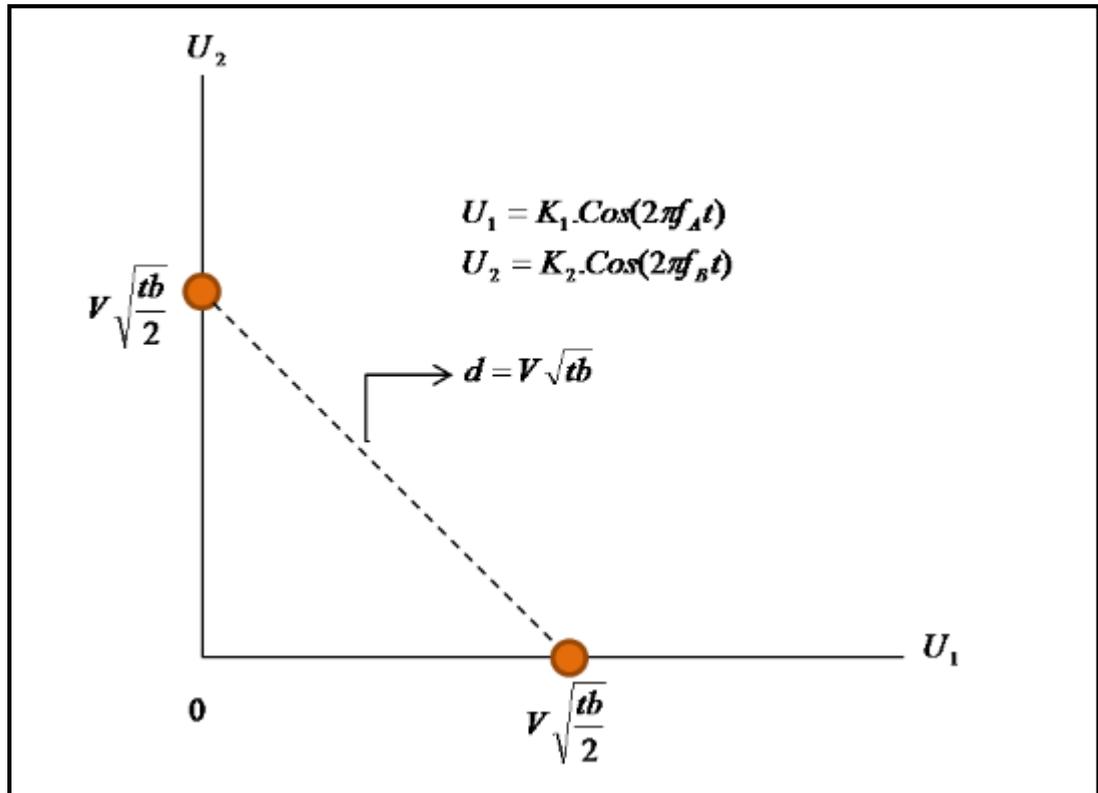


Figura 9.4 Constelación de FSK.

(MEZOA, Laboratorio Digital Interactivo, 2011, Pág.35)

9.4 Desarrollo de la práctica FSK con uso de LabVIEW

El VI que a continuación se desplegará tiene como propósito observar el comportamiento de un modulador FSK binario en el dominio del tiempo y frecuencia.

1. Abrir el VI proporcionado por el instructor con el nombre de "Practica 9- FSK", se desplegará el siguiente panel frontal Figura 9.5.

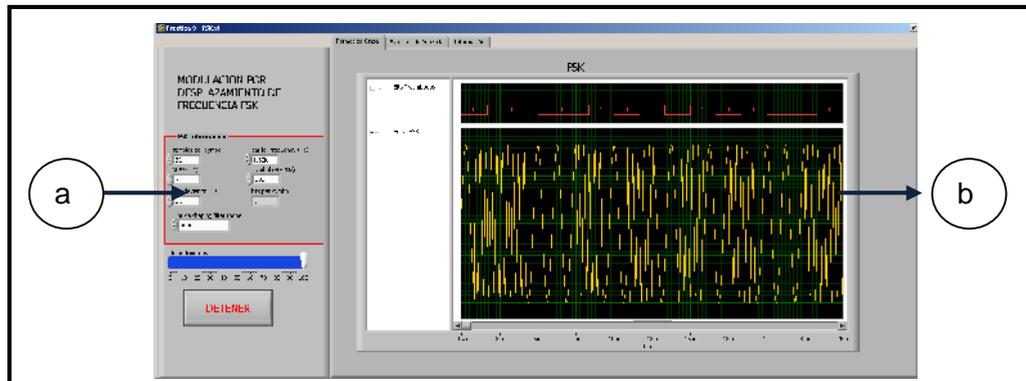


Figura 9.5 Panel Frontal del modulador FSK

En la Figura 9.5 se puede observar que el panel frontal consta de las siguientes partes:

a. Controles numéricos de:

- Samples per Symbol: Numero de muestras por símbolo.
- Carrier Frequency: Frecuencia de la portadora analógica.
- M-FSK: Esquema de modulación FSK en este caso binario 2.
- Symbol rate: Tasa de símbolos.
- FSK deviation: Desviación de FSK.
- Pulse shapping filter: Filtro con forma de pulso.
- Impedimentos: Control de ruido AWGN (Aditivo blanco gaussiano).

b. Control tipo pestaña que tiene las siguientes categorías:

- Formas de Onda: Indicadores gráficos de las ondas FSK en el dominio del tiempo.
- Espectro de Potencia: Espectro de potencia de la señal FSK.
- Información: Indicador de las medidas del espectro de la señal FSK.

2. Configuemos los controles del VI, con los siguientes valores:

- Samples per Symbol: 32.
- Carrier Frequency: 1.8k.

- M-FSK: 2.
- Simbol rate: 600.
- FSK desviation: 1K.
- Pulse shapping filter: ninguno.
- Impedimentos: 100.

3. Ubicarnos en la pestaña con el nombre “Formas de onda”. En esta pestaña se pueden observar la señal digital(superior) y la señal FSK(inferior) en el dominio del tiempo. Figura 9.6.

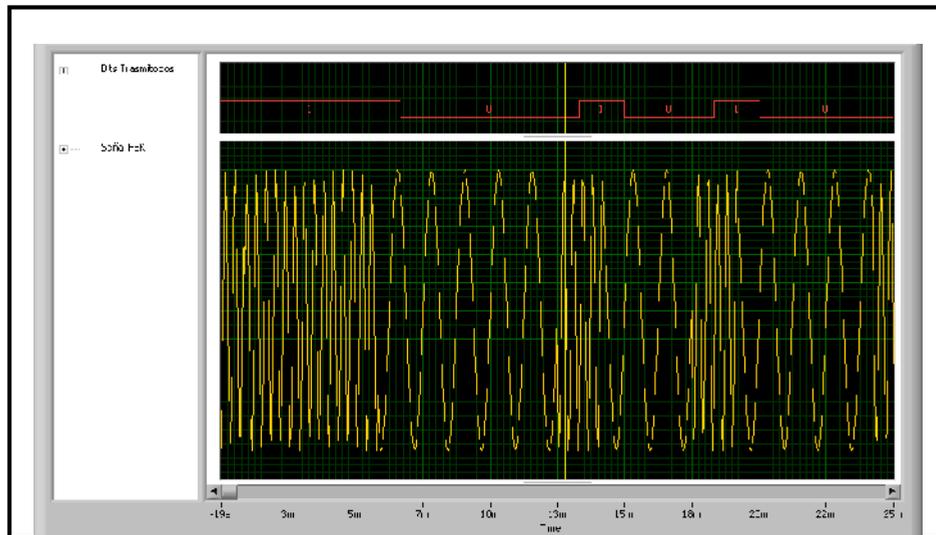


Figura 9.6 Formas de onda de FSK.

La Figura 9.6 muestra claramente que para cada señal digital existe una frecuencia distinta, de esta manera comprobando el funcionamiento de un modulador FSK.

4. Para observar el espectro de frecuencia de la señal FSK, nos ubicaremos en la pestaña que tiene el nombre de “Espectro de potencia”, aquí se observara un indicador gráfico el cual representa la densidad espectral de potencia de la señal. Figura 9.7.

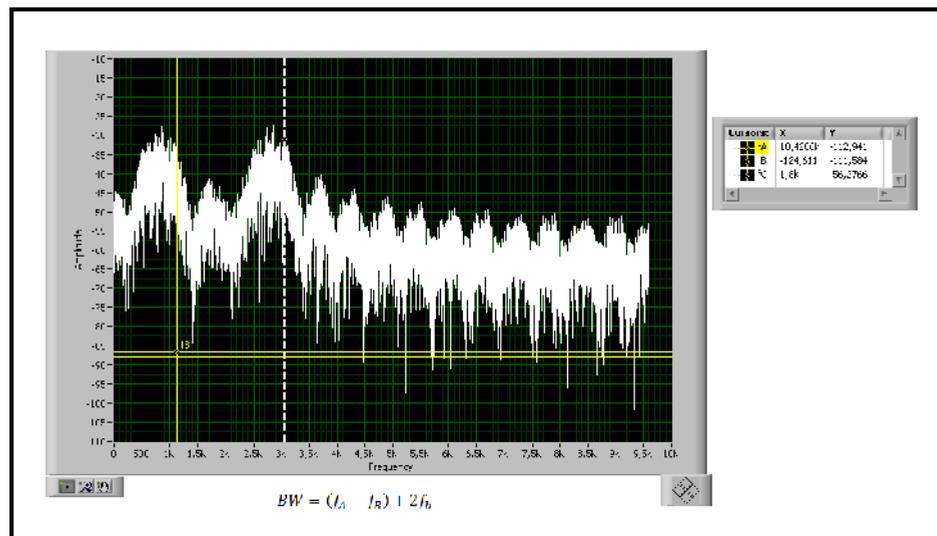


Figura 9.7 Densidad espectral de potencia de FSK.

A continuación comprobaremos que el espectro adquirido sea correcto, para esto basados en la formula de ancho de banda de FSK, realizaremos un cálculo y lo compararemos con el resultado del VI.

Donde:

$$BW = (f_A - f_B) + 2f_b$$

BW= Ancho de Banda FSK.

Δf = Desviación máxima de frecuencia alrededor de la portadora.

$$f_A = f_c + \Delta f$$

$$f_B = f_c - \Delta f$$

f_c = frecuencia de la portadora.

f_b =Tasa de bits.

Calculando a partir de los valores configurados en el VI deberíamos tener un espectro de FSK con un ancho de banda de:

$$BW = ((1.8k + 1k) - (1.8k - 1k)) + (2 \times 600)$$

$$BW = 3.2 \text{ KHz}$$

Para comprobar el valor obtenido, usaremos los cursores del grafico, para poder obtener los valores de las f_A y f_B , como indica la Figura 9.8.

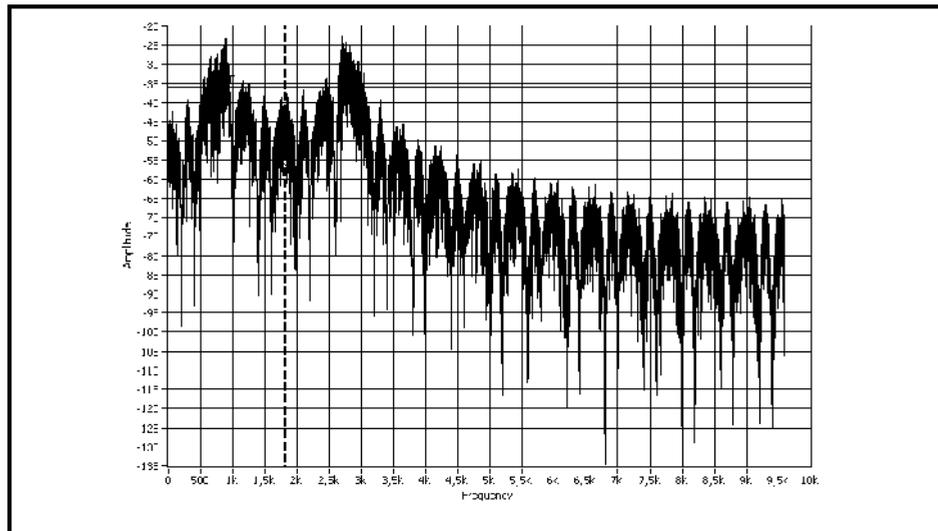


Figura 9.8 Densidad espectral de potencia de FSK.

Utilizando los cursores obtenemos:

fA:2.85KHz.

fB:809.5Hz.

Realizando los cálculos correspondientes obtenemos que el ancho de banda es: 3.204KHz que es un valor muy parecido al calculado.

9.5 Ejercicio de Aplicación

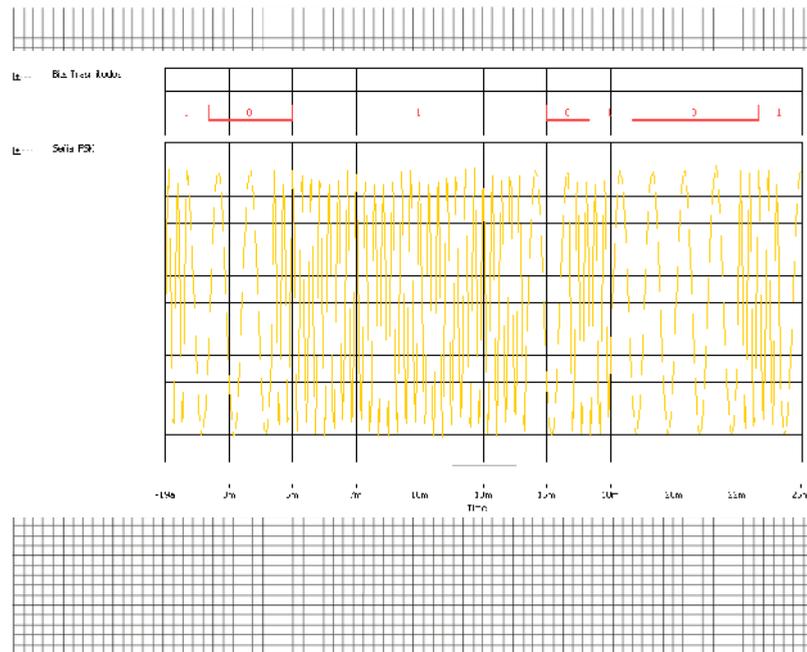
1. Basados en el modulador proporcionado por el instructor configurar el mismo con los siguientes parámetros:

- Samples per Symbol: 32.
- Carrier Frequency: 1.8k.
- M-FSK: 2.
- Symbol rate: 600.
- FSK deviation: 1K.
- Pulse shapping filter: ninguno.
- Impedimentos: 50.

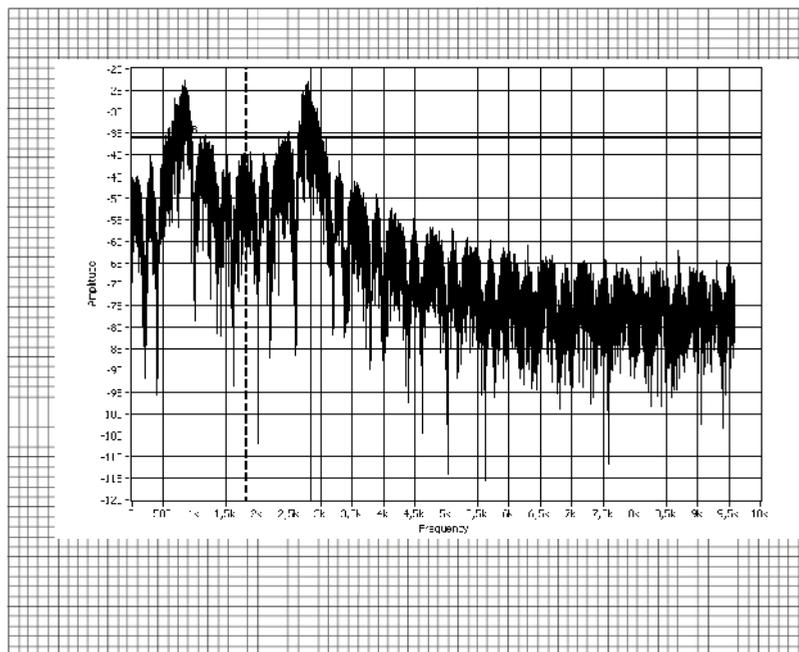
2. A continuación realizar las siguientes Graficas.

a. Señal Digital no modulada.

b. Señal Digital Modulada.



d. Espectro de Densidad espectral de Potencia.



3. Calcular el Ancho de Banda de FSK y comprobar en el VI.

BFSK: 3.205KHz

9.6 Conclusiones:

En esta práctica se pudo observar el comportamiento del esquema FSK binario, en el dominio del tiempo y la frecuencia, además de cómo calcular el ancho de banda e identificar el espectro de frecuencia de la misma.

PRACTICA 10

Tema: Sistemas de Modulación Digitales Binarias Modulación por Desplazamiento de Fase PSK

10.1 Objetivos

- a. Repasar los conceptos básicos de los esquemas de modulación digital por desplazamiento de fase.
- b. Analizar el comportamiento del esquema PSK en el dominio del tiempo y frecuencia.

10.2 Introducción

A continuación analizaremos las características más resaltantes de la modulación por desplazamiento de Fase PSK como son: La potencia, el espectro, el ancho de banda, y la probabilidad de error.

10.3 Modulación por desplazamiento de Fase PSK

La modulación por desplazamiento de fase es similar a la modulación en fase convencional con amplitud constante excepto que la señal de entrada es una señal digital binaria y su número de fases a la salida es limitado. En la modulación PSK binaria son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de portadora, una fase representa al "1" lógico y la otra fase representa al "0" lógico, esta fase varía de acuerdo a la señal digital de entrada, y la señal portadora se desplaza entre dos ángulos distintos desfasados 180° . Existen dos alternativas:

- PSK convencional (La variación de fase se refiere a la fase de la portadora sin modular).
- PSK diferencial (La variación de fase se refiere a la fase de la portadora en el intervalo de señalización anterior).

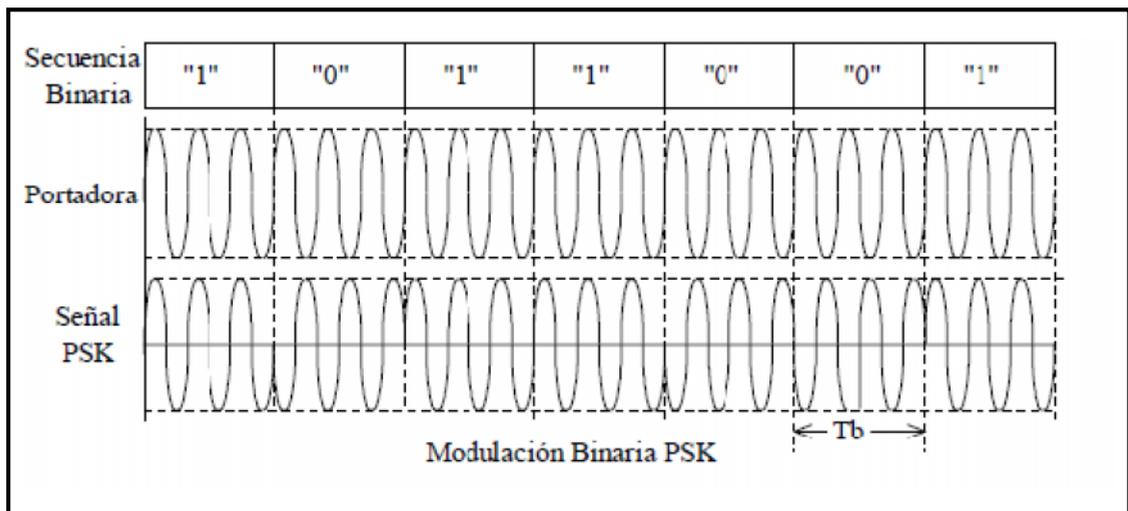


Figura 10.1 Modulación Binaria PSK.
 (Fuente: BRICEÑO, Comunicaciones ULA, 2010, Pág. 17)

La ecuación correspondiente para este tipo de modulación es:

$$X_{PSK}(t) = Vb(t) \cos(\omega_c t)$$

Donde: $X_{psk}(t)$ = Señal modulada.

$b(t)$ = señal binaria moduladora (volts). Puede tomar dos valores: +1 cuando el bit enviado es 1, y -1 cuando el bit enviado es 0.

V = Amplitud de la señal portadora (volts)

ω_c = Frecuencia de la señal portadora (radianes por segundo)

La Densidad Espectral de potencia resulta ser:

$$X_{PSK}(t) \rightarrow G_{PSK}(f)$$

$$G_{PSK}(f) = \frac{V^2}{4} [t_b \text{Sinc}^2((f + f_c)t_b) + t_b \text{Sinc}^2((f - f_c)t_b)]$$

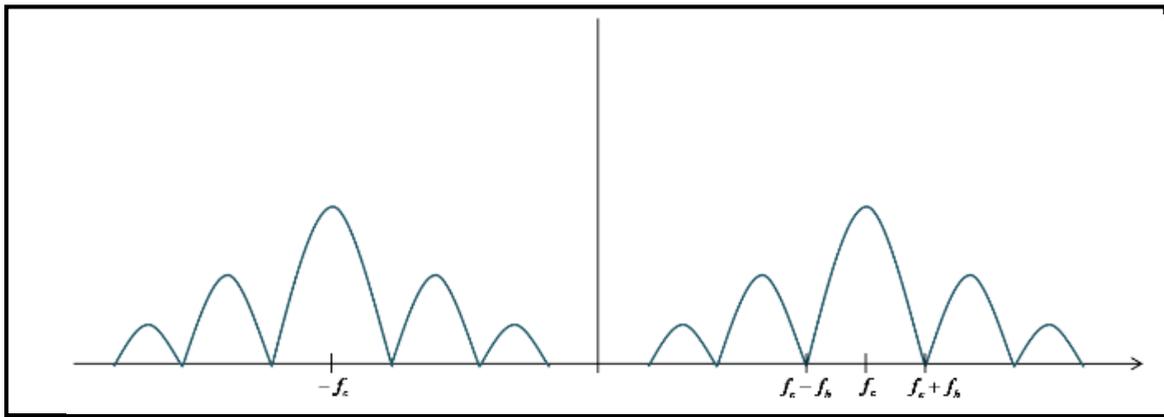


Figura 10.2 Modulación Binaria PSK en el dominio de la Frecuencia.
 (Fuente: MEZOA, Laboratorio Digital Interactivo, 2011, Pág.37)

Como se observa, el ancho de banda práctico será:

$$BW=2f_b.$$

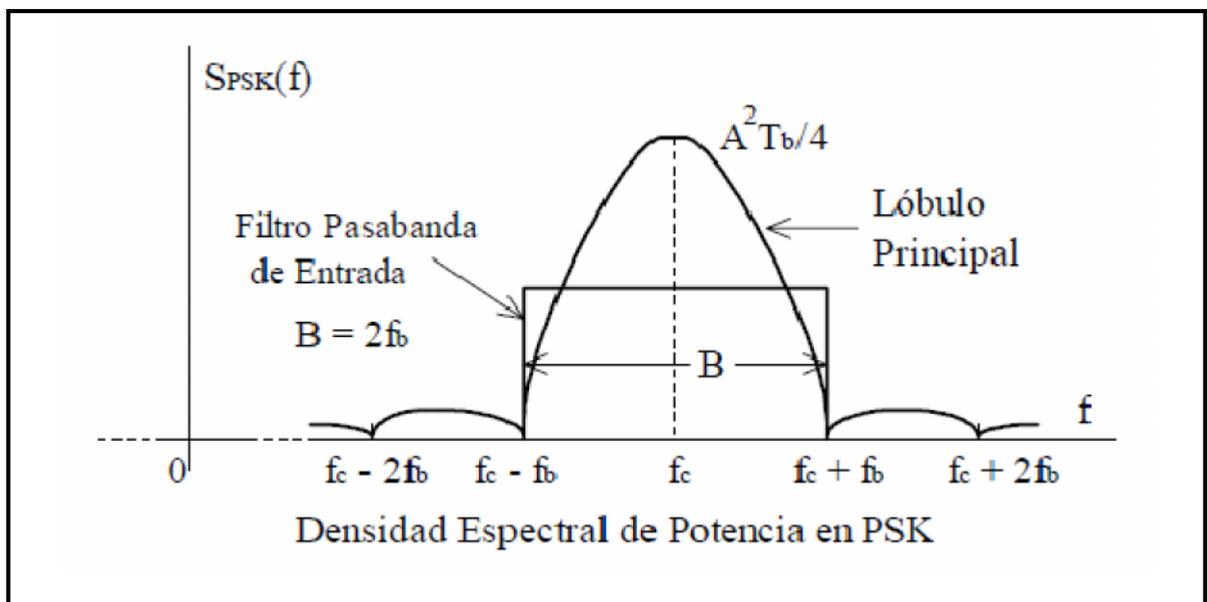


Figura 10.3 Resumen Modulación Binaria PSK en el dominio de la Frecuencia.
 (Fuente: BRICEÑO, Comunicaciones ULA, 2010, Pág. 18)

Finalmente su constelación es:

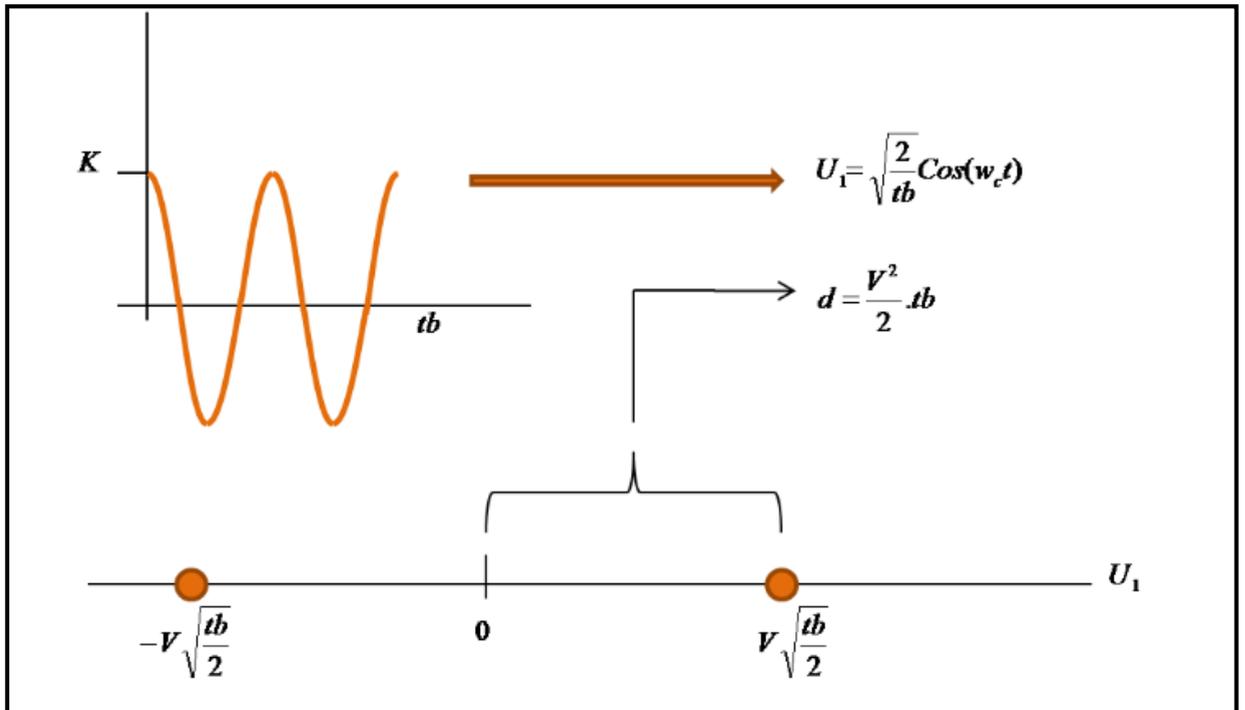


Figura 10.4 Constelación de PSK.

(Fuente: MEZOA, Laboratorio Digital Interactivo, 2011, Pág.37)

10.4 Desarrollo de la práctica PSK con el uso de LabVIEW

El VI que a continuación se desplegará, permitirá el análisis del sistema de modulación PSK binario en el dominio del tiempo y frecuencia, como así de su diagrama de constelación.

1. Abrir el VI proporcionado por el instructor que lleva el nombre de "Práctica 10-PSK", a continuación se desplegará el siguiente panel frontal. Figura 10.5.

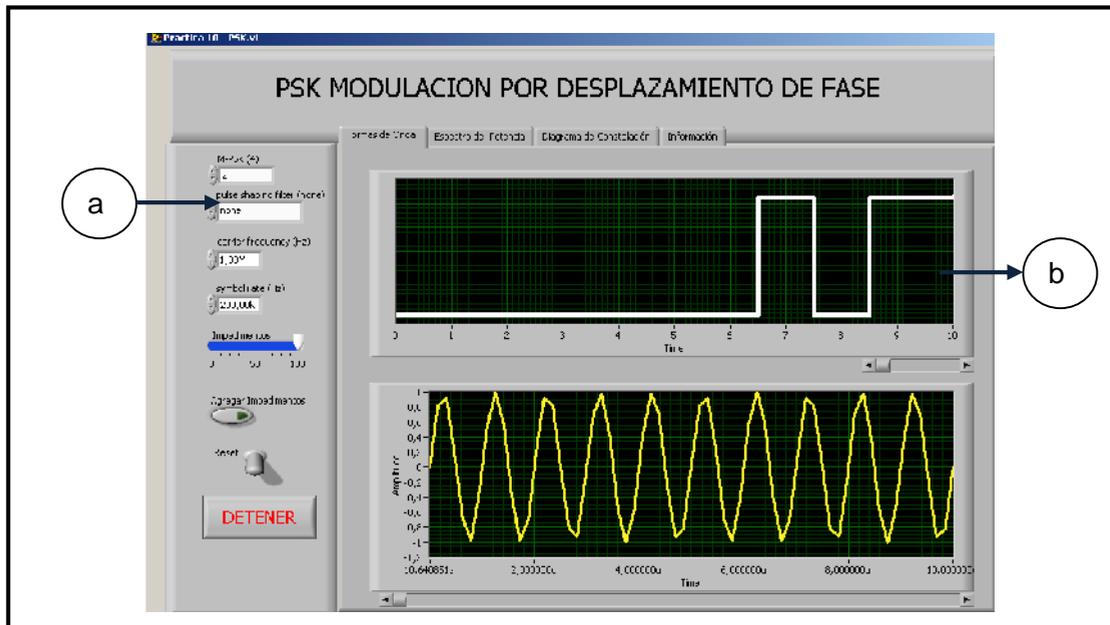


Figura 10.5 Panel frontal VI PSK

El panel frontal de la Figura 10.5 consta de los siguientes partes:

a. Controles numéricos de parámetros del sistema PSK, entre los que tenemos:

- M-PSK: Tipo de sistema PSK en este caso binario.
- Pulse shapping filter: Tipo de filtro de forma de pulso.
- Carrier frequency: Frecuencia de la portadora analógica.
- Symbol Rate: Tasa de símbolos.
- Impedimentos: Control de ruido AWG(Aditivo blanco gaussiano).
- Agregar Impedimentos: Control booleano que permite agregar impedimentos a la señal.
- Reset: Control que permite inicializar el proceso de modulación, en cualquier instante.

b. Control tipo pestaña que posee las siguientes categorías:

- Formas de Onda: Indicadores gráficos donde se observan las ondas involucradas en el proceso de PSK en el dominio del tiempo.

- Espectro de Potencia: Indicador grafico que muestra la densidad espectral de potencia de la señal PSK.
- Diagrama de constelación: Indicador gráfico donde se observa la constelación de PSK.
- Información: Diagrama en el cual se observa las partes del espectro de PSK.

2. Configuraremos los controles del VI con los siguientes valores:

- M-PSK: 2
- Pulse shapping filter: ninguno
- Carrier frequency: 1MHz.
- Symbol Rate: 200KHz.
- Impedimentos: 100
- Agregar Impedimentos: False.
- Reset: False.

3. Ubicarnos en la pestaña "Formas de onda" y se desplegaran las ondas de PSK. Figura 10.6.

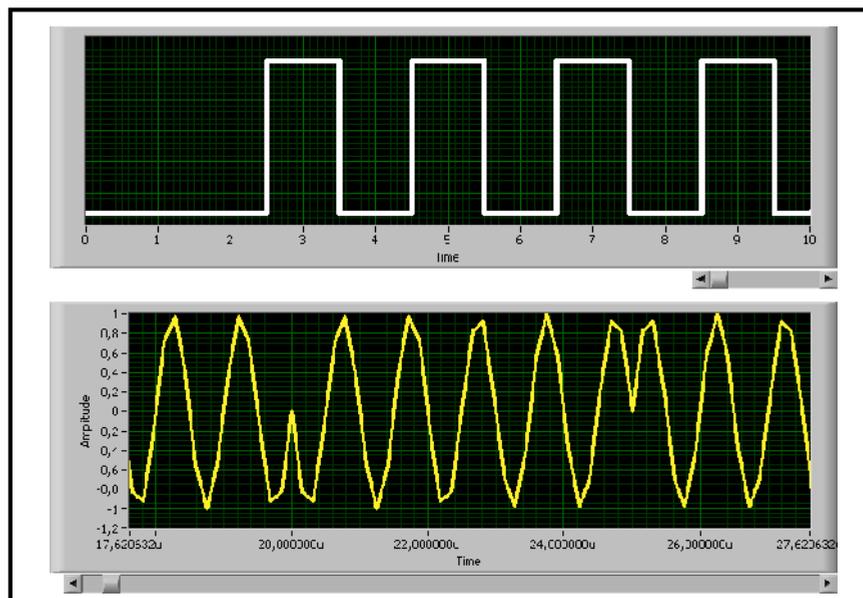


Figura 10.6 Señales PSK en el dominio del tiempo.

En la figura 10.6 se observa claramente que para cada cambio de la señal digital existe un cambio en la fase de la señal PSK (inferior), comprobando el comportamiento del sistema.

4. Para observar el comportamiento de PSK en la frecuencia nos ubicaremos en la pestaña con nombre “Espectro de potencia”, aquí observaremos la densidad espectral de potencia de la señal PSK.

Para confirmar el ancho de banda de la señal PSK utilizaremos los cursores que posee el grafico indicador en el VI, como se pudo observar en la teoría el ancho de banda de PSK viene dado por:

$$BW=2fb.$$

Donde:

BW: Ancho de banda de PSK.

fb: Tasa de bits.

A partir de los datos configurados el ancho de banda obtenido es:

$$BW=2*200K=400KHz.$$

Usando los cursores como se observa en la Figura 10.7, se obtiene el siguiente resultado:

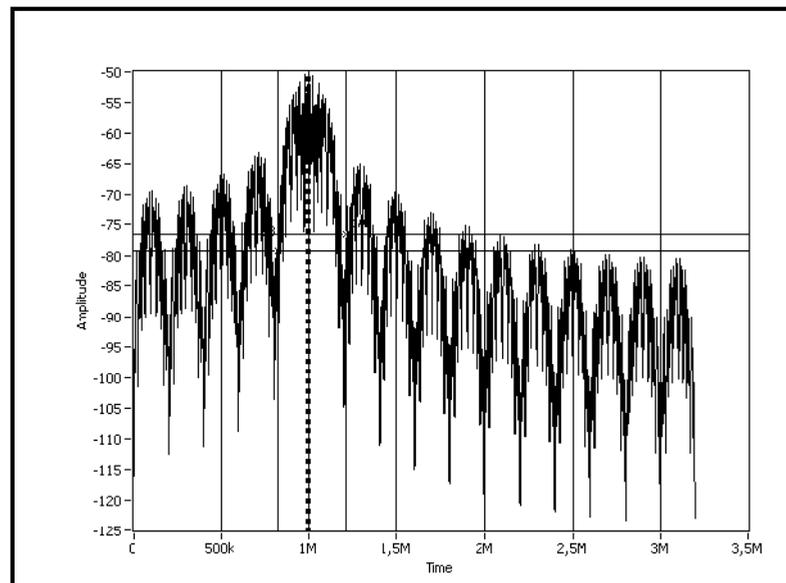


Figura 10.7 Densidad espectral de potencia de PSK.

El valor obtenido utilizando los cursores es de 392.05K que es un valor muy cercano al calculando.

5. Para observar el diagrama de constelación nos ubicaremos en la pestaña que tiene como nombre "Diagrama de constelación". Se desplegara el diagrama de constelación de la Figura 10.8 el cual podemos observamos que se despliegan dos puntos lo cual representa las únicas dos fases que se cambian a partir de los símbolos.

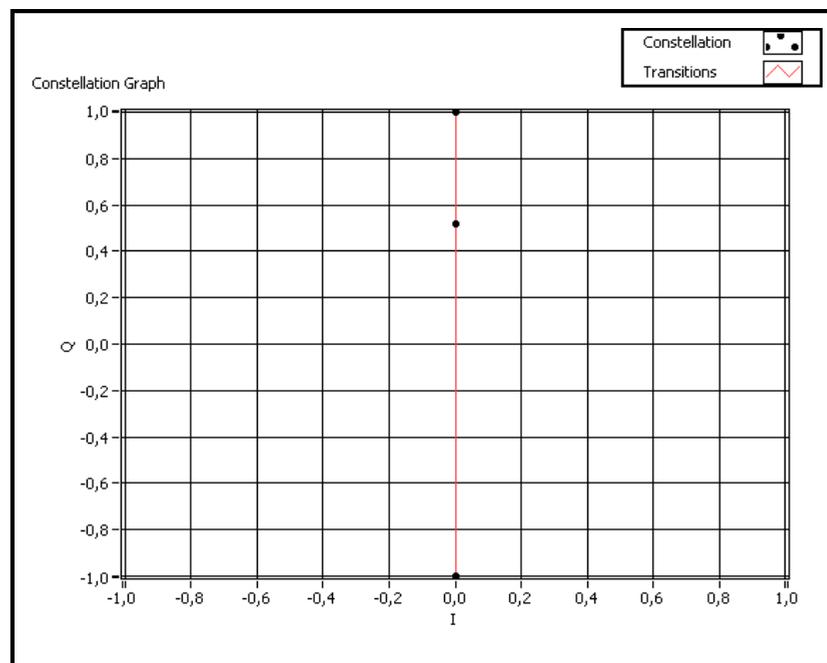


Figura 10.8 Diagrama de Constelación de PSK.

10.5 Ejercicio de Aplicación.

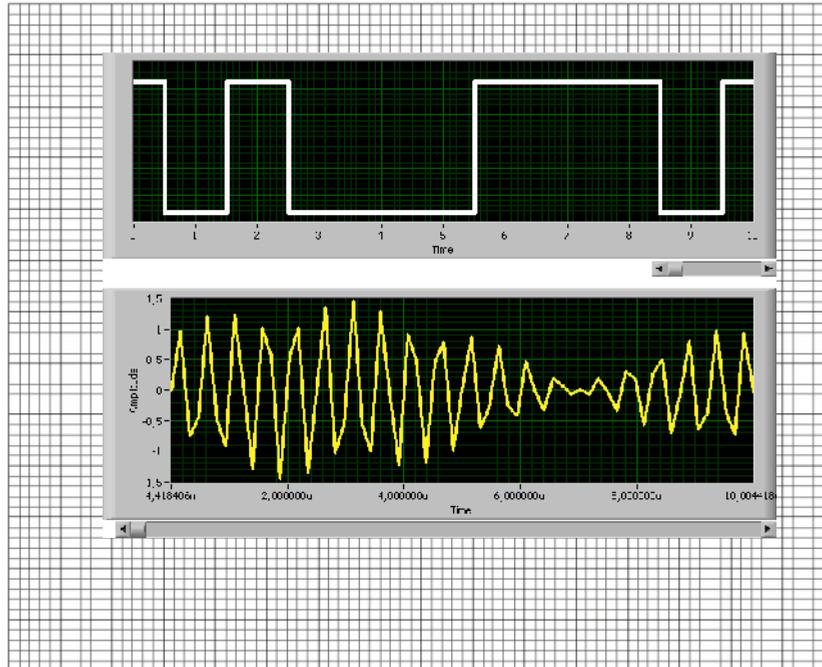
1. Basados en el modulador proporcionado por el instructor configurar el mismo con los siguientes parámetros:

- M-PSK: 2
- Pulse shapping filter: raised cosine.
- Carrier frequency: 2MHz.
- Symbol Rate: 200KHz.
- Impedimentos: 35.
- Agregar Impedimentos: True.
- Reset: False.

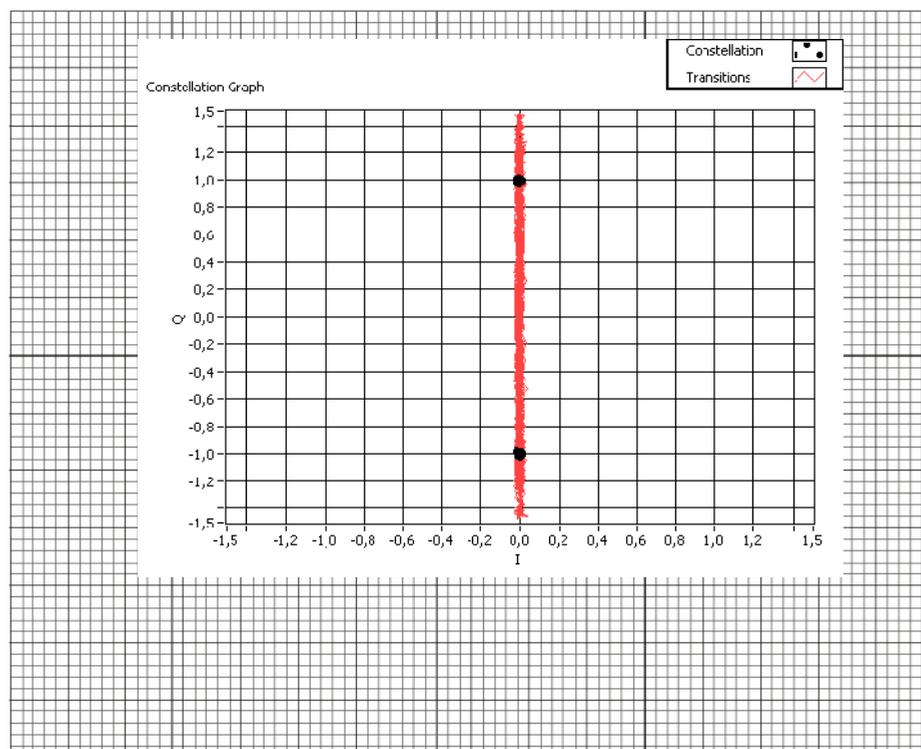
2. A continuación realizar las siguientes Graficas.

a. Señal Digital no modulada.

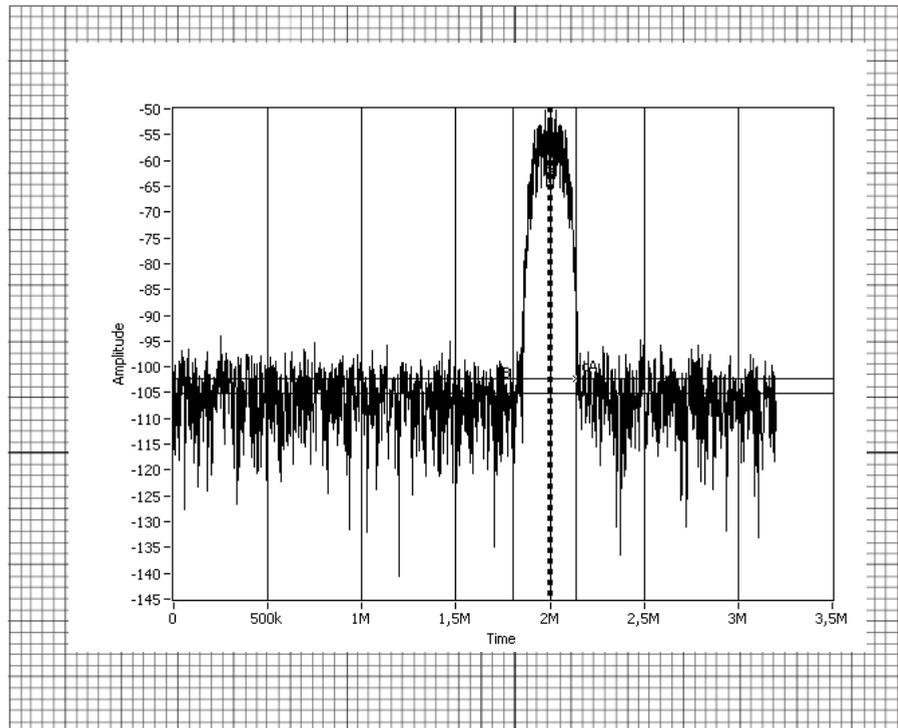
b. Señal Digital Modulada.



c. Diagrama de Constelación.



d. Espectro de Densidad de Potencia.



3. Calcular el Ancho de Banda de PSK y comprobar en el VI.

PSK(Calculado):400KHz

PSK VI: 392,057KHz.

10.6 Conclusiones:

En esta práctica se pudo observar el comportamiento de la modulación PSK binaria, su diagrama de constelación además determinados el ancho de banda del sistema a partir del espectro de potencia.

PRACTICA 11

Tema: Sistemas de Modulación Digitales M-arias Modulación de Amplitud de Cuadratura QAM

11.1 Objetivos

- a. Repasar los conceptos básicos de los esquemas de modulación digital de Amplitud de Cuadratura.
- b. Analizar el comportamiento del esquema QAM en el dominio del tiempo y frecuencia.

11.2 Introducción

El término M-ario deriva de la palabra binario. La letra M representa la cantidad de condiciones posibles (símbolos) para una determinada cantidad de variables binarias consideradas. En los casos anteriores de modulación (OOK, PRK, FSK, etc) habíamos trabajado con bits individuales (1 y 0), por lo que se podría decir que estos métodos son M-arios en donde $M = 2$. Si los símbolos provienen de combinaciones de bits, se puede usar la siguiente ecuación para relacionar el número de bits con el número de símbolos:

$$N = \log_2 M$$

En donde:

N = Cantidad de bits codificados.

M = Cantidad de condiciones posibles de salida con N bits.

Entonces, si por ejemplo tomamos la modulación digital binaria FSK tendríamos dos posibles variantes: "1" lógico o un "0" lógico, así que $M = 2$:

$$N = \log_2 M$$

$$2^N = 2$$

$$N = 1$$

Si se toman dos bits codificados juntos entonces $M=2^2=4$.

El ancho de banda de cada señal modulada M-aria estará relacionado con la tasa de símbolos f_s y con la tasa de bits f_b de la siguiente forma:

$$BW \rightarrow f_s = \frac{f_b}{\log_2 M} = \frac{f_b}{N}$$

Donde f_s es la tasa de símbolos (bauds) y f_b es tasa de bits de entrada (bps).

11.3 Modulación de Amplitud de Cuadratura QAM

La modulación QAM es una técnica de modulación digital multinivel, donde la información está contenida tanto en la amplitud como en la fase de la portadora transmitida. Este método se basa en la transmisión de dos mensajes independientes transportados por un mismo camino, esto se logra modulando una misma portadora desfasada 90° entre un mensaje y otro. Esto da a entender la formación de dos canales ortogonales en un mismo ancho de banda con ello se mejora la eficiencia del mismo. La constelación de señales no está limitada a puntos de señalización en un círculo con la amplitud de portadora de radio como es el caso de MPSK. La señal modulada QAM general es:

$$V_{QAM} = x(t) \cos(w_c t) - y(t) \text{sen}(w_c t)$$

Las portadoras moduladas P y Q conforman dos canales de transmisión diferentes QAM, la separación de estos canales se efectúa en el demodulador.

11.3.1 Representación Geométrica QAM

La representación geométrica de la señal QAM dependerá del número de niveles que tenga la modulación es así que se mostrará los distintos espacios de señales para 8-16 QAM.

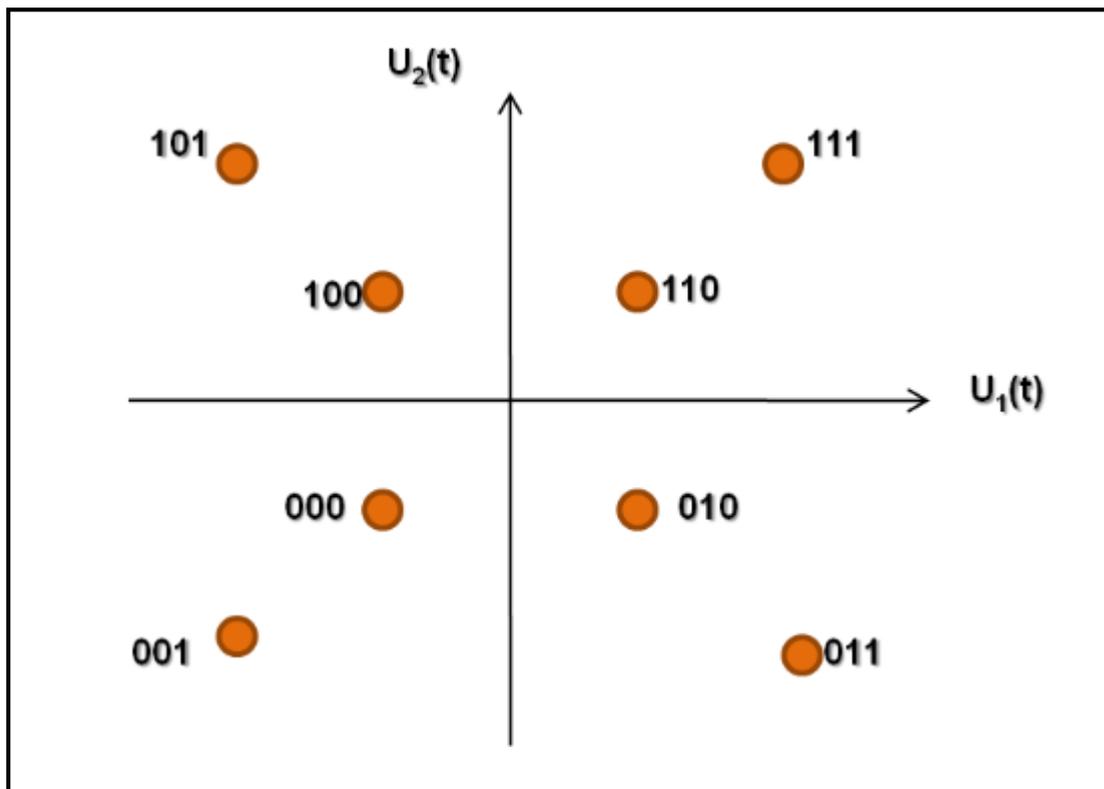


Figura 11.1 Espacio de Señales 8 QAM.

(Fuente: MEZOA, Laboratorio Digital Interactivo, 2011, Pág.50)

11.3.2 Ancho de Banda de QAM

El mínimo ancho de banda necesario para transmitir una señal QAM es el doble del ocupado por la señal digital original que lleva la información.

$$B_{QAM} = 2B_F$$

Donde:

B_F = Ancho de banda de la señal digital de información.

Se sabe que la velocidad de Nyquist-Velocidad de transmisión en baudios (símbolos/segundo) en el caso ideal es:

$$V_s = 2B_F$$

Se ha observado en este capítulo que en la modulación QAM que en un símbolo se transmiten k bits de información $M=2^k$, por lo que:

$$V_b = kV_s$$

Donde:

V_b = velocidad de transmisión en bits por segundo (bps).

Entonces:

$$B_{QAM} = 2B_F = 2 \frac{V_s}{2} = V_s = \frac{V_b}{k}$$

Por lo que se puede observar el ancho de banda requerido para transmitir una señal QAM es la razón entre la velocidad de transmisión (bps) y los bits por símbolo.

11.4 Desarrollo práctica QAM con uso de LabVIEW

El VI que se desplegara en esta práctica, simula un sistema de comunicaciones digitales QAM, el cual tiene como fuente de información una imagen la cual será digitalizada y transmitida, se podrá modificar las condiciones de la transmisión para observar cómo se comporta el sistema.

La Figura 11.2 muestra el resumen de transmisión de una imagen y el proceso que realizara el modulador de la práctica propuesto.

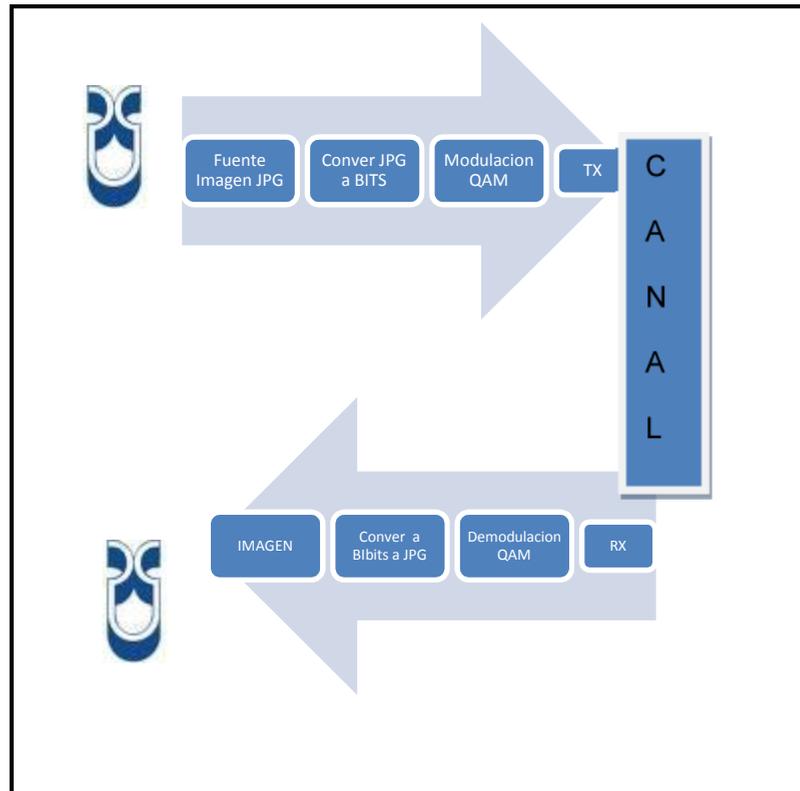


Figura 11.2 Resumen del VI.

1. Abrir el VI proporcionado por el instructor que tiene el nombre de “Práctica 11-QAM”, a continuación se desplegará el siguiente panel frontal Figura 11.3.

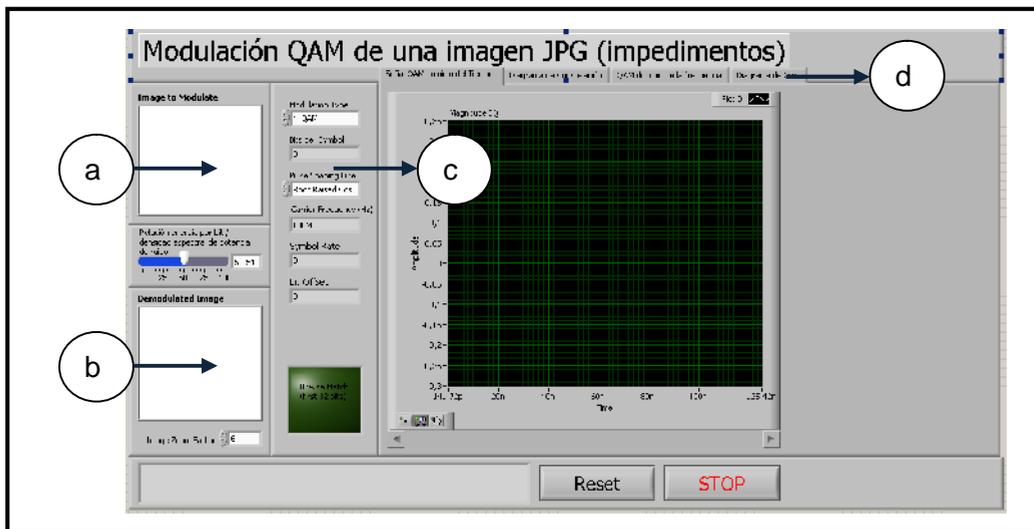


Figura 11.3 Panel frontal practica QAM.

El panel frontal de la Figura 11.3 consta de las siguientes partes:

- a. Image to Modulate: Imagen a modular, imagen JPG que será digitalizada y modulada.
- b. Demodulate Image: Imagen demodulada, aquí se podrá observar la calidad de la imagen recibida.
- c. Controles de las propiedades del sistema QAM entre las que tenemos:
- Modulation Type: Tipo de modulación M-QAM que será seleccionada.
 - Pulse shapping filter: Filtro de forma de pulso que podrá ser utilizado para la trasmisión.
 - Control de la Relación energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido.
 - d. Control tipo pestaña: En este control dispone de las siguientes categorías:
 - Señal QAM en el dominio del tiempo: Indicador grafico de forma de onda de QAM en el dominio del tiempo.
 - Diagrama de Constelación: Diagrama de constelación del esquema QAM que se esté realizando.
 - QAM dominio de la Frecuencia: Indicador grafico del espectro de frecuencia de la señal QAM.
 - Diagrama de Ojos: Indicador grafico del diagrama de ojos de la señal recibida.

2. Al ejecutar el VI se desplegara la siguiente ventana Figura 11.4.

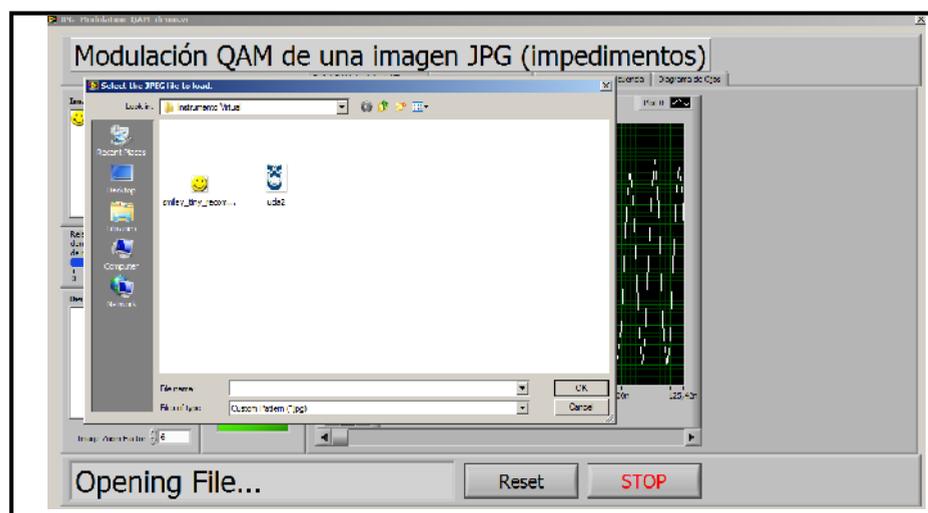


Figura 11.4 Ventana del paso 2.

En la Figura 11.4 se despliega una ventana en la cual nos pide seleccionar una imagen JPG de hasta 2KB.

3. Seleccionamos la Imagen y configuramos los parámetros que a continuación se indican:

- Modulation Type: 4-QAM
- Pulse shaping filter: Raised cosine.
- Relación energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido=100.

4. Al observar el panel frontal del VI y ubicados sobre la pestaña “Señal QAM dominio del tiempo”, podemos ver que la imagen con este característica de canal ideal, la imagen transmitida puede ser reconstruida totalmente el receptor. Figura11.5

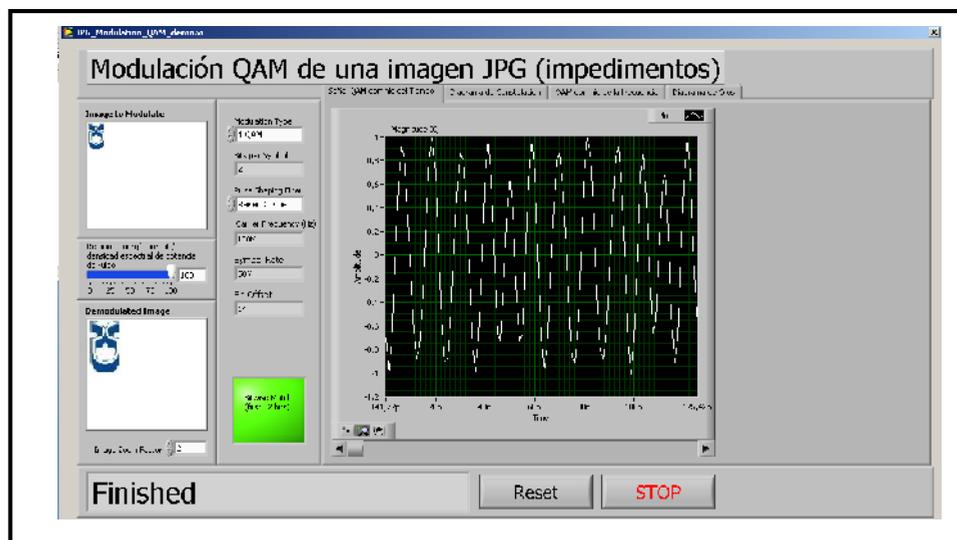


Figura 11.5 Sistema QAM en el dominio del tiempo.

5. Para observar el diagrama de constelación del sistema 4-QAM nos ubicamos sobre la pestaña que tiene el nombre de “Diagrama de constelación”. Se desplegará el diagrama como el de la Figura 11.6, en cual podemos observar que tenemos 4 puntos bien definidos los cuales nos indican los cuatro símbolos que representan.

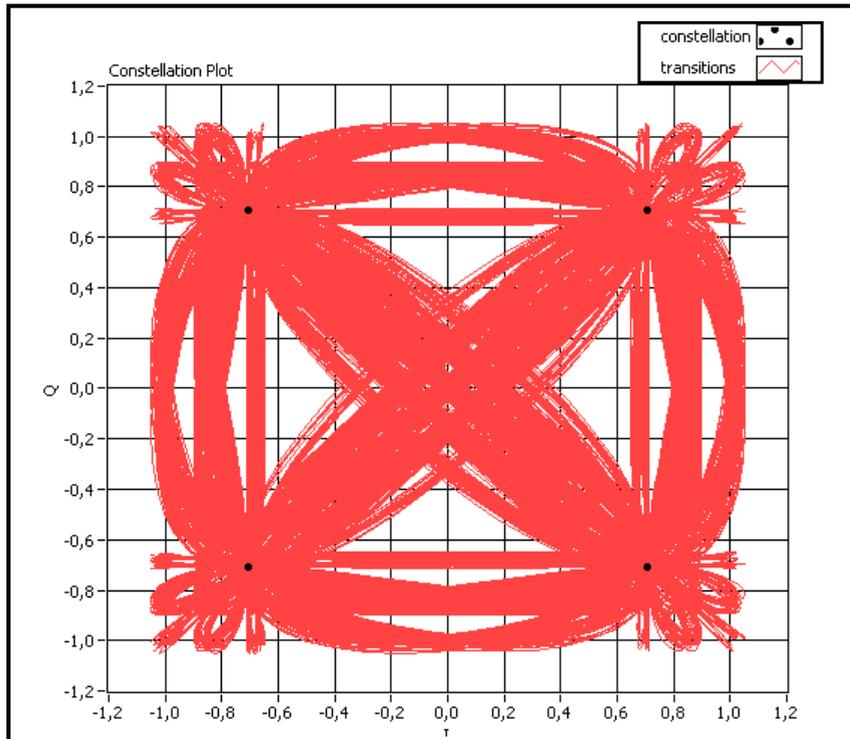


Figura 11.6 Diagrama de constelación del sistema 4-QAM.

6. Para observar el espectro de frecuencia del sistema 4 QAM nos ubicamos sobre la pestaña que tiene el nombre de “QAM en el dominio de la frecuencia”, la representación que se obtiene es la densidad espectral de potencia. Figura 11.7.

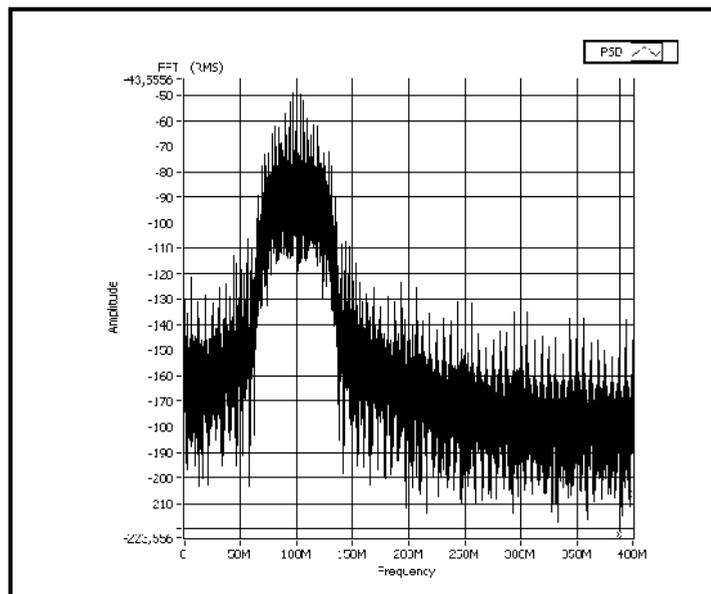


Figura 11.7 Densidad espectral de potencia de 4-QAM.

A partir de la Figura 11.7 podemos obtener el ancho de banda de esta transmisión para esto primero calcularemos basados en la formula:

$$B_{QAM} = 2B_F$$

Donde:

B_F = Ancho de banda de la señal digital de información.

Si el ancho de banda de B_F es tasa de bits obtenemos el siguiente valor:

$$B_{QAM} = 2 * 50MHz = 100MHz$$

Para confirma el valor, nos ayudaremos de los cursores que posee el VI y obtendremos el siguiente valor: 96MHZ.

7. A continuación analizaremos el diagrama de ojo que se encuentra en la pestaña que tiene el mismo nombre. Se observará el diagrama de ojo de la Figura 11.8.

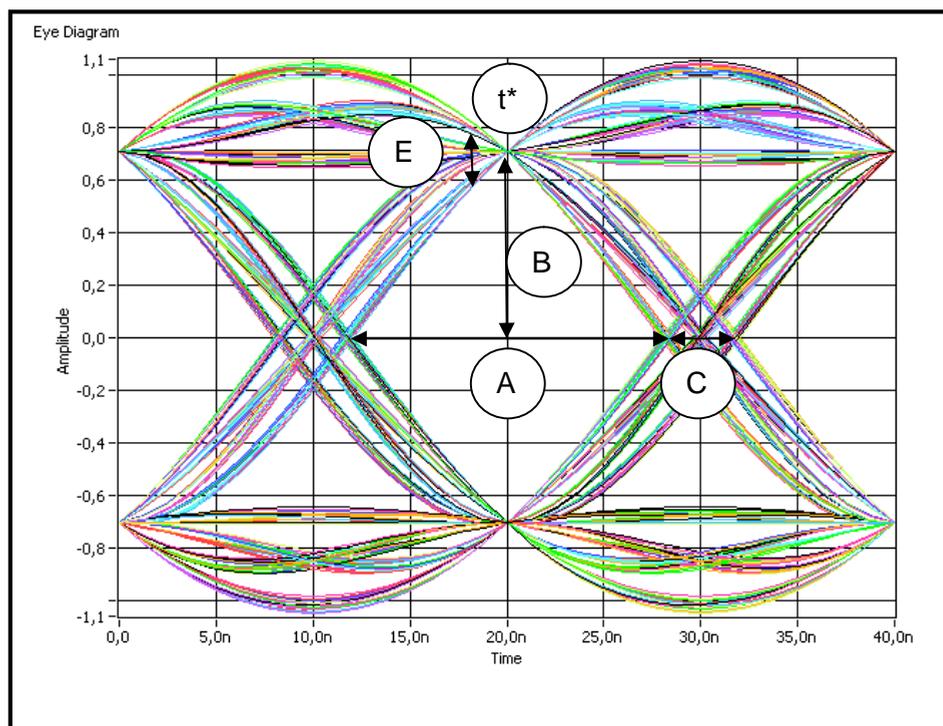


Figura 11.8 Diagrama de ojo de 4-QAM.

Basados en la Figura 11.8 se analizan los siguientes resultados:

- A:** Intervalo de tiempo en el que se puede muestrear la señal para decidir: 15nseg
- B:** Margen de ruido: 0.7V
- C:** Distorsión de los cruces por cero: 5nseg
- E:** Distorsión máxima: 0.2V
- t*:** Instante óptimo de muestreo medido con respecto al origen de tiempos: 20nseg.

11.5 Ejercicio de Aplicación.

1. Modificar el modulador QAM de la práctica para los siguientes valores:

- Modulation Type: 4-QAM
- Pulse shaping filter: Raised cosine.
- Relación energía por bit / densidad espectral de potencia de ruido=35.

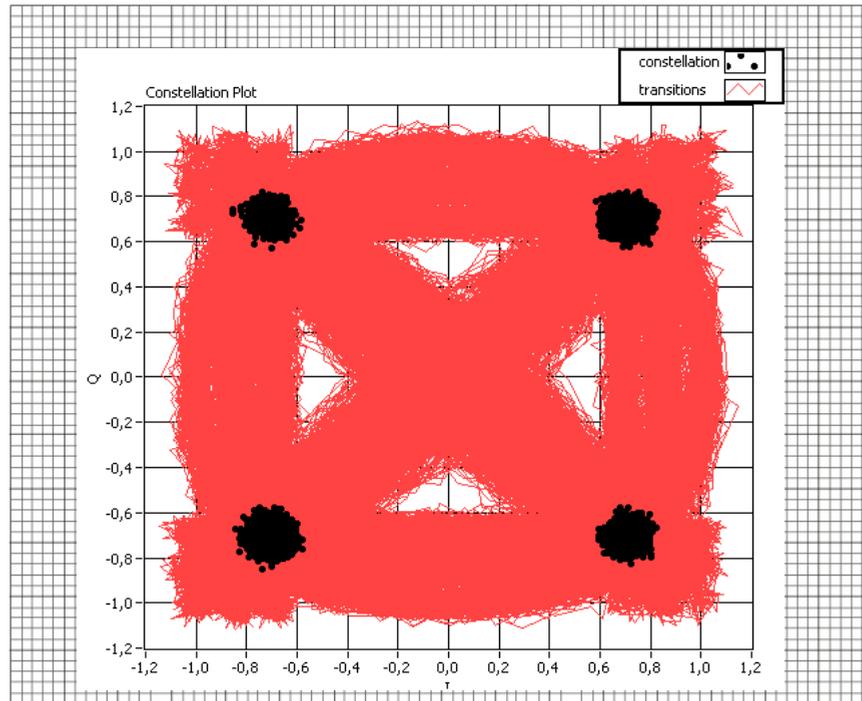
2: ¿Que sucede con la Imagen?.

La imagen pese al ruido aumentado puede ser reconstruida.

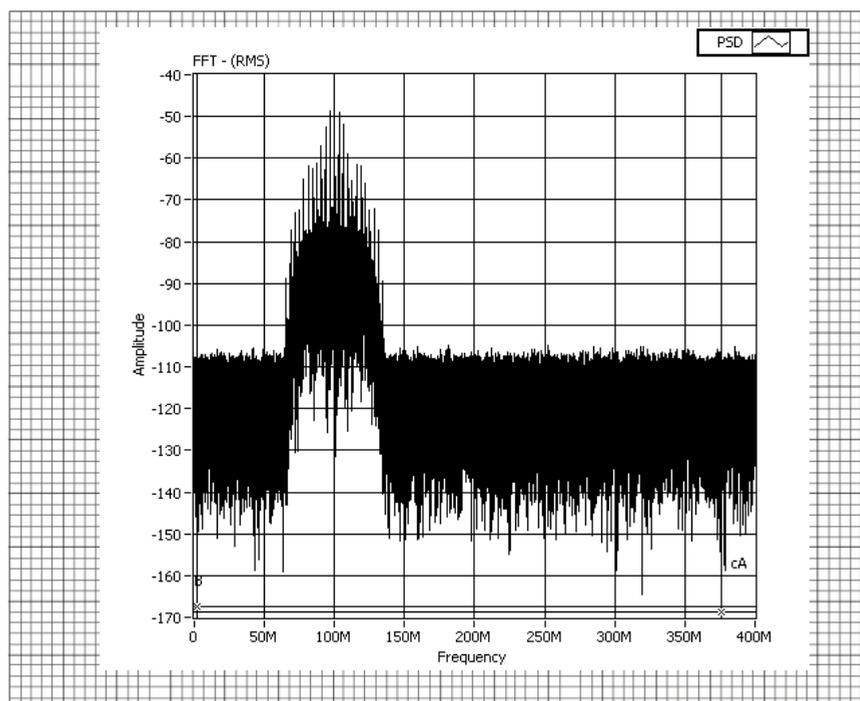
3: ¿Que sucede con el diagrama de Constelación?.

El diagrama de constelación es afectado por el ruido y los símbolos del esquema 4-QAM ya no llegan en los lugares que corresponden.

4. Grafique el diagrama de Constelaciones del Sistema.



8. Calcule los siguientes Anchos de Banda y grafique el espectro de densidad de potencia de la señal QAM del ejercicio:



$$B_{QAM}(CALC) = 2 * 50MHz = 100MHz$$

$$B_{QAM}(Medido) = 95.2MHz.$$

11.6 Conclusiones:

En esta práctica se pudo observar un sistema de comunicaciones completo en el cual simulamos una fuente de información real como es una imagen, se pudo observar el comportamiento del modulador M-QAM, además se pudo realizar diferentes análisis a partir de los diagramas de constelación y ojos.

CONCLUSIONES

Como conclusión del trabajo de graduación se puede mencionar que se han cumplido los objetivos generales y específicos que se plantearon al presentar el proyecto del mismo.

- Mediante la construcción de doce instrumentos virtuales, los mismos que podrán ser utilizados en el laboratorio virtual de comunicaciones de la Universidad del Azuay, se podrán efectuar las practicas relacionadas con los sistemas de comunicaciones.
- Se logro implementar el laboratorio de comunicaciones virtuales mediante la ejecución de prácticas de laboratorio con los estudiantes del sexto ciclo de la carrera de Ingeniería Electrónica.
- La ejecución de las prácticas permitieron un mejor entendimiento para los estudiantes respecto a las clases teóricas impartidas en las horas de clase.

RECOMENDACIONES

Como recomendación final, se propone que el presente documento sea utilizado y mejorado por los estudiantes futuros de la materia de comunicaciones de la Universidad del Azuay, ya que se entrega los instrumentos virtuales desarrollados totalmente abiertos (código fuente), para futura modificaciones y mejoras. Además los instrumentos virtuales son totalmente compatibles para ser utilizados con hardware de la empresa National Instruments, permitiendo en un futuro cercano ser utilizado con señales reales.

- Impulsar la implementación del laboratorio de telecomunicaciones, sean esto a través de la adquisición de equipo o de la implementación de laboratorios virtuales.
- Mejorar el acceso a las plataformas informáticas que a futuro tendrá la FCCTT, permitiendo a los estudiantes la ejecución de la practica mediante acceso remoto a los instrumentos virtuales.

BIBLIOGRAFIA

Referencias Bibliográficas:

- BRICEÑO, José. Comunicaciones ULA. Venezuela. Material de clase 2010. 31 páginas. Primera edición.
- MEZOA, Mariangela. Laboratorio Digital Interactivo. Venezuela. Conexions, 2010. 113 páginas. Primera edición.
- NATIONAL Instruments. RF Handbook. Estados Unidos de Norteamérica. Manuales de usuario 2008. 83 páginas. Segunda edición.
- STREMLER, Ferrel. Sistemas de Comunicación. Estados Unidos de Norteamérica. Editorial Alfaomega. 1995. 685 páginas. Primera edición.
- TOMASI, Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Estados Unidos de Norteamérica. Editorial Prentice Hall, INC. 2001. 935 páginas. Cuarta edición.

Referencias Electrónicas.

- National Instruments. Digital Waveform Timing [en línea]. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3299>. 2008. [consulta 15 de abril de 2011].
- National Instruments. RF tutorials and examples [en línea]. www.ni.com/rf.2011. [consulta 5 de enero de 2011].

ANEXO 1.