

# FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

## ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Elaboración de un manual de prácticas de comunicaciones inalámbricas utilizando el equipo NI PXIe-1075.

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

**Autores:** 

DAVID FERNANDO LÓPEZ NAVAS
PAÚL ESTEBAN VALLEJO LUCERO

**Director:** 

JUAN PATRICIO CÓRDOVA OCHOA

**CUENCA, ECUADOR** 

2016

#### **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a DIOS y en especial a mi querida madre ELIANA NAVAS que ha sido mi consejera y confidente, a mi hermano GABRIEL LÓPEZ que siempre ha actuado como un padre y amigo en los momentos más difíciles, siendo los pilares fundamentales en los logros alcanzados en mi vida.

David Fernando López Navas.

ii

#### **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de gran importancia e ímpetu para mi vida profesional a mi DIOS, quien me ha regalado salud, sabiduría y la oportunidad de conocer personas tan maravillosas que han hecho de este trabajo un éxito. A mi amada esposa FANNY e hijas ANA PAULA y SOFÍA, quienes han sido mi inspiración para llegar a cumplir esta meta y el inicio de un nuevo proyecto de vida. A mis padres FANY y LUIS, desde muy pequeño me han guiado y enseñado el verdadero significado del amor a la familia. A mis hermanos JOHNNY, MAFER, GABRIELA por su compañía siempre.

Paúl Esteban Vallejo Lucero.

iii

**AGRADECIMIENTOS** 

Agradezco a toda mi familia por el apoyo en mis estudios, en especial a mis tías NELVA y GLORIA por los consejos y apoyo brindado para este logro alcanzado, a mis primas SANDRA y CRISTINA por estar en los momentos de dificultad.

Un agradecimiento especial a los Ingenieros Juan Córdova, Daniel Iturralde y Esteban Coello por guiarnos, ayudarnos y por todo el tiempo brindado en el desarrollo del trabajo de titulación.

David Fernando López Navas.

iv

#### **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, esposa y toda mi familia, quienes de manera alentadora han manifestado su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo. Dejar constancia de mi más sincera gratitud a los Ingenieros Juan Córdova, Daniel Iturralde y Esteban Coello por su constante guía, ayuda y tiempo brindado en el desarrollo de este trabajo. Muchas gracias.

Paúl Esteban Vallejo Lucero.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDOS	Pag.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	ixxii
ÍNDICE DE TABLAS	xxii
ÍNDICE DE ANEXOS	xxiv
RESUMEN	XXV
ABSTRACT	xxvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: DESARROLLO DE LA ETAPA EXPLORATO	ORIA2
1.1. Análisis del Equipo NI PXI.	2
1.1.1. Características del equipo	3
1.2. Análisis de los módulos disponibles	7
1.2.1. Características de los módulos	29
1.3. Protocolos de utilización del equipo	33
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO	35
2.1. Funcionamiento del equipo NI PXIe-1075 en sistemas de tele-	comunicaciones. 35
2.2. Establecimiento del modelo de practicas	37
2.3.Práctica: Instrumentación con señales reales	38
2.3.1. Generador y Analizador de señales de radio frecuencia	38

2.3.1	.1. Generador de señal de onda continua (WC)	39
2.3.1	.2. Adquisición de Espectro.	45
2.3.2.	Comprobación de los programas de Instrumentación	54
2.3.3.	Ejercicios de Aplicación.	57
CAPÍTU	LO 3: COMUNICACIONES ANALÓGICAS Y DIGITALES	59
3.1. Modu	ılación Analógica	60
3.2. Tipos	s de modulación analógicas	61
3.2.1. P	Práctica: Modulación y demodulación AM	61
3.2.1	.1. Modulación AM, desarrollo de la práctica	65
3.2.1	.2. Demodulación AM, desarrollo de la práctica.	73
3.2.1	.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación	AM. 82
3.2.1	.4. Ejercicios de aplicación de la modulación AM.	86
3.2.2. P	Práctica: Modulación y demodulación FM	87
3.2.2	.1. Modulación FM, desarrollo de la práctica	91
3.2.2	.2. Demodulación FM, desarrollo de la práctica	97
3.2.2	.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación	FM.
		103
3.2.2	.4. Ejercicios de aplicación de la modulación FM	106
3.3.Comu	nicaciones Digitales	108
3.4.Tipos	de modulación digital.	110
3.4.1. P	Práctica: Modulación y demodulación ASK	110
3.4.1	.1. Modulación ASK, desarrollo de la práctica	113
3.4.1	.2. Demodulación ASK, desarrollo de la práctica	123
3.4.1	.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación	ASK.
		135

3.4.1.4. Ejercicios de aplicación de la modulación y demodulación ASK	137
3.4.2. Práctica: Modulación y demodulación FSK	139
3.4.2.1. Modulación FSK, desarrollo de la práctica	142
3.4.2.2. Demodulación FSK, desarrollo de la práctica	149
3.4.2.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación F	SK.
	157
3.4.2.4. Ejercicios de aplicación de la modulación FSK	159
3.4.3. Práctica: Modulación y demodulación PSK	161
3.4.3.1. Modulación PSK, desarrollo de la práctica.	167
3.4.3.2. Demodulación PSK, desarrollo de la práctica.	173
3.4.3.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación P	SK.
	181
3.4.3.4. Ejercicios de aplicación de la modulación PSK	184
3.4.4. Práctica: Modulación y demodulación QAM	185
3.4.4.1. Modulación QAM, desarrollo de la práctica.	189
3.4.4.2. Demodulación QAM, desarrollo de la práctica.	195
3.4.4.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación Q	AM.
	203
3.4.4.4. Ejercicios de aplicación de la modulación QAM	206
CAPÍTULO 4: PROPAGACIÓN Y ANTENAS	207
4.1. Antenas y Propagación	207
4.2. Antenas	210
4.2.1. Tipos de antenas.	211
4.2.2 Características de las antenas.	214
4.2.2.1. Diagrama de radiación	214
4.2.2.2. Densidad de potencia radiada	
-	

4.2.2.3. Intensidad de radiación.	218
4.2.2.4. Directividad.	219
4.2.2.5. Polarización de antenas	220
4.3. Práctica: Diagrama de radiación.	221
4.3.1. Diagramas de radiación, desarrollo de la práctica	221
4.3.2. Comprobación del programa del diagrama de radiación	229
4.3.3. Ejercicios de aplicación del diagrama de radiación	232
CONCLUSIONES	233
RECOMENDACIONES	234
BIBLIOGRAFÍA	235
ANEXOS	239

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Partes del equipo NI PXI	3
Figura 1.2 Buses de temporización y disparo PXI	4
Figura 1.3 Buses de temporización y disparo PXI Express	4
Figura 1.4 Chasis PXIe-1075 de National Instruments	7
Figura 1.5 Vista frontal del chasis NI PXIe-1075	9
Figura 1.6 Vista posterior del chasis NI PXIe-1075	. 10
Figura 1.7 Distribución del sistema PCI en el chasis NI PXIe-1075, arquitectura	. 12
Figura 1.8 Controlador NI PXIe-8133	. 13
Figura 1.9 Diagrama de bloques de NI PXIe-8133	. 14
Figura 1.10 Generador de señales OL NI PXI-5652	. 15
Figura 1.11 Diagrama de bloques del funcionamiento del NI PXI-5652	. 17
Figura 1.12 RF Downconverter NI PXIe-5601	. 18
Figura 1.13 Diagrama de bloques RF Dowconverter NI PXIe-5601	. 19
Figura 1.14 Digitalizador NI PXIe-5622	. 19
Figura 1.15 Diagrama de bloques OSP NI PXIe-5622	. 20
Figura 1.16 Digitalizador osciloscopio NI PXI-5122	. 21
Figura 1.17 Diagrama de bloques del Hardware del NI PXI-5122	. 22
Figura 1.18 Multiplexor NI PXI-2596	. 23
Figura 1.19 Topología del NI PXI-2596	. 24
Figura 1.20 Generador de señal RF NI PXIe-5450	. 25
Figura 1.21 Diagrama de bloques OSP del NI PXIe-5450	. 25
Figura 1.22 Diagrama de bloques del NI PXIe-5450	. 27
Figura 1.23 Diagrama de bloques del NI PXIe-5611	. 28
Figura 1.24 Diagrama de bloques del NI PXIe-5673	. 30
Figura 1.25 Conexiones físicas entre módulos para formar el NI PXIe-5673	. 31

Figura 1.26 Diagrama de bloques del NI PXIe-5663	32
Figura 1.27 Conexiones físicas entre módulos para formar el NI PXIe-5663	32
Figura 1.28 Configuración de módulos de generación y recepción de señales	33
Figura 2.1 Modelo de estudio de un enlace cerrado	35
Figura 2.2 Herramientas del generador y analizador de señales	39
Figura 2.3 niRFSG Initialize.vi	39
Figura 2.4 niRFSG Configure RF.vi	40
Figura 2.5 niRFSG Configure Generation Mode.vi	40
Figura 2.6 niRFSG Initiate.vi	40
Figura 2.7 niRFSG Check Generation Status	41
Figura 2.8 niRFSG Close.vi	41
Figura 2.9 Crear nuevo proyecto	41
Figura 2.10 Paneles de programación	42
Figura 2.11 Controles para frecuencia y potencia	42
Figura 2.12 Control modo de generación	42
Figura 2.13 Control de módulo Tx	43
Figura 2.14 Configuración para la generación de la señal	43
Figura 2.15 While loop	44
Figura 2.16 Diagrama de bloques del generador de señales	44
Figura 2.17 Panel frontal del generador de señales	45
Figura 2.18 niRFSA Initialize.vi	45
Figura 2.19 niRFSA Configure Acquisition type.vi	46
Figura 2.20 niRFSA Configure Ref Clock.vi	46
Figura 2.21 niRFSA Configure Reference Level.vi	46
Figura 2.22 niRFSA Configure Spectrum Frequency Star Stop.vi	47
Figura 2.23 niRFSA Configure resolution Bandwidth.vi	47
Figura 2.24 niRFSA Read Power Spectrum (Cluster)	48

Figura 2.25 niRFSA Close.vi	48
Figura 2.26 Waveform Graphs	48
Figura 2.27 Timer Wait (ms)	49
Figura 2.28 SMT Spectrum Peak Search.vi	49
Figura 2.29 Index Array	49
Figura 2.30 Unbundle	50
Figura 2.31 Controles de configuración, panel frontal	51
Figura 2.32 Herramientas de configuración, diagrama de bloques	51
Figura 2.33 Analizador de la señal, diagrama de bloques	52
Figura 2.34 Configuración de parámetros del Spectrum Peak Search.vi	52
Figura 2.35 Diagrama de bloques, obtención de frecuencia y potencia	53
Figura 2.36 Panel frontal de adquisición de señales	53
Figura 2.37 Señal generada	55
Figura 2.38 Espectro de la señal generada	55
Figura 2.39 Espectro de la señal generada	56
Figura 3.1 Modulación AM	61
Figura 3.2 Índice de modulación AM	63
Figura 3.3 Espectro de la señal AM	64
Figura 3.4 Nodo de propiedad	65
Figura 3.5 niRFSG Write Arb Waveform (Complex Input).vi	65
Figura 3.6 MT Modulate AM.vi	66
Figura 3.7 rfsg_FindWaveformParamsFrequency.vi	66
Figura 3.8 Basic Function Generator.vi	67
Figura 3.9 niRFSG Clear All Arb Waveform.vi	67
Figura 3.10 Configuración módulo Tx	68
Figura 3.11 Configuración de la señal portadora	68
Figura 3.12 Configuración del ancho de banda	68

xii

Figura 3.13 Parámetros de la señal moduladora	69
Figura 3.14 Parámetros y generación de la señal moduladora	69
Figura 3.15 Modulación AM	69
Figura 3.16 Escritura de la señal para la transmisión	70
Figura 3.17 Estado de generación	70
Figura 3.18 Cierre de la transmisión	70
Figura 3.19 Diagrama de bloques modulación AM	71
Figura 3.20 Panel frontal Modulación AM	72
Figura 3.21 niRFSA Configure IQ Carrier Frequency.vi	73
Figura 3.22 niRFSA Configure IQ Rate.vi	73
Figura 3.23 niRFSA Configure Number of Samples.vi	73
Figura 3.24 niRFSA Read IQ.vi	74
Figura 3.25 MT Demodulate AM.vi	74
Figura 3.26 Configuración módulo Rx	74
Figura 3.27 Clock de referencia	75
Figura 3.28 Configuración para obtener señal IQ	75
Figura 3.29 Herramientas de configuración para obtener señal	75
Figura 3.30 Demodulación de la señal AM	76
Figura 3.31 Señal Modulada AM	76
Figura 3.32 Configuración para obtener espectro AM	76
Figura 3.33 Herramientas de configuración para el espectro	77
Figura 3.34 Espectro AM	77
Figura 3.35 Cierre de sesión de adquisición	77
Figura 3.36 Controles de configuración	78
Figura 3.37 Diagrama de bloques demodulación AM. (caso 1)	79
Figura 3.38 Diagrama de bloques del análisis del espectro AM. (caso 2)	80
Figura 3.39 Panel frontal Demodulación AM	81

Figura 3.40 Configuración del panel frontal modulación AM	82
Figura 3.41 Configuración del panel frontal demodulación AM	82
Figura 3.42 Espectro y mensaje AM	83
Figura 3.43 Modulador AM con portadora suprimida	83
Figura 3.44 Demodulador AM con portadora suprimida	84
Figura 3.45 Configuración del Modulador AM	84
Figura 3.46 Espectro de la señal AM con sus bandas laterales	84
Figura 3.47 Modulación FM	88
Figura 3.48 Espectro de la señal FM	90
Figura 3.49 Pares de frecuencias según Beseel	90
Figura 3.50 MT Modulate FM.vi	92
Figura 3.51 Configuración módulo Tx	92
Figura 3.52 Configuración de portadora y parámetros de moduladora	93
Figura 3.53 Configuración del ancho de banda	93
Figura 3.54 Generación de la onda moduladora	93
Figura 3.55 Modulación FM	94
Figura 3.56 Escritura de la señal FM, transmisión y cierre de la sesión de tr	ansmisión
	94
Figura 3.57 Diagrama de bloques de la Modulación FM	95
Figura 3.58 Panel frontal de la Modulación FM	96
Figura 3.59 MT Demodulate FM.vi	97
Figura 3.60 Configuración módulo Rx	97
Figura 3.61 Herramientas de configuración de la señal IQ	98
Figura 3.62 Demodulación de la señal FM	98
Figura 3.63 Señal modulada FM	98
Figura 3.64 Adquisición del espectro de la señal FM	99
Figura 3.65 Cierre de sesión de adquisición	99

Figura 3.66 Controles de configuración	. 99
Figura 3.67 Diagrama de bloques, Demodulación FM (caso 1)	100
Figura 3.68 Diagrama de bloques, análisis del espectro FM (caso 2)	101
Figura 3.69 Panel frontal Demodulación FM	102
Figura 3.70 Configuración del modulador FM	103
Figura 3.71 Configuración del demodulador FM	103
Figura 3.72 Espectro y mensaje FM	104
Figura 3.73 Configuración del modulador FM con m = 0.25	104
Figura 3.74 Demodulador FM, espectro de la modulación FM con m = 0.25	105
Figura 3.75 Diagrama de ojo	108
Figura 3.76 Diagrama de Constelación	109
Figura 3.77 Modulación ASK	111
Figura 3.78 Ancho de banda mínimo ASK	112
Figura 3.79 MT Generate System Parameters.vi	113
Figura 3.80 MT Generate Filter Coefficients.vi.	113
Figura 3.81 MT Modulate ASK.vi	114
Figura 3.82 mod_Create Tx Sequency.vi	114
Figura 3.83 MT Generate Bits (User Defined).vi	115
Figura 3.84 Configuración módulo Tx	115
Figura 3.85 Configuración de la señal portadora	115
Figura 3.86 Configuración de los parámetros de la portadora	116
Figura 3.87 Parámetros y coeficientes de filtro para la modulación ASK	116
Figura 3.88 Parámetros del sistema para la modulación ASK	116
Figura 3.89 Configuración del ancho de banda	117
Figura 3.90 Generación de bits, señal moduladora	118
Figura 3.91 Ingresar bits por usuario, señal moduladora	118
Figura 3.92 Modulación ASK	118

Figura 3.93 Tasa de bits para el transmisor	118
Figura 3.94 Muestreo de la señal con la nueva tasa de bits	119
Figura 3.95 Inicializa la generación de la señal	119
Figura 3.96 Estado de generación	119
Figura 3.97 Cierre de la generación	120
Figura 3.98 Diagrama de bloques modulación ASK	121
Figura 3.99 Panel frontal modulación ASK	122
Figura 3.100 MT Resample (Complex Cluster).vi	123
Figura 3.101 MT Demodulate ASK.vi	123
Figura 3.102 mod_Check Power Level.vi	124
Figura 3.103 MT Format Eye Diagram (complex).vi	124
Figura 3.104 mod_Truncate Filter Transient.vi	124
Figura 3.105 MT Format Constellation.vi	125
Figura 3.106 MT Measure ASK Quadrature Impairments.vi	125
Figura 3.107 VI Server Reference	125
Figura 3.108 Configuración módulo Rx	126
Figura 3.109 Parámetros del sistema para la demodulación ASK	126
Figura 3.110 Clock de referencia	126
Figura 3.111 Configuración para la demodulación	126
Figura 3.112 Configuración para adquisición de la señal ASK	127
Figura 3.113 Configuración número de muestras	127
Figura 3.114 Parámetros y coeficientes de filtro para la demodulación ASK	127
Figura 3.115 Recuperación de la señal IQ	128
Figura 3.116 Realiza la demodulación ASK	128
Figura 3.117 Obtiene parámetros de la señal modulada ASK	128
Figura 3.118 Diagrama de ojos ASK	129
Figura 3.119 Diagrama de constelación ASK	129

Figura 3.120 Parámetros de la señal demodulada ASK	129
Figura 3.121 Configuración para la adquisición del espectro de la señal ASK.	130
Figura 3.122 Detiene la recepción de la señal	130
Figura 3.123 Cierra la sesión de la adquisición	130
Figura 3.124 Controles de configuración	131
Figura 3.125 Diagrama de bloques demodulación ASK (caso 1)	132
Figura 3.126 Diagrama de bloques, análisis del espectro ASK (caso 2)	133
Figura 3.127 Panel frontal Demodulación ASK	134
Figura 3.128 Configuración del modulador 2-ASK y bits transmitidos	135
Figura 3.129 Configuración del demodulador, constelación, diagrama de ojo y espectro	
Figura 3.130 Configuración del modulador para 8-ASK	136
Figura 3.131 Configuración de demodulador, constelación y diagrama de ojo	8 -ASK
Figura 3.132 Modulación FSK	
Figura 3.133 MT Bits Stream to Digital Graph.vi	142
Figura 3.134 MT Modulate FSK.vi	142
Figura 3.135 Configuración módulo Tx	143
Figura 3.136 Configuración de la señal portadora y sus parámetros	143
Figura 3.137 Configuración del ancho de banda	143
Figura 3.138 Configuración parámetros del sistema FSK	144
Figura 3.139 Parámetros y coeficientes de filtros FSK	144
Figura 3.140 Generación de la señal moduladora	144
Figura 3.141 Modulación FSK	145
Figura 3.142 Inicializa la generación	145
Figura 3.143 Estado de la generación	145
Figura 3.144 Cierre de sesión de la generación	146
Figura 3.145 Diagrama de bloques modulación FSK	147

xvii

Figura 3.173 Parámetros para la modulación PSK de la señal	169
Figura 3.174 Reconstrucción de la señal PSK modulada con la nueva tasa IQ	169
Figura 3.175 Gráfica de los bits a transmitir	170
Figura 3.176 Constelación de la señal modulada	170
Figura 3.177 Generación, estado de generación y cierre de sesión	170
Figura 3.178 Diagrama de bloques Modulación PSK	171
Figura 3.179 Panel frontal Modulación PSK	172
Figura 3.180 MT Demodulate PSK.vi	173
Figura 3.181 Configuración del módulo Rx	173
Figura 3.182 Parámetros del sistema PSK para la demodulación	174
Figura 3.183 Configuración para adquisición de la señal IQ	174
Figura 3.184 Número de muestras y coeficientes de filtros	174
Figura 3.185 Recuperación de la señal IQ	175
Figura 3.186 Demodulación PSK	175
Figura 3.187 Parámetros y medidas de la señal modulada recibida	175
Figura 3.188 Parámetros y medidas de la señal demodulada	175
Figura 3.189 Diagrama de ojo y constelación PSK	176
Figura 3.190 Configuración para adquisición del espectro de la señal PSK	176
Figura 3.191 Controles de configuración	177
Figura 3.192 Diagrama de bloques demodulación PSK (caso 1)	178
Figura 3.193 Diagrama de bloques, análisis del espectro PSK (caso 2)	179
Figura 3.194 Panel frontal Demodulación PSK	180
Figura 3.195 Configuración del modulador 2-PSK y bits transmitidos	181
Figura 3.196 Demodulador, constelación, diagrama de ojo y espectro 2-PSK	182
Figura 3.197 Configuración del modulador para 4-PSK	183
Figura 3.198 Configuración, constelación y diagrama de ojo 4-PSK	183
Figura 3.199 Modulación 8-QAM	186

Figura 3.200 8-QAM, 8-PSK	187
Figura 3.201 MT Modulate QAM.vi	189
Figura 3.202 Configuración del módulo Tx	189
Figura 3.203 Configuración de la señal portadora y sus parámetros	190
Figura 3.204 Configuración del ancho de banda	190
Figura 3.205 Parámetros del sistema y coeficientes de filtros QAM	190
Figura 3.206 Generación de la señal moduladora	191
Figura 3.207 Realiza la modulación QAM	191
Figura 3.208 Reconstrucción de la señal QAM con la nueva tasa IQ	191
Figura 3.209 Generación, estado de generación y cierre de sesión	192
Figura 3.210 Diagrama de bloques modulación QAM	193
Figura 3.211 Panel frontal Modulación QAM	194
Figura 3.212 MT Demodulate QAM.vi	195
Figura 3.213 MT Generate QAM System Parameters.vi	195
Figura 3.214 Configuración módulo Rx	196
Figura 3.215 Parámetros del sistema para la demodulación QAM	196
Figura 3.216 Configuración para adquisición de la señal IQ	196
Figura 3.217 Número de muestras y coeficientes de filtros	197
Figura 3.218 Recuperación de la señal IQ	197
Figura 3.219 Demodulación QAM	197
Figura 3.220 Parámetros y medidas de la señal modulada QAM	198
Figura 3.221 Parámetros y medidas de la señal demodulada QAM	198
Figura 3.222 Diagrama de ojo y constelación de la señal QAM	198
Figura 3.223 Configuración para adquisición de espectro de señal QAM	199
Figura 3.224 Cierra la sesión de la adquisición	199
Figura 3.225 Controles de configuración	199
Figura 3.226 Diagrama de bloques demodulación OAM (caso 1)	200

Figura 3.227 Diagrama de bloques, análisis del espectro QAM (caso 2)	201
Figura 3.228 Panel frontal demodulación QAM	202
Figura 3.229 Configuración del modulador 4-QAM, bits transmitidos	203
Figura 3.230 Demodulador, constelación, diagrama de ojo y espectro de señal 4	-
QAM	204
Figura 3.231 Configuración del modulador para 16-QAM	205
Figura 3.232 Configuración, constelación y diagrama de ojo para 16-QAM	205
Figura 4.1 Onda electromagnética	208
Figura 4.2 Propagación de la onda electromagnética	208
Figura 4.3 Espectro de frecuencias	209
Figura 4.4 Banda de frecuencias	209
Figura 4.5 Frecuencias Para TV y FM	209
Figura 4.6 Frecuencias de microondas	210
Figura 4.7 Frecuencias infrarrojo, visible y ultravioleta	210
Figura 4.8 Antena parabólica	211
Figura 4.9 Antena de panel plano	212
Figura 4.10 Antena Yagi	212
Figura 4.11 Elementos de la antena Yagi	213
Figura 4.12 Diagrama de radiación	214
Figura 4.13 Coordenadas esféricas para un diagrama de radiación	215
Figura 4.14 Lóbulos de radiación	216
Figura 4.15 Regiones de campo	217
Figura 4.16 Polarización lineal	220
Figura 4.17 niRFSA Read Power Spectrum (Cluster).vi	221
Figura 4.18 SMT Spectrum Peak Search.vi	221
Figura 4.19 Polar Plot With Options.vi	222
Figura 4.20 Configuración del módulo Rx	222

Figura 4.21 Configuración para adquisición del espectro
Figura 4.22 Lee el espectro de la señal recibida
Figura 4.23 Obtenemos frecuencia y potencia del espectro
Figura 4.24 Diagrama polar
Figura 4.25 Diagrama cartesiano
Figura 4.26 Parámetros para el diagrama polar
Figura 4.27 Ángulo de giro de 360°
Figura 4.28 Caso false, señal anterior
Figura 4.29 Cierra de sesión de la configuración
Figura 4.30 Diagrama de bloques de radiación de antenas
Figura 4.31 Panel frontal de radiación de antenas
Figura 4.32 Configuración del generador de señales
Figura 4.33 Configuración del panel frontal radiación de antenas
Figura 4.34 Captura de la potencia radiada en el programa
Figura 4.35 Diagrama de radiación
Figura 4.36 Diagrama cartesiano
Figura 4.37 Potencia radiada

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros para el generador de señales	54
Tabla 2.2 Parámetros para la adquisición de espectro	54
Tabla 2.3 Antenas utilizadas para la comprobación	54
Tabla 2.4 Parámetros para el generador de señales	56
Tabla 2.5 Parámetros para la adquisición de espectro	56
Tabla 2.6 Parámetros para la adquisición de espectro. Ejercicio 1	57
Tabla 2.7 Parámetros del generador de señales. Ejercicio 2	57
Tabla 2.8 Parámetros para la adquisición de espectro. Ejercicio 2	58
Tabla 3.1 Antenas utilizadas para la modulación y demodulación AM	82
Tabla 3.2 Valores para el cálculo de frecuencias laterales y ancho de banda AM.	86
Tabla 3.3 Antenas Utilizadas para el ejercicio de modulación AM	86
Tabla 3.4 Antenas utilizadas para comprobar modulación FM	. 103
Tabla 3.5 Valores para el cálculo de frecuencias de bandas y ancho de banda FM	106
Tabla 3.6 Antenas utilizadas para el ejercicio de modulación FM	. 107
Tabla 3.7 Antenas utilizadas para comprobación de la modulación ASK	. 135
Tabla 3.8 Antenas Utilizadas para el ejercicio de modulación ASK	. 137
Tabla 3.9 Parámetros para el modulador ASK	. 138
Tabla 3.10 Parámetros para el demodulador ASK	. 138
Tabla 3.11 Antenas utilizadas para comprobar modulación FSK	. 157
Tabla 3.12 Antenas utilizadas para el ejercicio FSK	. 159
Tabla 3.13 Parámetros para el modulador FSK	. 160
Tabla 3.14 Parámetros para el demodulador FSK	. 160
Tabla 3.15 Ancho de banda para M-PSK	. 166
Tabla 3.16 Antenas utilizadas para comprobación de la modulación PSK	. 181
Tabla 3.17 Antenas utilizadas para el ejercicio PSK	. 184

Tabla 3.18 Parámetros para el modulador PSK	. 184
Tabla 3.19 Parámetros para el demodulador PSK	. 185
Tabla 3.20 Ancho de banda para la modulación M-QAM	. 188
Tabla 3.21 Antenas utilizadas para comprobar modulación QAM	. 203
Tabla 3.22 Antenas utilizadas para el ejercicio QAM	. 206
Tabla 3.23 Parámetros para el modulador QAM	. 206
Tabla 3.24 Parámetros para el demodulador QAM	. 206
Tabla 4.1 Antenas utilizadas para comprobar la radiación de antenas	. 229
Tabla 4.2 Parámetros para el generador de señales y el programa del diagrama de	,
radiación con antenas de panel de 5.8GHz	. 232

# ÍNDICE DE ANEXOS

SOLUCIONARIO
Capítulo 2
Ejercicio de aplicación: Generador y receptor de señales reales
Capítulo 3
Ejercicio de aplicación: Modulación y demodulación AM
Ejercicio de aplicación: Modulación y demodulación FM
Ejercicio de aplicación: Modulación y demodulación ASK
Ejercicio de aplicación: Modulación y demodulación FSK
Ejercicio de aplicación: Modulación y demodulación PSK
Ejercicio de aplicación: Modulación y demodulación QAM
Capítulo 4
Ejercicio de aplicación: Diagrama de radiación

## "ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE PRÁCTICAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS UTILIZANDO EL EQUIPO NI PXIE-1075"

#### RESUMEN

El manual de prácticas de comunicaciones inalámbricas contiene una análisis descriptivo del Equipo NI PXIe-1075 para el buen uso del laboratorio de telecomunicaciones, además contiene un conjunto de prácticas desarrolladas en el software LabVIEW, abarcando temas relacionados con la generación, transmisión, recepción y análisis de las señales tanto para comunicaciones analógicas como digitales, incluyendo prácticas de propagación y antenas, donde los docentes y estudiantes podrán ver el comportamiento de señales reales en un enlace cerrado del proceso de telecomunicaciones inalámbricas. Estas herramientas permitirán fortalecer los estudios teóricos impartidos en las cátedras de la Universidad del Azuay en las asignaturas de señales y sistemas, comunicaciones analógicas y digitales, propagación y sistemas radiantes, y comunicaciones inalámbricas de la carrera de Ingeniería Electrónica.

**Palabras Clave:** Equipo NI-PXIe, LabVIEW, Comunicaciones inalámbricas, Modulación y demodulación, Señales reales.

Ing. Juan Patricio Córdova Ochoa.

CORDON

Ing. Hugo Marcelo Torres Salamea.

Director de Tesis.

Paúl Esteban Vallejo Lucero.

Director de Escuela.

David Fernando López Navas.

Autores.

# "DEVELOPMENT OF A WIRELESS COMMUNICATION PRACTICE HANDBOOK USING NI PXIe-1075 EQUIPMENT "

#### ABSTRACT

This wireless communication practice handbook contains a descriptive analysis of the NI PXIe-1075 equipment for the proper use of the telecommunications laboratory. Additionally, it presents a set of practices developed in LabVIEW software, covering topics related to the generation, transmission, reception and analysis of signals for both analog and digital communications. It includes propagation practices and antennas where teachers and students can see in an enclosed link the behavior of real signals of the wireless telecommunication process. These tools will help strengthen the theoretical courses taught in the Electronic Engineering Faculty at *Universidad del Azuay* in the subjects of signals and systems, analog and digital communications, propagation and antenna systems, and wireless communications.

**Keywords:** NI-Pxie Equipment, Labview, Wireless Communications, Modulation and Demodulation, Real Signals.

Ing. Juan Patricio Córdova Ochoa.

CORDOWS

Thesis Director

Paul Esteban Vallejo Lucero.

Ing. Hugo Marcelo Torres Salamea.

School Director

David Fernando López Navas.

Authors

AZUAY

Doto. Idiomas

Lic. Lourdes Crespo

1

López Navas David Fernando

Vallejo Lucero Paúl Esteban

Trabajo de Graduación

Ing. Juan Patricio Córdova Ochoa

Enero, 2016

# ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE PRÁCTICAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS UTILIZANDO EL EQUIPO NI PXIe-1075.

#### INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como propósito general sustentar los conocimientos teóricos dictados en diferentes cátedras de telecomunicaciones, fundamentalmente para impulsar la investigación en el área de radiofrecuencia, siendo una guía para el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad del Azuay. Para el buen uso del laboratorio se realizó el análisis descrito y funcional del equipo NI PXIe-1075 y sus diferentes módulos para la generación y recepción de señales de radiofrecuencia, permitiendo conocer las prestaciones y limitaciones del mismo, contiene prácticas de instrumentación que permiten introducir a los investigadores en la programación de la plataforma LabVIEW y sus VIs para la generación y recepción de señales de radiofrecuencia. Se desarrollaron prácticas específicas a ser ejecutadas por los estudiantes, abordando temas relacionados con la modulación, trasmisión, demodulación y análisis de señales reales con el equipo NI PXIe-1075 tanto para comunicaciones analógicas como digitales, además se incluyeron prácticas de propagación y antenas, para representar los diagramas de radiación en dos dimensiones, permitiendo el análisis de las diferentes antenas pertenecientes a la Universidad del Azuay y sus frecuencias. Todo lo antes mencionado se basará en programas realizados en el software de LabVIEW de la empresa National Instruments, entregando el documento con los programas digitales desarrollados para las prácticas específicas y sus respectivas modificaciones.

#### **CAPÍTULO 1**

#### DESARROLLO DE LA ETAPA EXPLORATORIA

#### 1.1. Análisis del Equipo NI PXI.

#### Introducción al equipo NI PXI.

La plataforma PXI (por sus siglas en inglés: PCI Extensions for Instrumentation), es un bus industrial de comunicaciones para instrumentación, patentado por la empresa National Instruments en 1997 y publicado en 1998. La plataforma NI PXI combina el bus eléctrico de Interconexión de Componentes Periféricos (PCI) con un paquete modular Eurocard de CompactPCI, buses de sincronización especializados, software, características mecánica y eléctricas que definen sistemas completos para aplicaciones de pruebas y medidas, adquisición de datos y control.

NI PXI es una plataforma basada en un computador que ofrece una solución de alto rendimiento que permite seleccionar los módulos que se requieren para un determinado trabajo e integrarlos en un mismo sistema PXI, haciéndolo útil para aplicaciones tales como militares, aeroespaciales, telecomunicaciones y automotrices; además de los procesos industriales y de manufactura.

La plataforma NI PXI se basa en un estándar abierto en la industria y está regido por la Alianza de Sistemas PXI (PXISA), un grupo de más de 70 compañías comisionadas que proporcionan el estándar, asegurando su interoperabilidad de los sistemas entre diferentes fabricantes, manteniendo la especificación PXI.

#### 1.1.1. Características del equipo.

#### Arquitectura de Hardware del equipo NI PXI.

Se compone de tres unidades principales: chasis, controladores del sistema y módulos periféricos.

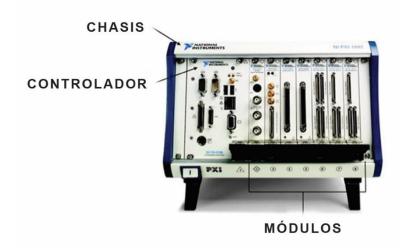


Figura 1.1. Partes del equipo NI PXI.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

#### Chasis.

El chasis es la parte fundamental del sistema NI PXI, en él se instala el controlador del sistema y los módulos periféricos, los mismos que se colocan de forma deslizante en la parte posterior del chasis, también incluye el plano trasero PXI de alto desempeño, el cual incluye el bus PCI y los buses de temporización y disparos. Son estos buses de control de tiempos y disparos los que permiten a los usuarios desarrollar sistemas para aplicaciones que requieren de una sincronización precisa. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Partiendo desde las habilidades de PXI nace el PXI Express que proporciona las características adicionales de temporización y sincronización de un reloj de sistema diferencial de 100 MHz, señalización diferencial y disparos diferenciales en estrella. Al utilizar temporización y sincronización diferencial los sistemas PXI Express se benefician de la alta inmunidad contra ruido para relojes de Instrumentación y de la habilidad de transmitir a velocidades de alta frecuencia, por lo que muchos chasis PXI

Express alojan módulos periféricos PXI y PXI Express, teniendo ranuras periféricas hibridas.

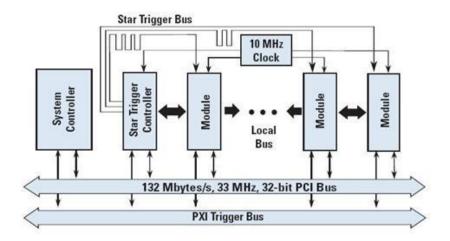


Figura 1.2. Buses de Temporización y Disparo PXI.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

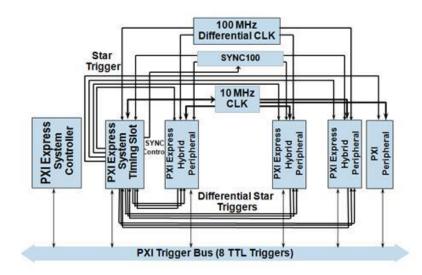


Figura 1.3. Buses de Temporización y Disparo PXI Express.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

#### Controlador PXI.

Existen diferentes tipos de controladores para sistemas PXI, como son controladores remotos desde una PC de escritorio o portátil y controladores embebidos de alto rendimiento con diferentes sistemas operativos de propósito general. Los controladores de PC portátil se pueden comunicar mediante diferentes kits de interfaces a los equipos NI PXI, como son las interfaz NI ExpressCard MXI (extensión de medidas para instrumentación), PCMCIA CardBus, kits de interfaz NI MXI-Express, y MXI-4, entre otros. Todos se comunican mediante un cable de cobre a través de un enlace de software transparente (no necesita programación) haciendo que la PC reconozca todos los módulos periféricos en el sistema PXI como tarjetas PCI durante el encendido.

Sin embargo los controladores embebidos eliminan la necesidad de una PC externa, proporcionando un sistema completo contenido dentro del chasis PXI. Los controladores embebidos PXI están elaborados generalmente utilizando componentes estándares de PC en un paquete pequeño PXI, por lo que poseen dispositivos estándares tales como CPU integrado, disco duro, RAM, Ethernet, video, teclado/mouse, puerto serial, USB y otros periféricos. Están disponibles para sistemas basados en PXI o PXI Express, y su elección de sistema operativo, incluyendo Windows Vista/XP o LabVIEW Real-Time, así como Windows Microsoft y todos los controladores de dispositivos instalados. Haciendo que estos sean ideales para sistemas portátiles y aplicaciones contenidas en un solo paquete en las cuales el chasis se transporta de un lugar a otro. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

#### Módulos Periféricos PXI.

Existen módulos PXI para instrumentación, adquisición de datos, conmutación, movimiento, visión, sincronización avanzada y para establecer una interfaz con otros buses, brindando el mayor ancho de banda de la industria y menor latencia con E/S modular para medidas de alta resolución desde DC a 6.6 GHz RF. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

Debido a que PXI es una industria de estándar abierto gobernado por PXI Systems Alliance (PXISA), hay disponibles más de 1,500 módulos de más de 70 proveedores, garantizando su interoperabilidad y características de especificación PXI, por lo que es elegida por miles de empresas de todo el mundo.

#### Arquitectura de software del equipo NI PXI.

El desarrollo y funcionamiento de los sistemas PXI basados en Windows son iguales a los de una PC estándar basado en Windows. Además, debido a que el plano trasero de los sistemas PXI y PXI Express utiliza los mismos controladores que PCI estándar en la industria, el escribir software para comunicarse con módulos PXI o PXI Express es, en la mayoría de los casos, igual que hacerlo para tarjetas PCI. Por lo tanto, no es necesario reescribir aplicaciones de software, código de ejemplo y técnicas de programación ya existentes al mudar software entre sistemas basados en PC y PXI o PXI Express, proporcionando compatibilidad de software. Los PXI son totalmente compatibles con sistemas operativos de Microsoft Windows en sus últimas versiones, como resultado, el controlador puede utilizar interfaces de programación de aplicaciones estándares en la industria, tales como NI LabVIEW, LabWindows<sup>TM</sup>/CVI y Measurement Studio; Visual Basic y Visual C/C++.

Como una alternativa a sistemas basados en Windows, se puede utilizar una arquitectura de software en tiempo real para aplicaciones de tiempo crítico que requieren velocidad determinista y operación sin interfaz. Los sistemas operativos en tiempo real ayudan para que las tareas más críticas siempre tomen control del procesador cuando sea necesario. Con esta característica, se puede programar una aplicación con resultados predecibles y fluctuación reducida. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

#### 1.2. Análisis de los módulos disponibles.

#### Equipo NI PXI disponible en la Universidad del Azuay.

La Universidad del Azuay cuenta con un equipo NI PXI de alto rendimiento, el cual es utilizado para realizar prácticas de laboratorio de telecomunicaciones el mismo que cuenta con los siguientes módulos:

#### Chasis PXIe-1075.

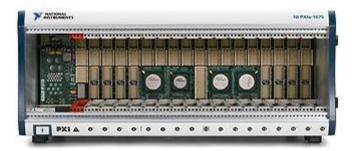


Figura 1.4. Chasis PXIe -1075 de National Instruments.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

El chasis PXI Express-1075 de 18 ranuras de alto rendimiento tiene una dimensión 3U (100mm x 160mm). Cuenta con un diseño estructural que ha sido optimizando para su uso en diversas aplicaciones, ya que tiene una placa posterior con capacidad de PXIe en cada ranura, también incorpora todas las características de temporización y sincronización definido por la última especificación PXI, incluyendo un reloj de referencia integrado de 10 MHz, bus de disparo PXI y disparo en estrella PXI para módulos PXI y un reloj de referencia integrado de 100 MHz, SYNC 100 y disparo en estrella PXI diferencial para módulos PXI Express. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

Su diseño modular asegura el alto nivel de mantenimiento lo que disminuye el tiempo de reparación haciéndolo ideal para medidas de alta velocidad, transmisión de datos y solución para sistemas de muchos canales. El rango de temperatura de 0 a 55 °C proporciona toda la potencia y la refrigeración de los 18 slots para aplicaciones

exigentes sin reducción de potencia satisfaciendo una amplia variedad de pruebas de alto rendimiento y las necesidades de aplicaciones de medición.

#### Características del Chasis PXIe-1075.

- Acepta módulos 3U PXI, PXI Express, CompactPCI y CompactPCI Express.
- ➤ Consta de 8 ranuras híbridas, 8 ranuras PXIe, 1 ranura de temporización del sistema PXIe.
- Potencia total de 791w con un rango de temperatura que se extiende de 0 a 55
   °C, cumpliendo con las necesidades de refrigeración PXIe, 38W por ranura.
- > Alto rendimiento:
  - 1GB/s por ranura de ancho de banda dedicado (x4 PCIe), en una dirección.
  - 4GB/s de ancho de banda del sistema.
- ➤ Reloj de referencia de baja fluctuación interna de 10 MHz para ranuras PXI con ±25 ppm (Partes por millón) de estabilidad.
- ➤ Reloj de referencia de baja fluctuación interna de 100 MHz para ranuras PXIe con ±25 ppm (Partes por millón) de estabilidad.
- ➤ Conectores traseros CLK 10 I/O.
- > Enrutamiento de los Switches CLK10.

#### Vista frontal y posterior del Chasis PXIe-1075.

A continuación se puede observar las principales partes del panel frontal y posterior del chasis PXIe-1075.

#### Vista frontal.

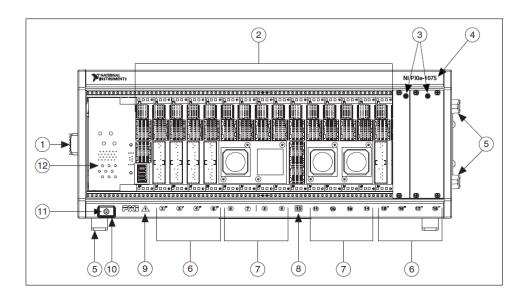


Figura 1.5. Vista frontal del chasis NI PXIe-1075.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

- 1. Manipulador del Chasis.
- 2. Conectores del Backplane.
- 3. Paneles Rellenos del PXI.
- 4. Nombre del modelo del PXI.
- 5. Pies removibles.
- 6. 8 ranuras periféricas hibridas PXI Express.
- 7. 8 ranuras periféricas PXI Express.
- 8. Ranura de temporización del sistema PXI Express.
- 9. Ranura del controlador del sistema PXI Express.
- 10. Interruptor de Inhibición.
- 11. Led Interruptor de Inhibición.
- 12. Ranuras de expansión del controlador del sistema.

#### Vista Posterior.

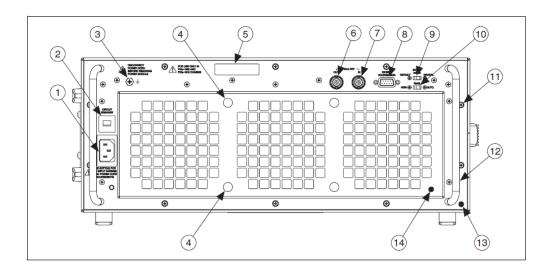


Figura 1.6. Vista posterior del chasis NI PXIe-1075.

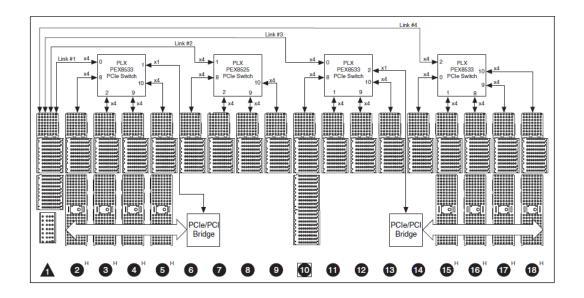
Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

- 1. Ingreso de alimentación AC conector universal.
- 2. Breaker Push-Reset.
- 3. Tornillo puesta a tierra del chasis.
- 4. Tornillos de sujeción de filtros de aire.
- 5. Nivel ID de suministro de energía.
- 6. Conector BNC de salida de 10 MHz de referencia.
- 7. Conector BNC de ingreso de 10 MHZ de referencia.
- 8. Inhibición remota y conector monitoreado de voltaje.
- 9. Interruptor selector, modo inhibir.
- 10. Interruptor selector para la velocidad del ventilador.
- 11. Tornillos de montaje del suministro de energía.
- 12. Manijas de traslado de la fuente de alimentación.
- 13. Traslado fuente de alimentación.
- 14. Retenedor del filtro de aire.

#### Ranuras del chasis NI PXIe - 1075.

Según la arquitectura, el chasis NI PXIe-1075 está divido en módulos o ranuras que se indican con números (Figura 1.7) y tienen diferentes características que se indican a continuación:

- La ranura 1 es la del controlador del sistema, donde se puede observar que el sistema de configuración es de 4 enlaces o links definido por el CompacPCI Express y especificaciones PXI Express. Este controlador de sistema cuenta con tres ranuras de expansión de módulos, que son más anchos que las ranuras normales, con estas ranuras se logra ampliar el controlador del sistema hacia la izquierda y así prevenir que se usen ranuras periféricas.
- Las ranuras 2 a la 5 son las ranuras que pertenecen al link 1, la letra "H" a lado de cada número significa que estas son ranuras periféricas hibridas PXI Express.
- ➤ Las ranuras 6 al 9 pertenecen a link 2, estas son ranuras periféricas PXI Express.
- Las ranuras del 11 al 14 pertenecen al link 3 y al igual que las del link 2 son ranuras periféricas PXI Express.
- Las ranuras 15 a la 18 son las ranuras que pertenecen al link 4, estas también tienen la letra "H" a lado de cada número por lo que al igual que las ranuras del link 1 son ranuras periféricas hibridas PXI Express.
- La ranura 10 es la que nos sirve para la temporización del sistema, consta de una extensión en el conector del backplane, que permite su uso para temporización de sistema (System Timing Slot).



**Figura 1.7.** Distribución del sistema PCI en el chasis, Arquitectura del Backplane del chasis NI PXIe-1075.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

Dándonos un total de 18 ranuras, 1 de controlador, 8 ranuras periféricas, 8 ranuras periféricas hibridas y una para la temporización del sistema, en el diagrama de bloques se observa claramente los links PCI Express para suministrar el ancho de banda adecuado a cada ranura (1GB/s por ranura de ancho de banda dedicado (x4 PCIe), en una dirección), teniendo un total de 4GB/s de ancho de banda del sistema, y dos puentes para el soporte PXI Express a PCI.

**NOTA:** Se puede también agregar equipamiento opcional como paneles rellenos EMC, kit para montaje del armario, bloque de ranuras, entre otros.

#### Controlador NI PXIe-8133.



Figura 1.8. Controlador NI PXIe-8133.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

El NI PXIe-8133 es un computador embebido de alto rendimiento y alto ancho de banda con un procesador Intel Core i7-820QM. Con frecuencia base de 1,73 GHz y un procesador Quad-Core de 3,06 GHz (single-core turbo) para usarse en sistemas PXIe. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

Este controlador integra las características estándar de E/S en una sola unidad modular de tamaño PXIe-3U, permitiendo que todas las ranuras activas en el chasis permanezcan disponibles para los módulos de medición y control. Este diseño del controlador robusto reduce al mínimo los problemas de integración y elimina la necesidad de cableado complejo para tarjetas secundarias. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

El procesador Quad-Core contiene cuatro módulos, o sistemas de cómputo, complementados en un solo paquete, las aplicaciones tienen que ser diseñadas para crear cuatro tareas de ejecución independientes al implementar estrategias de programación como paralelismo en tareas, paralelismo en datos y pipelining (método de búsqueda y decodificación). Sin embargo, Intel introdujo la tecnología Turbo Boost para brindar los beneficios de rendimiento para todos los tipos de aplicaciones sin que la aplicación sea optimizada para procesadores multinúcleo con lo que pueden reducirse significativamente los tiempos de prueba para aplicaciones de procesamiento

intensivo. En la Figura 1.9 se muestra un diagrama de bloques funcional que consta de los bloques lógicos para los módulos CPU y módulo de E/S (tarjeta secundaria).

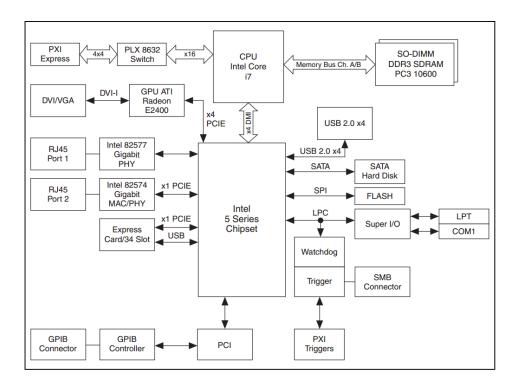


Figura 1.9. Diagrama de bloques de NI PXIe-8133.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

La combinación de un controlador embebido NI PXIe-8133 con un chasis PXIe compatible, tal como el PXIe-1075, da como resultado un ordenador compacto y resistente totalmente compatible con una PC, ideal para aplicaciones de procesamiento intenso, instrumentación modular y adquisición de datos.

#### Características principales del NI PXIe-8133.

- Procesador Quad-Core Intel Core i7-820QM de 1.73 GHZ base (3,06 GHz máximo en modo Turbo Boost single-Core).
- ➤ Sistema hasta 8 GB/s y 2 GB/s de ancho de banda por ranura.
- Memoria RAM estándar DDR3 de 2 GB (1 x 2 GB DIMM) de doble canal a 1,333 MHz, soporta máximo 8 GB (2 x 4 GB DIMM).
- Disco duro Integrado de 7200 rpm de alto desempeño con opción estándar.

- Máximo desempeño con actualizaciones de SSD y RAM.
- ➤ Dos Tarjetas Ethernet de 10/100/1000BASE-TX (Gigabit), 4 puertos de Hi-Speed USB.
- ➤ Otros periféricos como puerto ExpressCard/34, Conector de video DVI-I, Puerto paralelo IEEE 1284 ECP/EPP, Controlador GPIB (IEEE 488), y un puerto serial RS232.
- Memoria In-ROM y diagnósticos de disco duro.
- SO Windows, controladores ya instalados y recuperación del sistema desde el disco duro.

Módulos para telecomunicaciones pertenecientes a la Universidad del Azuay. Módulo NI PXI-5652 (RF Signal Generator).



Figura 1.10. Generador de señales OL NI PXI-5652.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008).

El NI PXI-5652 RF es un generador de señales RF y microondas, las ondas generadas son continuas y con capacidad de modulación, en una sola ranura 3U PXI ofrece ruido de fase excepcional y fluctuación de la señal, el rango de generación de onda es desde los 500 kHz hasta los 6.6 Ghz, puede ser configurado mediante el computador embebido del sistema PXI, además de poseer una resolución de frecuencia menor de 1 ppb (parte por billón), puede crear sofisticados estímulos de respuesta o seguimiento de aplicaciones de generador utilizando el analizador vectorial de señales (VSA PXIe-5663 RF) y el entorno de desarrollo gráfico LabVIEW de NI. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008).

El NI PXI-5652 utiliza síntesis digital directa (DDS) para salto de frecuencia de alta resolución o barrido de fase continua para accesorio y aplicación de caracterización de dispositivos. Este generador es ideal para sincronizar las frecuencias de muestreo no estándar, tales como WCDMA, señales en banda base o frecuencia intermedia (IF). Con este generador de señal, se puede realizar la modulación analógica y digital a través del circuito DDS, que le da la modulación de frecuencia y manipulación por desplazamiento de frecuencia para aplicaciones tales como las pruebas de tasa de error de bit (BER) y prueba de antenas. La modulación de amplitud es también disponible a través de manipulación por interrupción.

#### Funcionamiento del Hardware.

El diagrama de bloques del sistema PXI-5652 en la Figura 1.11 ilustra cómo la unidad de control del sistema gestiona las señales de control y datos transferidos entre los bloques de circuitos. La unidad de control del sistema también contiene el monitor de temperatura y componentes de modulación. Los circuitos de sincronización, que se muestra en la esquina superior izquierda del diagrama, contienen la referencia de reloj del sistema y el DDS. El sistema de reloj es un oscilador de cristal de 200 MHz (VCXO) controlado por voltaje que se puede programar a la fase de bloqueo de una señal de reloj externa 10 MHz en el conector REF IN / OUT.

El reloj DDS para la referencia de 200 MHz proporciona señales de hasta 50 MHz, con pasos de frecuencia muy finas. Señales de RF por debajo de 50 MHz vienen directamente desde el DDS. Por encima de 50 MHz, la generación de señales se lleva a cabo dentro del circuito principal sintetizador que está enganchado en fase a la señal de salida del DDS indicado como referencia. Esta señal de referencia DDS proporciona lo necesario para el ajuste de los pasos del sintetizador, los pasos de frecuencia de RF sintetizado son típicamente 1 Hz o menos.

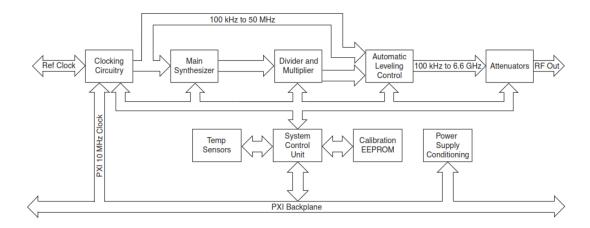


Figura 1.11. Diagrama de bloques del funcionamiento del NI PXI-5652.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

# Características principales.

- Rango de frecuencia de 500 KHz a 6.6 GHz.
- Desfase de ruido de -110 dBc/Hz a 1 GHz, 10 kHz desfase típico.
- ➤ Modulación FM, 2-FSK, OOK.
- Modulación de formas de onda incluyendo sinusoidales, triangulares, cuadradas, PRBS de orden 31, definido por el usuario 1020 bits.
- Utilizado como oscilador local, ajustable a fuentes de reloj.
- ➤ Velocidad típica de sintonización menor de 2 ms, barridos de frecuencia.
- Resolución de frecuencia menor de 1 ppb.
- ➤ Habilidad para usarse con el analizador de señal RF vectorial NI PXI-5660 para aplicaciones de estímulo-respuesta.

# Módulo NI-PXIe 5601 (RF Downconverter).

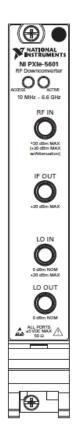


Figura 1.12. RF Downconverter NI PXIe-5601.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

El RF Downconverter es un convertidor digital descendente, que convierte una señal digitalizada a una señal de frecuencia intermedia, por lo tanto se reduce a una frecuencia de muestreo más baja, permitiendo así el procesamiento digital de las señales con los procesadores del PXI, maneja frecuencias desde los 10Mhz hasta los 6.6 Ghz. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

En la Figura 1.13 se puede observar la configuración interna del NI PXIe-5601, para la realización de la conversión de la señal de RF a IF. En la gráfica se muestra que la señal de RF entra al NI PXIe-5601, seguido de la señal del LO para realizar el mezclado de la señales y sale la señal convertida a una señal de FI.

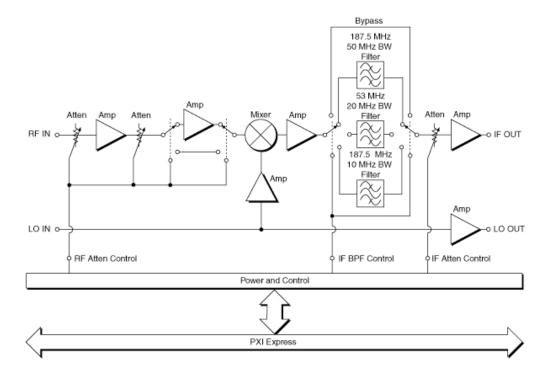


Figura 1.13. Diagrama de bloques RF Downconverter NI PXIe-5601.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

# Módulo NI PXIe-5622 (Digitizer).



Figura 1.14. Digitalizador NI PXIe-5622.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

El NI PXIe-5622 es un digitalizador de 16 bits de resolución para FI, posee un muestreo de 150 MS/s con una tarjeta de procesamiento de señales (OSP). Las funciones OSP incluyen conversión digital hacia abajo de cuadratura (DCC), conversión digital real hacia abajo y filtrado de aliasing, haciéndolo ideal para

aplicaciones de comunicaciones con su alto rango dinámico y una interfaz PXI Express de alto rendimiento que le permite escribir datos de IF al disco por horas a una velocidad de muestreo completa de 150 MS/s.(NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

# Características principales.

- ➤ Muestreo en tiempo real de 150 MS/s.
- ➤ Banda de 3 MHz a 250 MHz y de 50 MHz a 187.5 MHz.
- Resolución de 16 bits.
- Conversión digital hacia abajo de cuadratura (DCC) hasta 60 MHz IF de ancho de banda.
- Solamente acoplado en AC.
- Filtrado con protección contra alias para todas las velocidades de muestreo.

Para utilizar la tarjeta de procesamiento de señales (OSP) en el NI PXIe-5622, la propiedad DDC debe establecerse en TRUE, la Figura 1.15 muestra el diagrama de bloques del OSP.

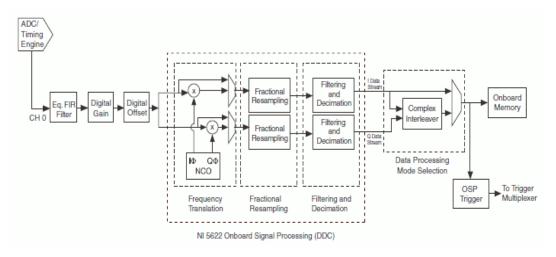


Figura 1.15. Diagrama de bloques Onboard Signal Processing NI PXIe-5622.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

López Navas, Vallejo Lucero

21

Las siguientes operaciones OSP están disponibles:

- Envía una señal de IF a CH0 y realiza la conversión hacia abajo de cuadratura de la señal (se devuelven datos complejos).
- Envía una señal a CH0 y realiza diezmado alias protegido (se devuelven los datos reales).
- Envía una señal a CH0 y realiza conversión descendente real en la señal (se devuelven los datos reales).

## Módulo NI PXI-5122 (Digitizer).



Figura 1.16. Digitalizador osciloscopio NI PXI-5122.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

El NI PXI-5122 es un osciloscopio digital de alta velocidad, cuentan con dos canales de muestreo simultáneo de 100 MS/s de entrada con resolución de 14 bits, posee 100 MHz de ancho de banda y hasta 512 MB de memoria por canal en una ranura 3U PXI Express, PXI, PCI o dispositivo compacto. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

Utiliza amplificadores de bajo ruido y ganancia variable, un generador de reloj de 100 MHz de baja fluctuación para ofrecer un rango dinámico libre de espurios de -75 dBc y una relación de señal/ruido de 62 dB, también cuenta con impedancia de entrada seleccionable por software de  $50\Omega$  a  $1M\Omega$ , y rangos de entrada desde 200 mV a 20 V (hasta 100 V con amplificador TEGAM para acondicionamiento de señales).

Usando la sincronización de National Instruments y arquitectura para Memoria Core (SMC), se puede sincronizar fácilmente con otros instrumentos análogos y digitales para desarrollar sistemas de prueba de alto número de canales o de señales mixtas, transmitiendo datos de forma continua de la memoria a bordo a la memoria del host para adquisiciones más largas y transmisiones en el disco, a una velocidad de 400 MB/s que es su máxima tasa de transmisión en ambos canales.

NI PXI-5122 tienen tres fuentes de disparo analógicas, digitales y software de control, se puede especificar el número de muestras a adquirir antes y después de que ocurra un evento de disparo. Estos ajustes de pre disparo y pos disparo también se aplican cuando el módulo es usado en modo de múltiples registros. Sincronizar múltiples instrumentos utilizando el panel posterior del PXI con reloj de referencia de 10 MHz o una referencia externa que va de 1 a 20 MHz en incrementos de 1 MHz.

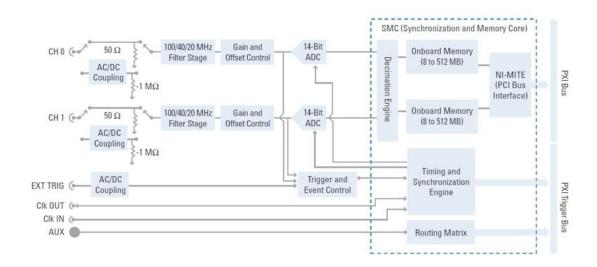


Figura 1.17. Diagrama de Bloques del Hardware del NI PXI-5122.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2014).

### Características principales.

- ➤ 100 MS/s en tiempo real, muestreo equivalente de tiempo de hasta 2 GS/s.
- Resolución de 14 bits en 2 canales muestreados simultáneamente.
- Ancho de banda de 100 MHz con filtros de ruido y anti alias.
- ➤ Rangos de entrada de ±2 mV a ±100 V con amplificador TEGAM para acondicionamiento de señales.

López Navas, Vallejo Lucero

23

- Rango dinámico sin espurio (SFDR) de -75 dBc.
- Memoria interna de mayor capacidad 8 MB/ch estándar, hasta 512 MB/canal.
- $\triangleright$  Impedancia de entrada de 50  $\Omega$  a 1 M $\Omega$ .
- Rango de entrada de 200mV a 20V.
- Edge, ventanas, histéresis, video y disparo digital con 100 ps timestamping.

Con su alta velocidad de muestreo y la parte delantera de baja distorsión, el NI PXI-5122 proporciona mediciones de tiempo y dominio de la frecuencia más precisos, suficientemente versátil como para satisfacer los más exigentes requisitos de las aplicaciones como automotriz, comunicaciones, investigación científica, militar/aeroespacial y electrónica de consumo, etc. Con la ayuda de auto calibración se asegura la estabilidad de medición en todo el rango de temperatura de funcionamiento de 0 a 55 ° C.

# Módulo NI PXI-2596 (Multiplexor).



Figura 1.18. Multiplexor NI PXI-2596.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

El PXI-2596, es un multiplexor (6x1 dual) de antenas, posee relés SPDT (*Single pole, double throw*) además de tener interruptores de transferencia y módulos de RF para señales de microondas. Su diseño fue planificado para operar con menos de 1 dB de pérdida de inserción hasta los 26,5 GHz, casi invisible para señales con frecuencias pequeñas. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

Ofrece una opción de alta densidad, con dos bancos de multiplexores 6x1 en el mismo módulo, también son muy adecuadas para el paso de los armónicos de alto orden de RF upconverters o enrutamiento de múltiples fuentes para RF downconverters, por lo que es ideal para aplicaciones de pruebas automatizadas. Los switches cuentan con cierres de relé en cada uno de los relés individuales. Los contadores de relés se incrementan cada vez que un relé se activa, como se muestra en la topología cada una de las antenas se conecta a un conmutador común por lo que se puede usar solo una antena a la vez, tanto en el adquisición como en transmisión de señales.

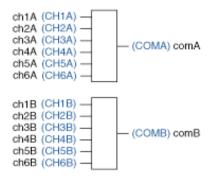


Figura 1.19. Topología del NI PXI-2596.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

### Características principales.

- Rendimiento de 26.5 GHz: Perdida de inserción de -0.3 dB; VSWR de 1.25.
- > Rendimiento de 6.6 GHz: Perdida de inserción de -0.15 dB; VSWR de 1.13.
- Relés electromecánicos.
- $\triangleright$  Impedancia característica de 50  $\Omega$ .
- Rastreo interno de cuenta de relés.
- > Completamente programable por software.
- > PXI-2596 dual 6x1 sin terminación.
- ➤ Multiplexor (SPDT).
- Módulos diseñados utilizando microondas relés de Radiall.
- Habilidad para almacenar información sobre calibración de RF con NI Switch Executive.

### Módulo NI PXIe-5450 (Signal Generator).



Figura 1.20. Generador de señal RF NI PXIe-5450.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008).

El NI PXIe-5450 es un generador de forma de onda arbitraria de 16-bits, 400 MS/s, de doble canal optimizado para señales de comunicaciones I/Q. Es el instrumento ideal para probar los dispositivos con entradas I/Q o para ser el componente de banda base de un generador de señal de RF vectorial. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008).

Un arreglo de compuertas programables (FPGA: field-programmable gate array) en el NI PXIe-5450 implementa la funcionalidad OSP (tarjeta de procesamiento de señales), que permite varios procesamiento de señales y funciones I/Q relacionados, incluyendo la conformación de impulsos y filtros de interpolación, ganancia y control de offset, y un oscilador controlado numéricamente (NCO) para cambio de frecuencia.

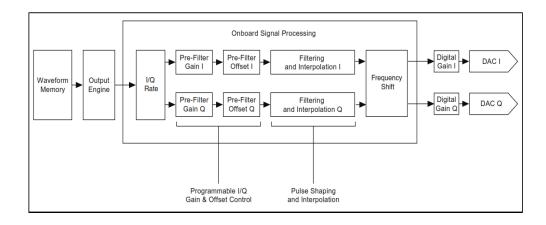


Figura 1.21. Diagrama de bloques OSP del NI PXIe-5450.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008).

Para obtener la máxima pureza de la señal, cada una de las salidas diferenciales cuenta con 98 dB de proximidad de rango dinámico libre de espurios (SFDR) a 1 MHz (sin armónicos), el ruido de fase de este módulo es extremadamente bajo. Su bucle de enganche de fase (PLL: phase-locked loop) es muy estable y el oscilador proporciona una alta resolución de frecuencia de muestreo de salida inferior a 5.7 μHz, además, caracteriza los circuitos de alto rendimiento que calibra el canal de inclinación con una precisión de 25 ps, esto asegura la generación de señales de precisión I/Q de alto ancho de banda a altas frecuencias.

El NI PXIe-5450 implementa comportamientos de activación con cuatro modos de disparo: simple, continuo, ráfaga, e intensificado. Aprovechando las ventajas del bus PCI Express para transmitir datos continuamente desde el host controlador a más de 600 MB/s en modo de doble canal o a 360 MB/s cuando se genera un solo canal. Además, scripting proporciona la capacidad de almacenamiento y cierre de múltiples formas de onda, asociadas en el generador de la memoria incorporada, ahorrando tiempo y mejorado el rendimiento.

Usando tecnología de sincronización NI T-Clock (TCLK), la arquitectura SMC, el NI PXIe-5450 ayuda a integrar los sistemas de prueba de señal mixta, permitiendo la sincronización con otros instrumentos, como analizadores/generadores de señales vectoriales, digitalizadores de alta velocidad, analizadores/generadores de forma de onda digitales, y otros generadores de señal, También puede sincronizar múltiples generadores de forma de onda arbitraria para formar un generador de múltiples canales de fase coherente para aplicaciones tales como MIMO (entrada múltiple, salida múltiple) o esquemas de formación de haces de antena. Utilizando mediciones de calibración a bordo y la compensación, TCLK puede sincronizar automáticamente cualquier combinación de módulos basados en SMC con menos de 500 ps de inclinación módulo a módulo.

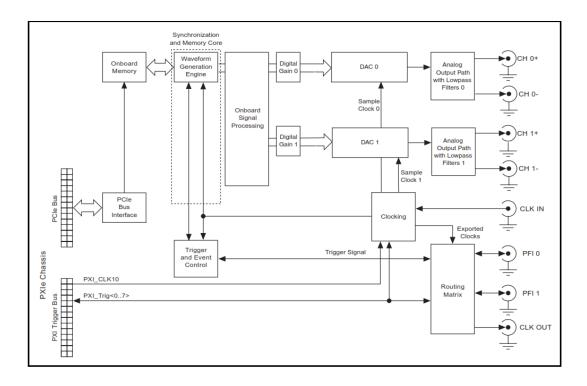


Figura 1.22. Diagrama de bloques del NI PXIe-5450.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2008).

NI PXIe-5450 consta de un reloj interno muy flexible basado en DDS que esta optimizado para un rendimiento de fase de ruido o también puede importar su reloj de muestreo del conector CLK IN del panel frontal, multiplicar y dividir este reloj en la frecuencia por enteros, finalmente el NI PXI-5450 puede bloquear de fase a su reloj interno a una referencia externa o el reloj de referencia PXI de 10 MHz. Con esta tecnología, se pueden generar terabyte de formas de onda únicas, de alto ancho de banda por varias horas, haciendo que este módulo sea ideal para aplicaciones de telecomunicaciones que se benefician de esta capacidad, incluyen registros de RF y banda base, reproducción de la señal inteligente y el diseño de sistemas de comunicaciones, también otras aplicaciones comunes incluyen la creación de prototipos, validación y pruebas de componentes semiconductores, electrónica militar, etc.

#### Características principales.

- ➤ Generación de señal I/Q diferencial y de doble canal.
- Resolución de 16 bits, velocidad de muestreo a 400 MS/s por canal.
- > 98 dB close-in SFDR a 1 MHz.
- Ancho de banda analógica de 145 MHz y para señales de RF de 290 MHz de ancho de banda.
- ➤ ±0.15 dB plano a 120 MHz con corrección digital.
- Escritura de datos continua >600 MB/s desde el servidor.
- <-140 dBc/Hz densidad de fase de ruido para 10 MHz de tono (offset 1 KHz).</p>
- ➤ Promedio de densidad de ruido de -160 dBm/Hz.
- Desfase entre canales de 25 ps.
- ➤ 128 o 512 MB de memoria interna de mayor capacidad.
- ➤ Salida de 1 Vpk-pk, 2 ranuras PXI.

# Módulo NI PXIe-5611 (Upconverter).

El Upconverter es un convertidor digital ascendente, que convierte una señal de frecuencia intermedia a una señal en frecuencia digitalizada, por lo tanto se aumenta una frecuencia portadora, permitiendo así la propagación de las señales. Maneja frecuencias desde los 10 MHz hasta los 6.6 GHz.

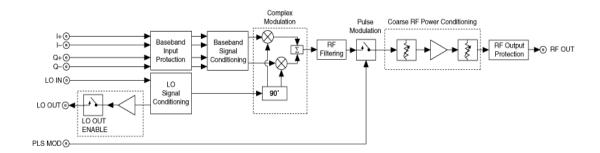


Figura 1.23. Diagrama de bloques del NI PXIe-5611.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

En el diagrama de bloques se observa como está compuesto cada una de las etapas que realiza el NI PXIe-5611 para la conversión de la señal, las mismas que serán descritas a continuación en los siguientes pasos: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011).

- Protección de entrada de banda base: Protege el circuito de entrada de banda base frente a posibles daños.
- Acondicionamiento de señales de banda base: Establece el nivel y el sesgo adecuado para la modulación compleja.
- ➤ Modulación compleja: Es la función principal del modulador I/Q e imparte la información de banda base compleja de la señal LO IN.
- > Filtrado de RF: Reduce el contenido de armónicos de la señal de salida de RF.
- Modulación por impulsos: Pasa o interrumpe la señal de salida de RF bajo control de hardware.
- ➤ Acondicionamiento de la potencia de RF: Ajusta el nivel de la señal de salida de RF en incrementos de 1 dB.
- > Protección de salida RF: Protege el circuito de salida de RF de posibles daños.
- Acondicionamiento de la señal LO: Filtra la señal LO IN con el fin de reducir el contenido de armónicos, mejorando de este modo la modulación compleja. También nivela la ganancia de LO IN a LO OUT y activa o desactiva la señal LO OUT.

#### 1.2.1. Características de los módulos.

#### Conexiones para telecomunicaciones.

Los módulos antes descritos están conectados para el análisis y generación de señales de RF y microondas. Ahora se describirá las conexiones de cada módulo en la parte posterior del chasis NI PXIe-1075 para la generación y análisis de señales para telecomunicaciones.

#### Conexión para la generación de señales.

El generador de señales conocido comercialmente como el NI PXIe-5673 está conformado por los módulos NI PXIe-5611 RF Upconverter, NI PXI-5652 RF generador de señales de RF y microondas con capacidad de modulación, y el NI PXIe-5450 generador de señales I/Q (in Phase and Quadrature). Cada módulo cumple funciones específicas, y pueden funcionar independientemente, pero para este caso el sistema los visualiza como un conjunto generador de señales gracias a la ayuda que presta el programa de configuración de hardware de National Instruments,

Measurement and Automation Explorer (MAX). En el MAX cada módulo debe ser configurado de la siguiente manera:

- ➤ NI PXI-5652: Es asociado como un oscilador local (LO).
- ➤ NI PXIe-5611: Modulador de señales I/Q.
- NI PXIe-5450: Especificado como un generador de forma de onda arbitraria (AWG).

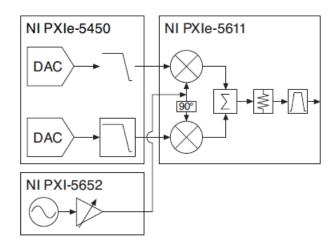


Figura 1.24. Diagrama de bloques del NI PXIe-5673.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

La Figura 1.24 muestra como está configurado el NI PXI-5673 por los tres módulos antes mencionados para formar el conjunto generador de señales. Cada módulo además de ser configurado mediante software debe ser interconectado físicamente en el chasis NI PXIe-1075 para lo cual NI sugiere el siguiente esquema de conexión para las tarjetas añadidas, optimizado para la generación de señales RF.

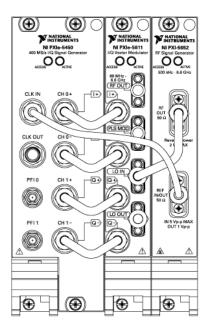


Figura 1.25. Conexiones físicas entre módulos para formar el NI PXIe-5673.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010).

Usando el NI LabVIEW Modulation Toolkit, el NI PXIe-5673 puede generar diferentes formas de onda incluyendo AM, FM, CPM, ASK, FSK, MSK, PSK, QAM (4, 16, 64 y 256), señales multi tono y formas de onda arbitraria. Además, usted puede combinar este VSG con software estándar para generar señales para GPS, GSM/EDGE/WCDMA, WLAN, WiMAX, DVB-C/H/C, ISDB-T, ZigBee y otros.

# Conexión para el analizador de Señales.

El analizador de señales PXIe-5663 está conformado por los módulos NI PXIe-5601, que recibe la señal modulada y la lleva a frecuencia intermedia, NI PXI 5652, generador de señales de RF y microondas, NI PXIe-5622 downconverter. De la misma forma que el generador de señales cada módulo cumple funciones específicas, pero el sistema los visualiza como un conjunto analizador de señales con ayuda del programa de configuración de hardware de National Instruments, Measurement and Automation Explorer (MAX). En el MAX cada módulo debe ser configurado de la siguiente manera:

- ➤ NI PXI-5601: Capta la señal y la lleva a frecuencia intermedia.
- ➤ NI PXIe-5652: Es asociado como un oscilador local (LO).
- ➤ NI PXIe-5622: Digitalizador de la señal.

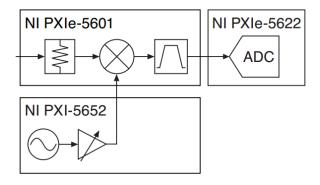


Figura 1.26. Diagrama de bloques del NI PXIe-5663.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

En la Figura 1.26 se ilustra el diagrama de bloques que muestra el NI PXIe-5663 para el funcionamiento correcto como un analizador de señales. Del mismo modo que el generador de señales, el analizador también tiene que ser conectado físicamente en el chasis NI PXIe-1075 para su correcto funcionamiento por lo que NI proporciona el siguiente esquema de conexión para el analizador de señales.

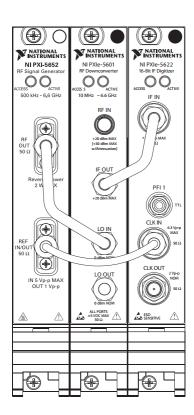


Figura 1.27. Conexiones físicas entre módulos para formar el NI PXIe-5663.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

# 1.3. Protocolos de utilización del equipo.

Orden y limpieza del laboratorio.

Para toda práctica el espacio e instrumentos de laboratorio deben estar ordenados, facilitando la ubicación y manejos de los mismos, teniendo en cuenta el siguiente esquema:

- El teclado y mouse deben estar correctamente ubicados al frente del chasis NI PXIe-1075 para facilitar el manejo de los programas realizados.
- Las antenas ubicadas a los laterales del chasis NI PXIe-1075 facilitando la visualización del monitor.
- Encendido del equipo.

El controlador del sistema al ser una computadora con los elementos básicos de una PC normal se enciende de la misma forma, presionando el botón de ON ubicado en la parte inferior del lado izquierdo del chasis NI PXIe-1075.

Configuración de los módulos de generación y análisis de señales.

En cada práctica se debe escoger el slot o ranura correcto para la generación y recepción de señales, siendo el PXIslot8 para la generación de señales y el PXIslot16 para la recepción de las señales de radiofrecuencia como se ilustra en la figura.



Figura 1.28. Configuración de módulos de generación y recepción de señales.

# > Conexión de las antenas en el MAX.

La configuración de las antenas se hace en el *sotf fron panel*, donde se conmutan los relés internos para las conexiones de las antenas, escogiendo el relé adecuado donde está conectado la antena, esta se dividen en dos bancos de 6 antenas con un conmutador común.

# **CAPÍTULO 2**

# **DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO**

# **2.1. Funcionamiento del equipo NI PXIe-1075 en sistemas de telecomunicaciones.** La conexión de un enlace cerrado en el equipo NI PXIe-1075 adquirido por la Universidad del Azuay, tiene una secuencia de funcionamiento como nos indica el diagrama de bloques de la Figura 2.1 con los módulos correspondientes para transmisión como para recepción.

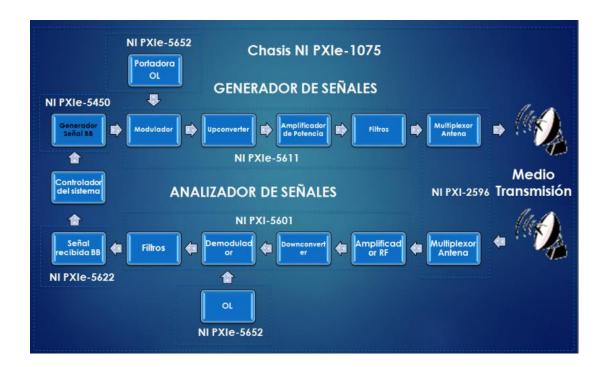


Figura 2.1. Modelo de estudio de un enlace cerrado.

#### Controlador Embebido NI PXIe-8133.

Primero se realiza un control personalizado, mediante la programación de las diferentes prácticas con ayuda del software LabVIEW. Luego el controlador embebido se conecta con los módulos de transmisión; el primero es el generador de señal banda base NI PXIe-5450.

#### Generador de señal NI PXIe-5450.

Genera una señal de frecuencia intermedia (FI), la cual contiene la información a trasmitir, siendo esta la señal moduladora del sistema. El valor de la frecuencia dependerá del tipo de transmisión.

# Oscilador Local (OL) NI PXIe-5652.

Genera una señal que será mezclada con la señal del NI PXIe-5450, siendo esta la señal portadora.

# **Upconverter NI PXIe-5611.**

Recibe las señales (moduladora y portadora), que se encuentran en FI y realiza el proceso de modulación compleja entre las dos. Obtenida la señal modulada el módulo NI PXIe-5611 internamente la multiplica por una función trigonométrica produciendo un espejo de la señal modulada, tanto a frecuencia superior como inferior. El módulo filtra la parte inferior y la señal de frecuencia superior pasa al multiplexor de antenas.

# Multiplexor de antenas NI PXI-2596.

Aquí se recibe la señal procesada del NI PXIe-5611 y trasmite por la antena conmutada. De la misma manera recibe la señal trasmitida por la antena conmutada de recepción.

#### Downconverter NI PXIe-5601.

Recibe la señal en radio frecuencia, realiza el mismo proceso del Upconverter, a diferencia que este filtra la parte superior y deja pasar la frecuencia inferior que se encuentra en FI y realiza el proceso de demodulación, separando la señal portadora de la señal de información. Esta información llega al controlador embebido NI PXIe-8133 para procesarla y mostrar el mensaje.

#### 2.2 Establecimiento del modelo de prácticas.

#### Práctica:

Descripción del tema que se va a cubrir.

# **Objetivos:**

Mediante literales y/o viñetas, plantearemos a donde queremos llegar o lo que se pretendo lograr mediante el estudio teórico y la aplicación práctica para el análisis de las señales, por ejemplo.

- a. Descripción de términos y unidades de medidas utilizadas en radio comunicaciones.
- b. Identificación del proceso de modulación y demodulación de una señal mediante LabVIEW.
- **c.** Introducir valores en prácticas desarrolladas.

#### Marco Teórico:

Con el propósito de sustentar los conocimientos adquiridos en las diferentes cátedras; se realizará una breve introducción teórica para el desarrollo de las diferentes prácticas. Además, se incluye el funcionamiento de cada herramienta utilizada para el diseño de software.

#### Desarrollo de la Práctica:

Indica paso a paso el proceso de diseño del software, desde crear el VI hasta obtener los parámetros, resultados, gráficas, etc. Se obtiene el diagrama de bloques final y por consiguiente el panel frontal en donde se representa la generación y adquisición de las distintas señales de radio frecuencia.

# Ejercicios de aplicación:

Desarrollado el software en LabVIEW, se plantea distintos ejercicios de aplicación directa con los programas de cada práctica variando los controles, sin embargo, queda a criterio del docente el modificar valores de controles para los diferentes análisis.

**NOTA:** Se adjunta un manual para el profesor conteniendo los ejercicios desarrollados con las soluciones de cada práctica planteada.

#### 2.3. PRÁCTICA: Instrumentación con señales reales.

### **Objetivos:**

- Conocer herramientas básicas de LabVIEW para la configuración en generación y análisis de señales de radio frecuencia para el NI PXIe-1075.
- 2. Recordar rangos de frecuencia de las distintas bandas.
- **3.** Ingresar valores de las distintas bandas de frecuencia en el programa generador de señales con antenas correspondientes a cada frecuencia.
- **4.** Realizar un barrido de la señal generada en el programa de adquisición de espectro e identificar valores de frecuencia y potencia de la señal.

### 2.3.1. Generador y Analizador de señales de radio frecuencia.

Para demostración del funcionamiento del equipo NI PXIe-1075 y de sus módulos respectivos, se desarrollará las siguientes prácticas utilizando LabVIEW para generar y analizar señales de radio frecuencia. A continuación se detallará de manera resumida el funcionamiento y características de las herramientas de configuración para la recepción y adquisición de las señales.

### Descripción de elementos y herramientas utilizadas.

Las librerías utilizadas para el generador y analizador son el NI-RFSG y NI-RFSA respectivamente. Los encontramos haciendo click derecho en el diagrama de bloques, en la función Measurement I/O, las cuales contiene herramientas importantes y necesarias para la configuración del programa con los módulos del equipo para la generación y recepción de señales.

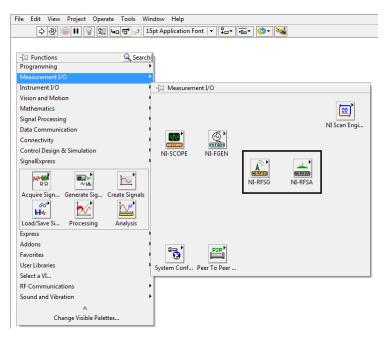


Figura 2.2. Herramientas del generador y analizador de señales.

### 2.3.1.1. Generador de señal de onda continua (WC).

#### niRFSG Initialize.vi

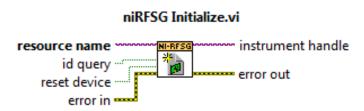


Figura 2.3. niRFSG Initialize.vi.

Permite inicializar o abrir la sesión del dispositivo que se especifique en el *resource name* que en este caso sería el número del módulo del generador de señales del equipo NI PXIe-1075 en todos los VIs. En nuestro caso el módulo transmisor es el PXI1Slot8.

### niRFSG Configure RF.vi

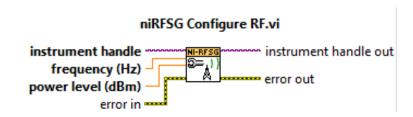


Figura 2.4. niRFSG Configure RF.vi.

Se utiliza para configurar el valor de la frecuencia central (Hz) y el nivel de potencia media (dBm) de la señal que se va a generar.

# niRFSG Configure Generation Mode.vi

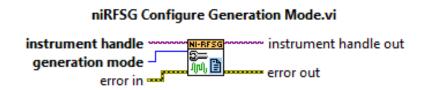


Figura 2.5. niRFSG Configure Generation Mode.vi.

Configura el modo de generación de la señal en el dispositivo NI-RFSG, el modo de generación puede ser: una señal sinusoidal continua (WC), una señal I/Q, o una forma de onda arbitraria (Arb).

#### niRFSG Initiate.vi



Figura 2.6. niRFSG Initiate.vi.

Hace que el dispositivo niRFSG salga del estado de configuración al estado de generación de la señal.

# niRFSG Check Generation Status.vi

# instrument handle instrument handle out done?

Figura 2.7. niRFSG Check Generation Status.vi.

Chequea el estado de la generación, para ver si existen errores durante la generación o para saber si el dispositivo ya genero la señal.

#### niRFSG Close.vi



Figura 2.8. niRFSG Close.vi.

Terminar el proceso de generación o cierra la sesión del controlador.

# **PROCEDIMIENTO:**

**1.** Comenzamos creando el VI, siguiendo los pasos correspondientes para ejecutar; Abrimos LabVIEW, hacemos click en *Create Project* y luego en *Blank VI*.



Figura 2.9. Crear nuevo proyecto.

De esta manera se despliega las dos ventanas correspondientes, panel frontal y diagrama de bloques donde empezaremos la programación.

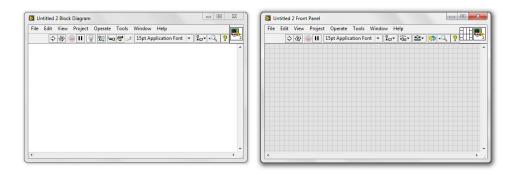


Figura 2.10. Paneles de programación.

2. Agregamos los controles que se utilizarán para modificar los valores de frecuencia y el nivel de potencia denominados *Control Numeric*. Hacemos click derecho en el panel frontal y elegimos *Num Ctrls/Num Ctrls*. Modificamos el nombre de cada control.



Figura 2.11. Controles para frecuencia y potencia.

**3.** De la misma manera agregamos el control para elegir el modo de generación. En el panel frontal click derecho en *Text ctrls/Text Ring*. Modificamos el nombre.



Figura 2.12. Control modo de generación.

**4.** En el diagrama de bloques iniciamos la programación de configuración del dispositivo NI-RFSG con las herramientas ya descritas anteriormente. En el *niRFSG Initialize.vi* agregamos el control del módulo generador.

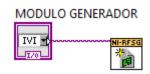


Figura 2.13. Control de módulo TX.

5. Seguimos con la configuración con el niRFSG Configure RF.vi y con el niRFSG Configure Generation Mode.vi, a estas herramientas les unimos los controles de frecuencia, potencia y modo de generación.

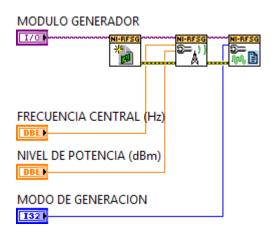


Figura 2.14. Configuración para la generación de la señal.

6. Terminamos la configuración con niRFSG Initiate. Abrimos un bucle iterativo While Loop, se encuentra en el diagrama de bloques, click derecho Programming/Structures/While loop. El While Loop permite generar la señal todo el tiempo, mientras el programa este corriendo.

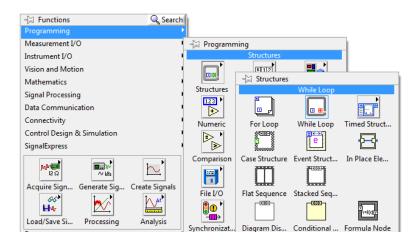


Figura 2.15. While loop.

- 7. Dentro del bucle colocamos la herramienta de chequeo del estado de generación niRFSG Check Generation status.vi. Fuera del bucle se termina la generación con el niRFSG Close.vi.
- **8.** Se debe hacer todas las uniones de error de las diferentes herramientas de configuración.
- **9.** El diagrama de bloques queda de la siguiente manera:

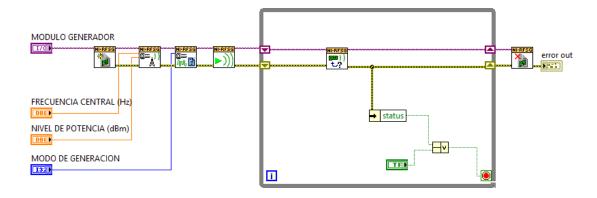


Figura 2.16. Diagrama de bloques del generador de señales.

**10.** El panel frontal se mostrará de la forma siguiente:



Figura 2.17. Panel frontal del generador de señales.

# 2.3.1.2. Adquisición de Espectro.

#### niRFSA Initialize.vi

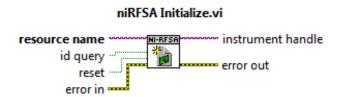


Figura 2.18. niRFSA initialize.vi.

Permite inicializar o abrir la sesión del dispositivo que se especifique en el *resource name* que en este caso sería el número del módulo del analizador de señales del equipo NI PXIe-1075 en todos los VIs. En nuestro caso el módulo receptor es el PXI1Slot16.

# niRFSA Configure Acquisition Type.vi

# instrument handle instrument handle out acquisition type error in

Figura 2.19. niRFSA Configure Acquisition Type.vi.

Permite configurar el tipo de adquisición en el dispositivo RFSA, el tipo de adquisición para este VI es (espectro), o una forma de onda (IQ).

# niRFSA Configure Ref Clock.vi

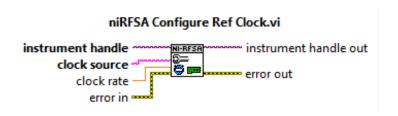


Figura 2.20. niRFSA Configure Ref Clock.vi.

Configura el reloj del equipo; en el *clock source* se indica la referencia, se puede realizar mediante un control.

# niRFSA Configure Reference Level.vi

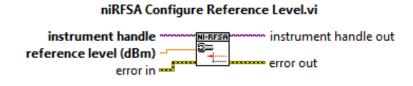


Figura 2.21. niRFSA Configure Reference Level.vi.

Configura el nivel de referencia, es decir, en el analizador representa el nivel de potencia (dBm) máximo esperado de la señal recibida.

# niRFSA Configure Spectrum Frequency Star Stop.vi

# instrument handle instrument handle out start frequency stop frequency error in

Figura 2.22. niRFSA Configure Spectrum Frequency Star Stop.vi.

Esta herramienta tiene 2 opciones de configuración:

- *Center span*: Especifica el lapso y frecuencia central de un espectro adquirido, el valor es expresado en hertz (Hz).
- Start & Stop: Especifica los valores de inicio y final de un rango de frecuencias en donde se realiza el barrido de señales.

# niRFSA Configure Resolution Bandwidth.vi

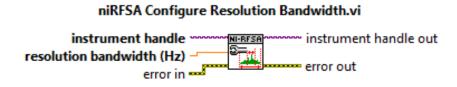


Figura 2.23. niRFSA Configure Resolution Bandwidth.vi.

Configura el ancho de banda de la resolución de los espectros obtenidos, el valor es en hertz y se realiza mediante un control o una constante.

# niRFSA Read Power Spectrum (Cluster).vi

# instrument handle instrument handle out timeout (10 sec) power spectrum

Figura 2.24. niRFSA Read Power Spectrum (Cluster).vi.

error in -

Según los valores en las herramientas de configuración, este VI lee el espectro recibido y devuelve el valor de la potencia (dBm) que podrá ser visualizado en un indicador gráfico.

#### niRFSA Close.vi

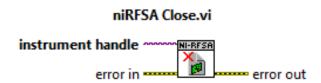


Figura 2.25. niRFSA Close.vi.

Termina con el programa del analizador o cierra sesión del controlador.

# Waveform Graphs

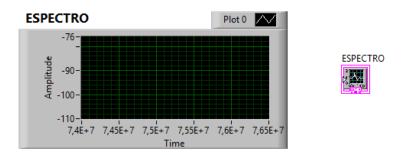


Figura 2.26. Waveform Graphs.

Indicador gráfico en 2 dimensiones; en el eje "y" indica el valor de amplitud (potencia), en el eje "x" el tiempo, sin embargo, en nuestra adquisición indicará el valor de frecuencia del espectro.

# Timer Wait (ms)



Figura 2.27. Timer Wait (ms).

Se especifica el valor en milisegundos, que es el tiempo que se demora en tomar o leer datos del CPU o controlador.

# SMT Spectrum Peak Search.vi

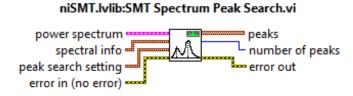


Figura 2.28. SMT Spectrum Peak Search.vi.

Pertenece al toolkit SMT (Spectral Measurement toolkit), este VI busca el pico que es la potencia o amplitud máxima del espectro adquirido. Se debe ingresar parámetros o información de la señal y el VI retorna valores de frecuencia, potencia y número de picos.

# **Index Array**

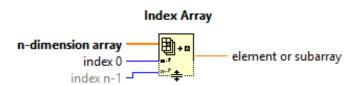


Figura 2.29. Index Array.

Retorna un elemento o subarray de una matriz de n elementos. La matriz puede ser de cualquier tipo.

#### Unbundle

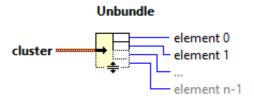


Figura 2.30. Unbundle.

Esta herramienta retorna elemento por elemento que se encuentran organizados en un clúster. La función toma automáticamente el tamaño del clúster.

# **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto para el analizador.
- 2. Agregamos los controles que se utilizará para modificar la configuración de las señales que se recibirán. Para esto utilizamos 4 controles numéricos y 2 controles de texto:
  - **a.** Módulo receptor (resource name): Este control permite ubicar el módulo del receptor o analizador; en nuestro PXI elegimos el número 16.
  - **b.** Nivel de referencia (potencia): Se configura la potencia y representa la potencia máxima esperada.
  - **c.** Frecuencia de inicio: Representa el inicio de la banda de frecuencia en donde se realizará el barrido.
  - **d.** Frecuencia final: Representa el final de la banda de frecuencia en donde se realizará el barrido.
  - **e.** Resolución de ancho de banda: Se configura el ancho de banda de la señal recibida.
  - f. Clock source.

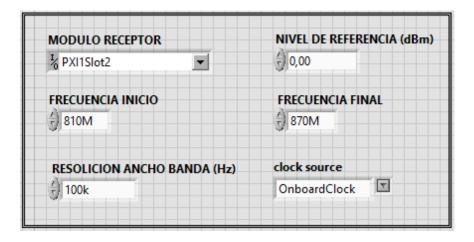


Figura 2.31. Controles de configuración, panel frontal.

3. De igual manera que el generador, unimos estos controles a las herramientas de configuración para el analizador. En la herramienta niRFSA Configure Acquisition Type.vi, en tipo de adquisición, haciendo click derecho creamos una constante; esta constante será Spectrum.

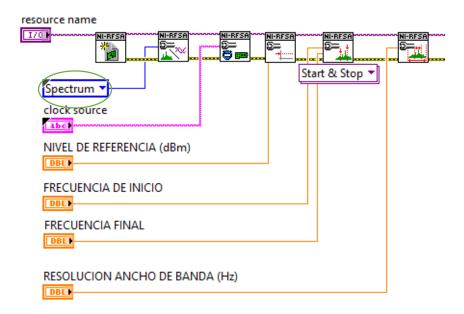


Figura 2.32. Herramientas de configuración, diagrama de bloques.

4. A continuación de la configuración de adquisición, necesitamos leer la señal recibida; utilizamos niRFSA Read Power Spectrum.vi, esta herramienta indica el valor de la potencia y ancho de banda de la señal y mediante un Waveform Graph la visualizamos. Se coloca dentro de un While Loop para que la lectura sea continua. Dentro del bucle agregamos un Timer Wait (ms) con un valor constante de 100 mili segundos para que se realice cada lectura. Finalmente se cierra la sesión con el niRFSA Close.vi.

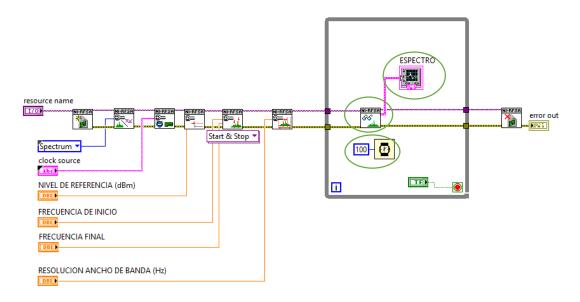


Figura 2.33. Analizador de la señal, diagrama de bloques.

5. Por consiguiente, sacamos los datos numéricos de frecuencia y potencia; para esto utilizamos *Spectrum Peak Search.vi* que nos permite obtener información de la señal recibida. En este VI es necesario configurar el tipo de información que se desea extraer, haciendo click derecho en las entradas de *spectral info* y *peak search setting*.

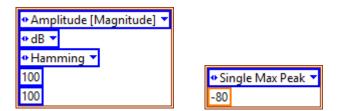


Figura 2.34. Configuración de parámetros del Spectrum Peak Search.vi.

6. Creamos un arreglo de 2 elementos con la ayuda de la herramienta *Index Array*. Los elementos serán frecuencia y potencia, los cuales los desglosaremos con un *Unbundle* que luego serán mostrados en indicadores numéricos.

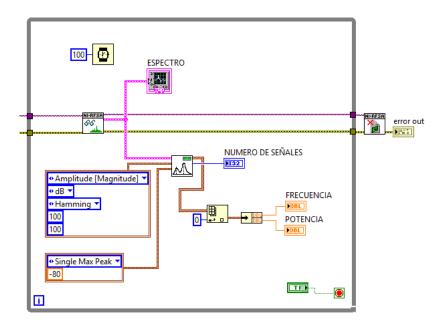


Figura 2.35. Diagrama de bloques, obtención de frecuencia y potencia.

7. El panel frontal se presentará de la siguiente manera.



Figura 2.36. Panel frontal de adquisición de señales.

# 2.3.2. Comprobación de los programas de Instrumentación.

- **a.** Abrir los VI's: Generador de señal y Adquisición de espectro, de la carpeta Instrumentación con señales reales.
- **b.** En el VI Generador de señal, configurar los valores con los siguientes parámetros:

Tabla 2.1. Parámetros para el generador de señales.

Módulo del generador	PXI1Slot8
Frecuencia central	5.8 GHz
Nivel de potencia	0 dBm
Tipo de generación	CW

**c.** En el VI Adquisición de espectro configurar los valores con los siguientes parámetros:

**Tabla 2.2.** Parámetros para la adquisición de espectro.

Módulo receptor	PXI1Slot16
Nivel de referencia	0 dBm
Frecuencia de inicio	5.7 GHz
Frecuencia Final	5.9 GHz
Resolución de ancho de banda	100 KHz
Clock source	OnboardClock

**d.** Conectar las antenas en el trasmisor y receptor.

Tabla 2.3. Antenas utilizadas para comprobación.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
12	SHF	5,15 - 5, 875 GHz	Panel	2

e. Al correr los VI's, se obtendrán los siguientes valores del espectro.



Figura 2.37. Señal generada.

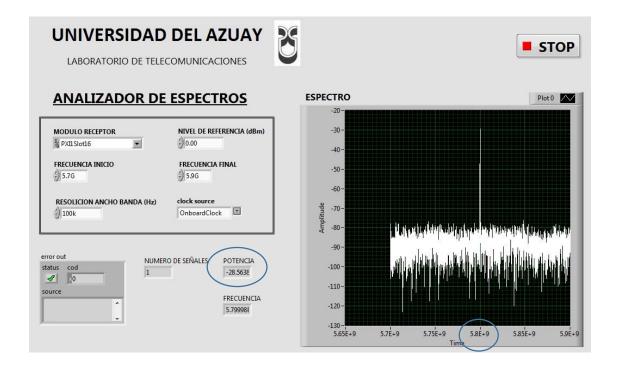


Figura 2.38. Espectro de la señal generada.

El espectro de la señal está en la frecuencia especificada, con una potencia igual a la del generador de señales.

**f.** Repetir los literales b), c) y d) con los siguientes parámetros e identificar la potencia y dibujar el espectro adquirido.

**Tabla 2.4.** Parámetros para el Generador de señales.

Módulo del generador	PXI1Slot8
Frecuencia central	87.5 MHz
Nivel de potencia	-10 dBm
Tipo de generación	CW

**Tabla 2.5.** Parámetros para la adquisición del espectro.

Módulo receptor	PXI1Slot16
Nivel de referencia	-10 dBm
Frecuencia de inicio	87 MHz
Frecuencia Final	89 MHz
Resolución de ancho de banda	10 KHz
Clock source	OnboardClock

**g.** Al correr los VI's, se obtendrán los siguientes valores del espectro.

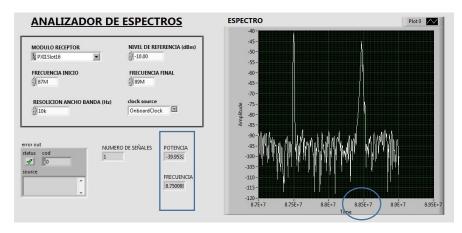


Figura 2.39. Espectro de señal generada.

Existen dos señales espectrales, la frecuencia utilizada está cercana a las frecuencias radiales de FM por lo que se captura el espectro de la emisora 88.5 FM.

#### Conclusión.

La configuración de las herramientas de generación y transmisión en el NI PXIe-1075 es muy simple permitiendo generar señales desde los 50 MHz hasta los 6.6 GHz. Se debe elegir la antena correcta para la frecuencia de la generación y así obtener la máxima potencia de transmisión, de la misma manera nos permite analizar frecuencias reales generadas por el equipo o señales del medio como son las señales de radiofonía.

# 2.3.3. Ejercicios de Aplicación.

1. Abrir el programa de Adquisición de espectro y configurar los siguientes parámetros. Observar las señales adquiridas y explicar.

Tabla 2.6. Parámetros para la adquisición del espectro. Ejercicio 1.

Módulo receptor	PXI1Slot16
Nivel de referencia	20 dBm
Frecuencia de inicio	87 MHz
Frecuencia Final	108 MHz
Resolución de ancho de banda	100
Clock source	OnboardClock

2. Abrimos los programas de generación de señales y Adquisición de espectro y los configuramos con los siguientes parámetros; Explicar lo que sucede.

**Tabla 2.7.** Parámetros del generador de señales. Ejercicio 2.

Módulo del generador	Pxi1slot8
Frecuencia central	88.5 MHz
Nivel de potencia	30 dBm
Tipo de generación	CW

**Tabla 2.8.** Parámetros para la adquisición de espectro. Ejercicio 2.

Módulo receptor	Pxi1slot16
Nivel de referencia	30 dBm
Frecuencia de inicio	87 MHz
Frecuencia Final	90 MHz
Resolución de ancho de banda	10K
Clock source	OnboardClock

# CAPÍTULO 3

# COMUNICACIONES ANALÓGICAS Y DIGITALES

#### Introducción.

Las telecomunicaciones en la actualidad se han vuelto un instrumento fundamental en la vida cotidiana de la sociedad, convirtiéndose en una herramienta de desarrollo social y económico. Las telecomunicaciones se encuentran en casi todo lo que conocemos actualmente, desarrollando tecnologías que nos permiten enviar información a grandes distancias, con artefactos no muy complejos y amigables con la sociedad como son los teléfonos móviles, computadoras, etc. Cada uno de ellos con diferentes actividades como son la mensajería, llamadas, internet, GPS, Wi-Fi etc.

#### Telecomunicaciones Inalámbricas.

Son las más usadas en la actualidad ya que no están limitadas por un medio de propagación por cable, si no que utiliza la propagación de ondas electromagnéticas a través del espacio, haciéndolas mucho más flexibles y eficaces. El desafío de las telecomunicaciones inalámbricas está presente en los receptores y transmisores que están constituidos por antenas, moduladores, filtros, demoduladores, generadores de señal, que forman parte del equipó físico para el tratamiento de las señales transmitidas y recibidas. En el presente capítulo veremos y desarrollaremos prácticas en los diferentes tipos de modulación y demodulación de las señales inalámbricas tanto analógicas como digitales para ser propagadas por el espacio libre, para ello tenemos que tener breves conocimientos sobre lo que es:

#### Modulación.

La modulación es el proceso de transformar información de su forma original (Banda base o frecuencia intermedia) a una forma más adecuada para la transmisión, estas señales son llamadas radiofrecuencia (RF) que son señales con una frecuencia relativamente altas para ser radiadas de una forma eficiente por una antena y propagarse por el espacio libre.

#### Demodulación.

Es el proceso inverso a la modulación, mediante el cual es posible recuperar la señal de datos de una señal transmitida, donde los receptores reciben una señal en RF y la transforman a su forma original o banda base (Información).

En los dos procesos antes mencionados se involucran tres tipos de señales que son:

#### Señal Portadora.

Una señal portadora es la encargada de fijar la frecuencia de transmisión, generalmente es una onda senoidal y de frecuencia alta, y es la que alteramos en alguno de sus parámetros (amplitud, frecuencia o fase) para que transporte información o datos.

#### Señal Moduladora.

Es la señal que contiene la información a transmitir, puede ser analógica (senoidal) o digital (valores discretos entre ceros y unos). Esta señal es de frecuencia baja conocida como frecuencia intermedia o banda base.

#### Señal Modulada.

La señal modulada es el resultado final de la modulación, al montar la información (señal moduladora) sobre la onda que transportara dicha información (señal portadora) da como resultado una onda modulada que varía uno de sus parámetros según el tipo de modulación que realicemos.

# 3.1. Modulación Analógica.

La modulación analógica es un término utilizado cuando se hace referencia a la modulación donde tanto la señal portadora como las señales de información o datos son analógicos. A continuación se realizarán los diferentes tipos de modulación y demodulación analógicas, utilizando las herramientas de LabVIEW, con señales reales generales por el equipo PXIe-1075.

# 3.2. Tipos de modulación analógicas.

# 3.2.1. PRÁCTICA: MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN AM.

# **Objetivos:**

- a. Mejorar los conceptos básicos de modulación y demodulación en amplitud de señales analógicas.
- **b.** Ingresar parámetros de valores en los programas desarrollados, con antenas correspondientes a la frecuencia.
- c. Analizar el comportamiento de las señales trasmitidas y recibidas en el dominio del tiempo y frecuencia.
- **d.** Realizar cálculos con los parámetros de la modulación AM y su espectro.

# Modulación en amplitud (AM).

La modulación en amplitud o amplitud modulada (AM) es la técnica de cambiar la amplitud de una señal portadora de frecuencia alta, de acuerdo a la amplitud de la señal modulante que es la de información, para ser radiada de forma eficiente por el espacio libre.

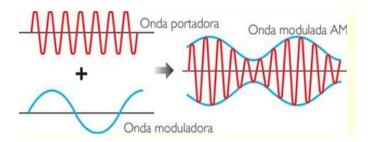


Figura 3.1. Modulación AM.

Fuente: (JULIO MARTÍNEZ, 2013).

Como se ilustra en la Figura 3.1 la portadora varia su amplitud de acuerdo con la señal moduladora que es la envolvente de la señal modulada o de información esta variación de la amplitud depende del índice de modulación AM. Si la señal moduladora es una señal arbitraria (voz), la ecuación matemática que describe la modulación AM es:

$$V(t) = (A_c + A_m) \cos w_c t$$

V(t) = Amplitud instantánea de la señal modulada.

 $A_c$  = Amplitud instantánea pico de la portadora.

 $A_m$  = Amplitud instantánea pico de la señal moduladora.

 $w_c$  = Frecuencia en radianes de la portadora.

t = Tiempo.

Sin embargo si la moduladora es una onda sinusoidal la ecuación tiene la siguiente forma:

$$V(t) = (A_c + A_m \cos w_m t) \cos w_c t$$

V(t) = Amplitud instantánea de la señal modulada.

 $A_c$  = Amplitud instantánea pico de la portadora.

 $A_m$  = Amplitud instantánea pico de la señal moduladora.

 $w_c$  = Frecuencia en radianes de la portadora.

 $w_m$  = Frecuencia en radianes de la moduladora.

t = Tiempo.

La suma de las amplitudes en los dos casos es algebraica, es decir que la amplitud pico aumenta y disminuye por la modulación, es por eso que la onda modulada varia solo en la amplitud dependiendo de la señal de entrada o moduladora.

# Índice de modulación AM.

El índice de modulación es la relación que existe entre la amplitud de la señal moduladora y la amplitud de la señal portadora. También es conocida como profundidad de la modulación, porque describe la profundidad lograda para una señal modulada en amplitud y frecuencia.

$$m = \frac{Am}{Ap}$$

m =Índice de modulación.

Am = Amplitud de la moduladora.

Ap = Amplitud de la portadora.

El índice de modulación al ser una relación no tiene unidad y esta expresada en porcentaje, teniendo su valor entre 0 y 1, si su valor esta entre esos límites habrá modulación sin distorsión y para un valor igual a 1 habrá modulación al 100%, pero si su valor excede la unidad se da una sobre modulación y se manifiesta como un cambio de fase, distorsión de la envolvente y posteriormente, distorsión del mensaje recibido en el receptor como se muestra en la siguiente figura.

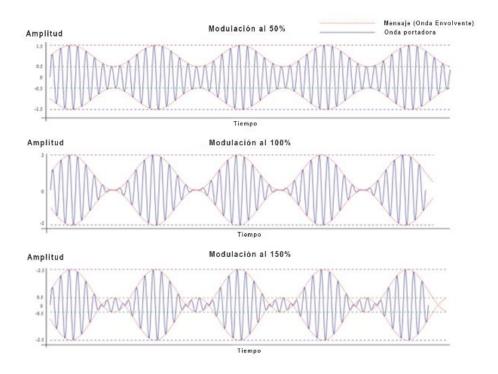


Figura 3.2. Índice de modulación AM.

Fuente: (ELEMANIA ALTERVISTA, s.a.).

#### Espectro de frecuencias de AM.

El espectro de una señal modulada en AM contiene las componentes de la frecuencia apartadas  $f_m$  Hertz a ambos lados de la portadora, es decir está formada por las bandas laterales superior e inferior que es igual a la suma y diferencia de la frecuencia modulada con la frecuencia de la portadora. Por lo que el espectro de la señal AM 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 de la señal moduladora.

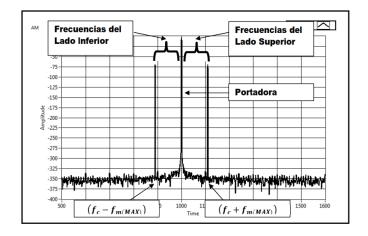


Figura 3.3. Espectro de la señal AM.

Fuente: (ANDRÉS VANEGAS GUILLÉN, 2011).

#### Ancho de banda.

Si observamos el espectro de la señal AM, el ancho de banda es igual a:

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

B =Ancho de banda.

 $f_{m(max)}$  = Frecuencia máxima de la señal moduladora.

# Demodulación AM.

El receptor debe ser capaz de recibir, amplificar y de modular una señal de RF, para ser transformada a su forma original o banda base (información), también debe ser capaz de discriminar los diferentes canales del espectro total de radio y seleccionar el canal o banda especifica de frecuencias. Por tal motivo los equipos para la demodulación son muy simples y baratos.

# Frecuencias funcionales de AM.

Las frecuencias de AM abarcan un rango de frecuencia que va desde 540 Hz a 1600 KHz.

# Aplicaciones de la modulación AM.

La modulación AM es usada en la radiofonía, en las ondas medias, ondas cortas, e incluso en la VHF. También es utilizada en las comunicaciones radiales entre los aviones y las torres de control de los aeropuertos.

# 3.2.1.1. Modulación AM, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de trasmisión es necesario utilizar las siguientes herramientas adicionales a las de configuración vistas y descritas en el capítulo 2.

#### **Property Node**

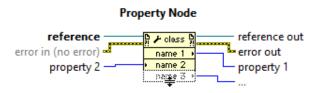


Figura 3.4. Nodo de propiedad.

Se utiliza el nodo de propiedad para establecer y/o obtener características, propiedades y métodos en instancias locales y remotas.

# niRFSG Write Arb Waveform (Complex Input).vi

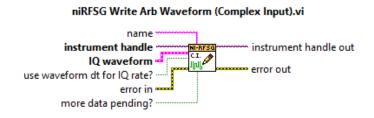


Figura 3.5. niRFSG Write Arb Waveform (Complex Input).vi.

Escribe una forma de onda arbitraria al dispositivo generador, recibe información de banda base complejo en forma de clúster.

# MT Modulate AM.vi

# message signal AM modulated waveform modulation index peak message amplitude error in (no error) suppress carrier? (F)

Figura 3.6. MT Modulate AM.vi.

Realiza la modulación en amplitud sobre una señal portadora, la envolvente compleja, la modulación se realiza de acuerdo a la información de banda base, según los parámetros de información. La envolvente de modulación se devuelve en *AM modulated waveform*.

# rfsg\_FindWaveformParamsForFrequency.vi

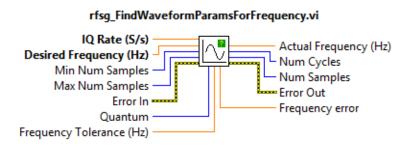


Figura 3.7. rfsg\_FindWaveformParamsForFrequency.vi.

Encuentra y reúne los parámetros de una forma de onda tales como: el número de ciclos de la forma de onda, la tasa de bits y la frecuencia.

#### Basic Function Generator.vi

#### NI\_MABase.lvlib:Basic Function Generator.vi

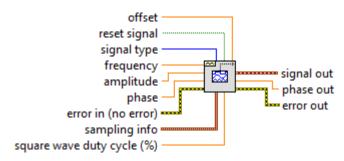


Figura 3.8. Basic Function Generator.vi.

Esta herramienta recibe los parámetros de información y genera una forma de onda según los parámetros establecidos en la entrada.

# niRFSG Clear All Arb Waveforms.vi

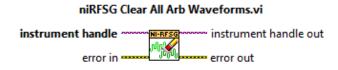


Figura 3.9. niRFSG Clear All Arb Waveform.vi.

Elimina las formas de ondas y scripts que se definieron, para proceder a cerrar el estado de configuración.

# **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado MODULACIÓN AM.
- **2.** Iniciamos la programación con las herramientas de configuración eligiendo el módulo trasmisor, el *boolean* solo nos indica el estado de la generación.

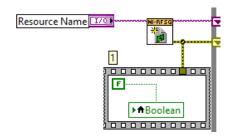


Figura 3.10. Configuración módulo Tx.

**3.** Configuramos la frecuencia central y la potencia de la señal portadora; habilitamos la generación IQ indicando al driver la generación de una forma de onda arbitraria.

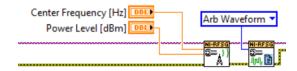


Figura 3.11. Configuración de la señal portadora.

**4.** Configuramos los parámetros para el ancho de banda de la señal a transmitir, creando controles para la frecuencia del mensaje. Los controles de la ganancia del filtro y reloj de referencia son parámetros de configuración.

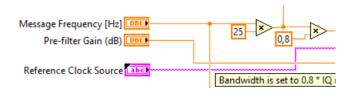


Figura 3.12. Configuración del ancho de banda.

Damos el valor del *IQ rate* (*S/s*), el cual se utilizará como bits de muestreo para generar las formas de onda. El valor será definido según el Teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo será como mínimo el doble de la frecuencia que se desea muestrear. En este caso multiplicamos la frecuencia del mensaje por 25, este valor puede cambiar dependiendo de la frecuencia a muestrear.

**5.** Utilizamos un *Property node* para establecer y obtener propiedades o parámetros para generar la señal moduladora.

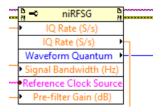


Figura 3.13. Parámetros de la señal moduladora.

6. Con los parámetros de información y propiedades, generamos la forma de onda moduladora. Utilizando las herramientas Basic Function Generator.vi y rfsg\_FindWaveformParamsForFrequency.vi.

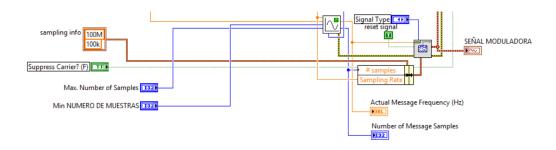


Figura 3.14. Parámetros y generación de la señal moduladora.

Realizamos la modulación, la señal del mensaje para trasmitir usando *Modulate AM.vi*, y creamos un control para el índice de modulación.



Figura 3.15. Modulación AM.

8. Escribimos la forma de onda AM con la herramienta *niRFSG Write Arb*Waveform (Complex Input).vi y luego se inicializa la generación.



Figura 3.16. Escritura de la señal para la transmisión.

 Utilizamos la herramienta niRFSG Check Generator Status.vi dentro de un While Loop, que revisará continuamente el estado de la generación.

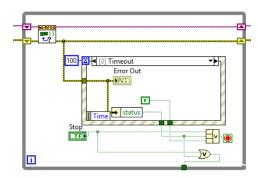


Figura 3.17. Estado de generación.

**10.** Luego que se trasmite la señal modulada, cerramos la sesión del controlador con las herramientas de configuración.

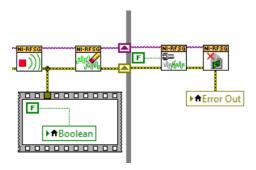


Figura 3.18. Cierre de la transmisión.

11. Todo el programa utiliza un While Loop para que la generación sea continua.

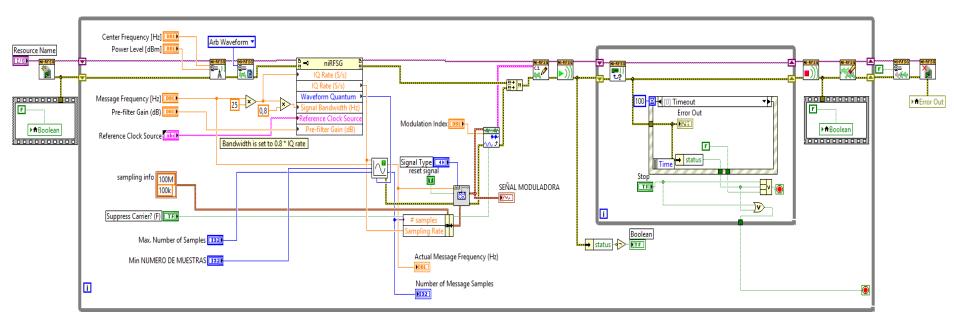


Figura 3.19. Diagrama de bloques Modulación AM.

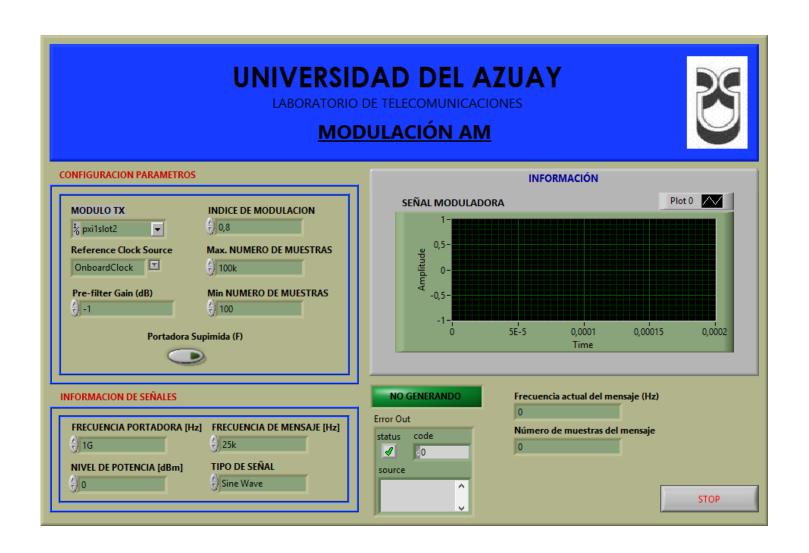


Figura 3.20. Panel Frontal Modulación AM.

# 3.2.1.2. Demodulación AM, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de recepción es necesario utilizar las siguientes herramientas adicionales a las de configuración y las analizadas anteriormente.

# niRFSA Configure IQ Carrier Frequency.vi

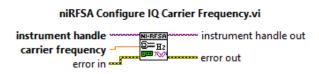


Figura 3.21. niRFSA Configure IQ Carrier Frequency.vi.

Configura la frecuencia portadora del vector RF para una adquisición IQ. La frecuencia portadora se le conoce como la frecuencia central de la señal IQ.

# niRFSA Configure IQ Rate.vi

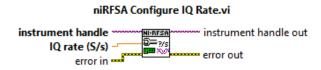


Figura 3.22. niRFSA Configure IQ Rate.vi.

Configura los bits IQ (S/s) de muestreo de la adquisición. El valor se expresa en muestras por segundo.

# niRFSA Configure Number of Samples.vi

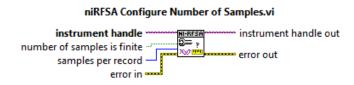


Figura 3.23. niRFSA Configure Number of Samples.vi.

Configura el número de muestras de una adquisición. Se puede configura al dispositivo para adquirir muestras finitas o continuas.

# niRFSA Read IQ.vi



Figura 3.24. niRFSA Read IQ.vi.

Inicia la adquisición a un solo registros de datos IQ. No se debería utilizar si la adquisición de muestras es continua o varios registros. El dato es devuelto en un clúster en forma de onda.

#### MT Demodulate AM.vi

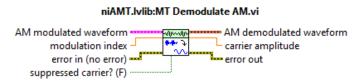


Figure 3.25. MT Demodulate AM.vi.

Demodula la señal en amplitud modulada. Tiene la opción de suprimir la onda portadora.

# **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado DEMODULACIÓN AM.
- 2. Iniciamos la sesión configurando el módulo receptor.

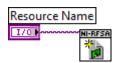


Figura 3.26. Configuración módulo Rx.

3. Configuramos el reloj de referencia para la recepción de la señal.

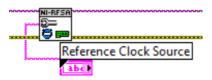


Figura 3.27. Clock de referencia.

**4.** Para la demodulación de la señal AM el receptor debe estar configurado en señales IQ, con ayuda del *niRFSA Configure Acquisition Type.vi*.

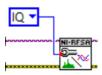


Figura 3.28. Configuración para obtener señal IQ.

5. Para receptar la señal que deseamos, configuramos la señal portadora en los siguientes parámetros: niRFSA Configure Reference Level.vi configura el nivel de potencia, niRFSA Configure IQ Carrier Frequency.vi configura la frecuencia central, niRFSA Configure IQ Rate.vi especifica los bits a muestrear, niRFSA Configure Number of Samples.vi configura el número de muestras.

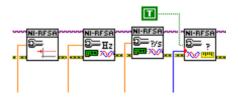


Figura 3.29. Herramientas de configuración para obtener señal.

6. Iniciamos la adquisición de la señal IQ con la herramienta niRFSA Read IQ.vi, la señal devuelta es introducida en el MT Demodulate AM.vi que demodula la señal AM recibida y mandamos a mostrar en un indicador gráfico la señal de información.

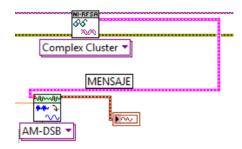


Figura 3.30. Demodulación de la señal AM.

7. Para capturar la señal modulada configuramos el niRFSA Read IQ.vi en Complex WDT que adquiere la señal en el dominio del tiempo y mandamos a un indicador gráfico.

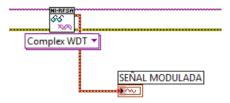


Figura 3.31. Señal Modulada AM.

**8.** Para mostrar el espectro de la señal modulada el receptor debe estar configurado en señales *Spectrum*, con ayuda del *niRFSA Configure Acquisition Type.vi*.

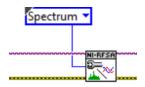


Figura 3.32. Configuración para obtener espectro AM.

9. Para la adquisición del espectro se configuran los parámetros de la adquisición con las herramientas: niRFSA Spectrum Frequency Center Span.vi configura la frecuencia central, niRFSA Configure Resolution Bandwidth.vi configura la resolución del ancho de banda.



Figura 3.33. Herramientas de configuración para el espectro.

**10.** El *niRFSA Power Spectrum (Cluster).vi* lee el espectro de la señal deseada y la mandamos a un indicador gráfico.



Figura 3.34. Espectro AM.

11. Cerramos la sección de la adquisición tanto del espectro como de la señal IQ.



Figura 3.35. Cierre de sesión de adquisición.

**12.** Para cada uno de los parámetros de configuración tanto para el espectro como para las señales IQ se crean controles.

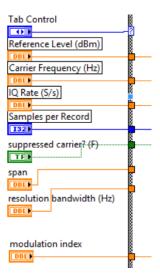


Figura 3.36. Controles de configuración.

13. En el programa utilizamos un While Loop general para realizar continuamente la recepción. En la adquisición se realizó una máquina de dos estados: adquisición de espectro y adquisición de señal IQ (modulación) utilizando un Case Structure, el equipo PXIe-1075 trabaja bien en espectro o en señal IQ pero no con ambas al mismo tiempo.

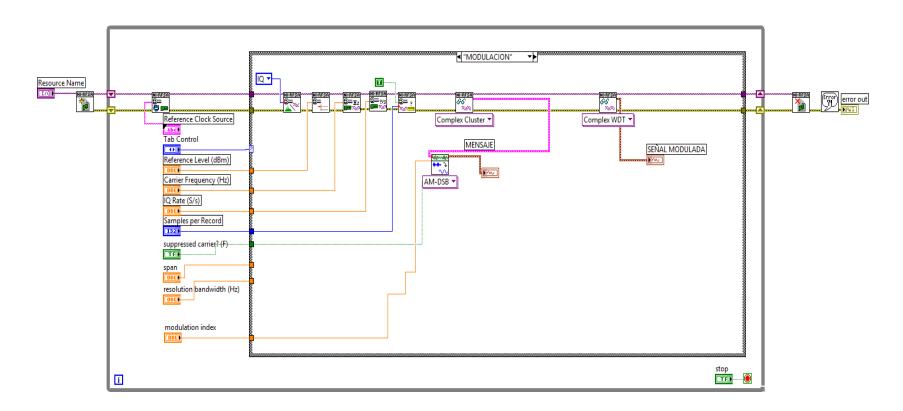


Figura 3.37. Diagrama de bloques Demodulación AM (Demodulación CASO 1).

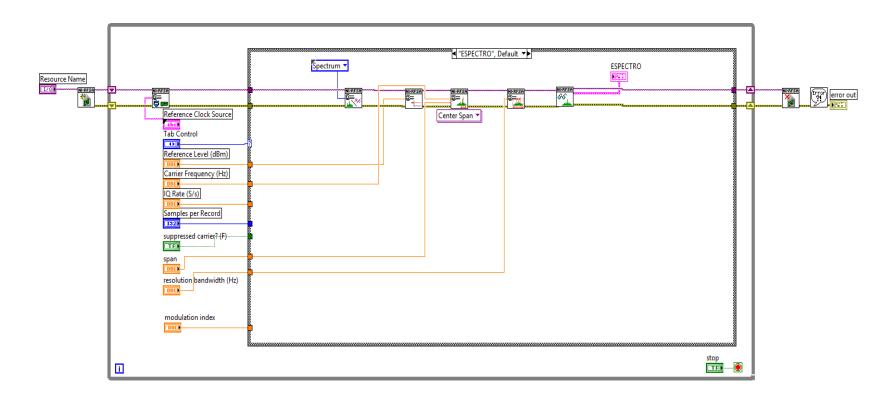


Figura 3.38. Diagrama de bloques, análisis del espectro AM. (Espectro CASO 2).



Figura 3.39. Panel frontal Demodulación AM.

### 3.2.1.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación AM.

a. Conectar las antenas en el trasmisor y receptor del NI PXIe-1075.

**Tabla 3.1.** Antenas utilizadas para la modulación y demodulación AM.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
3	UHF	1800 - 1990 MHz	Yagi	2

**b.** Abrimos los programas de modulación y demodulación AM, configuramos los siguientes parámetros en el panel frontal y observamos.

### Modulador.

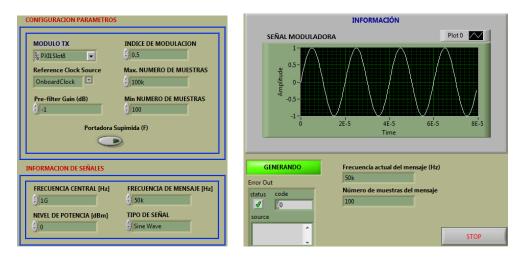


Figura 3.40. Configuración del panel frontal modulación AM.

### Demodulador.



Figura 3.41. Configuración del panel frontal demodulación AM.

**c.** Al correr los programas obtenemos los siguientes resultados.

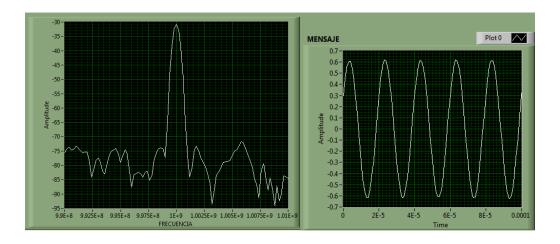


Figura 3.42. Espectro y mensaje AM.

Se observa la señal recibida en el demodulador, se obtiene la señal senoidal enviada en el transmisor y su espectro en la frecuencia central a la que fue enviada.

**d.** Repetimos los pasos del punto (b), esta vez suprimimos la portadora tanto en el modulador como en el demodulador:

### Modulador.



Figura 3.43. Modulador AM con portadora suprimida.

### Demodulador.

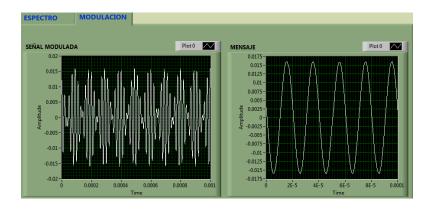


Figura 3.44. Demodulador AM con portadora suprimida.

Se puede ver con más claridad las señales modulada en el tiempo y la variación de la amplitud con la modulación.

**e.** Configuramos el modulador con los siguientes parámetros para observar las bandas laterales del espectro de la señal AM.

### Modulador.



Figura 3.45. Configuración del Modulador AM.

### Demodulador.

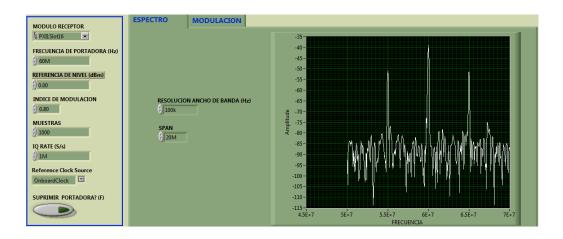


Figura 3.46. Espectro de la señal AM con sus bandas laterales.

Si recordamos la teoría las bandas laterales se encuentra a  $f_c \pm f_{m(max)}$  de la señal portadora, con los parámetros configurados en el equipo se puede calcular que:

$$banda\ superior = f_c + f_{m(max)}$$
  
 $banda\ superior = 60MHz + 5MHz$   
 $banda\ superior = 65\ MHz$ 

$$banda\ Inferior = f_c - f_{m(max)}$$
 $banda\ Inferior = 60MHz - 5MHz$ 
 $banda\ Inferior = 55\ MHz$ 

Como se ilustra en la Figura 3.46 se observa las bandas superior e inferior separadas de la señal portadora 5MHz, haciéndose evidente el ancho de banda necesario para la trasmisión en AM que es:

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

$$B = 2 (5MHz)$$

$$B = 10 MHz$$

### Conclusión.

Las frecuencias utilizadas no son de la banda MF, banda para trasmisiones AM, por las limitaciones del equipo NI PXIe-1075 se trasmiten en frecuencias más altas. La modulación AM se hace más evidente en la modulación con portadora suprimida notándose el cambio de amplitud en la modulación AM (Figura 3.44), para observar las bandas laterales generadas en la modulación AM se hacen los cálculos correspondientes y se configura el equipo, recordando que en la modulación AM siempre se generan dos bandas laterales separadas de la portadora  $\pm f_{m(max)}$ , frecuencia de la moduladora (Figura 3.46).

### 3.2.1.4. Ejercicios de aplicación de la modulación AM.

- 1. Determinar por las fórmulas de la modulación AM.
  - **a.** Las frecuencias de las bandas laterales superior e inferior.
  - **b.** El ancho de banda de la señal modulada.

Para los siguientes parámetros:

Tabla 3.2. Valores para el cálculo de las frecuencias laterales y ancho de banda AM.

Frecuencia de la	Frecuencia de la	Índice de
portadora	moduladora	modulación
60 MHz	5Mhz	0.5
70MHz	8Mhz	0.8
80MHz	6Mhz	1

2. Conectar las antenas en el trasmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla 3.3. Antenas utilizadas para el ejercicio modulación AM.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas	
11	HF-VHF-UHF	25 - 1300  MHz	Discono	2	

- **3.** Colocar los parámetros del punto 1 en los programas: MODULACIÓN AM y DEMODULACIÓN AM. Comparar los resultados obtenidos con los cálculos realizados.
- **4.** Repetir el punto 3 con la portadora suprimida en los programas de modulación y demodulación. Analizar las señales adquiridas: espectro y modulación.

### 3.2.2. PRÁCTICA: MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN FM.

### **Objetivos:**

- **a.** Mejorar conceptos básicos de modulación y demodulación de frecuencia en señales analógicas.
- **b.** Ingresar parámetros de valores en los programas desarrollados, con las antenas correspondientes a la frecuencia.
- **c.** Analizar el comportamiento de las señales trasmitidas y recibidas en el dominio del tiempo y frecuencia.
- **d.** Realizar cálculos con los parámetros descritos en la práctica de la modulación FM y su espectro. Comprobar la tabla de Beseel.

### Modulación de frecuencia (FM).

La modulación en frecuencia (FM) consiste en variar la frecuencia de la portadora, proporcionalmente a la frecuencia de la onda moduladora o señal de información, permaneciendo constante su amplitud.

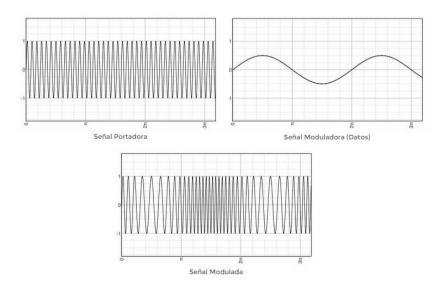


Figura 3.47. Modulación FM.

Como se ilustra en la Figura 3.47 la frecuencia de la señal portadora va a ser variada al ritmo de la frecuencia de la onda moduladora. Si aumenta la frecuencia de la moduladora va a aumentar el valor de la frecuencia de la portadora y al disminuir la frecuencia de la moduladora la frecuencia de la portadora va a disminuir. Esto se puede explicar en base a la ecuación de la modulación FM y de su índice de modulación, entonces tenemos que:

$$K_f = \frac{\Delta f}{V_m}$$

 $K_f$  = Sensibilidad de desviación del modulador (constante).

 $\Delta f$  = Desviación de la frecuencia.

 $V_m$  = Amplitud instantánea de la señal moduladora.

Y el índice de modulación es igual a:

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

m =Índice de modulación FM (adimensional).

 $f_m$  = Frecuencia de la señal moduladora.

Remplazando la ecuación de la sensibilidad del modulador en el índice de modulación, se puede expresar como:

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

Por lo que la ecuación de la modulación FM esta expresada matemáticamente como:

$$V_{Fm}(t) = Ac \cos(w_c t + \frac{\Delta f}{fm} sen w_m t)$$
o

$$V_{Fm}(t) = Ac\cos(w_c t + m sen w_m t)$$

 $V_{Fm}(t)$  = Amplitud de la onda modulada.

Ac = Amplitud de la portadora.

 $w_c$  = Frecuencia de la portadora.

m =Índice de modulación FM.

 $w_m$  = Frecuencia de la moduladora.

Donde se puede observar claramente que la variación de la frecuencia en la señal modulada depende la frecuencia de la señal moduladora.

### Espectro de frecuencias de la señal FM.

En la modulación en frecuencia (FM), una señal moduladora de una sola frecuencia produce una cantidad infinita de pares de frecuencias laterales, cada una desplazada 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 ( $f_c \pm f_m$ ,  $f_c \pm 2f_m$ ,  $f_c \pm 3f_m$ ,  $f_c \pm nf_m$ , etc).

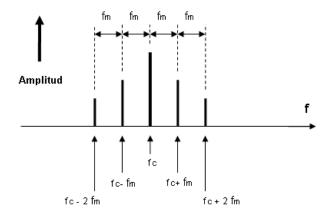


Figura 3.48. Espectro de la señal FM.

Fuente: (JORGE IGNACIO ANDREOTTI, 2015).

Las bandas laterales superiores e inferiores del espectro de la modulación FM dependen del índice de modulación, aplicando las funciones de Beseel de primera orden podemos obtener las bandas laterales más significativas, puesto que se generan un número infinito de frecuencias laterales, 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, en general la mayoría de las frecuencias laterales tienen una amplitud insignificante y se pueden ignorar. Cuando mayor es el índice de modulación (m), mayor es el número de bandas significativas en el espectro de la señal modulada en FM.

mf																	
		Orden															
<b>+</b>	$J_{\theta}$	$J_I$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$	$J_9$	$J_{10}$	$J_{II}$	$J_{12}$	$J_{I3}$	$J_{14}$	$J_{15}$	$J_{16}$
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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.5	0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
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	•	-	-	-	-	-	-	-
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	-	-	-	-	-

Figura 3.49. Pares de frecuencias según Beseel.

Fuente: (JORGE IGNACIO ANDREOTTI, 2015).

### Ancho de banda de la señal FM.

El ancho de banda de una señal modulada en FM es función del índice de modulación, si vemos el espectro de la señal es infinito o depende del número de bandas laterales que se generan. Para fines prácticos se puede considerar el ancho de banda independiente del índice de modulación con la ley de Carson como:

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

B =Ancho de banda.

 $\Delta f$  = Desviación de la frecuencia.

 $f_m$  = Frecuencia de la señal moduladora.

### Frecuencias funcionales de FM.

Las bandas de la modulación FM incluyen la frecuencia muy alta VHF de 87 y 108 MHz, la frecuencia UHF entre 450 y 855 MHz y en microondas de 3 a 30 GHz.

### Aplicaciones de FM.

Por su alta frecuencia es más inmune al ruido, y es más empleada en radios de la policía, de taxis y los de banda civil, también en la televisión, radares y satélites de comunicaciones.

**NOTA:** La modulación FM ocupa más ancho de banda que AM y toda la energía que transmite contiene información, por lo que generan más armónicos y hace que el espectro sea más simétrico respecto a la portadora.

### 3.2.2.1. Modulación FM, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de trasmisión es necesario utilizar la siguiente herramienta adicional a las de configuraciones y herramientas analizadas en la modulación AM.

### MT Modulate FM.vi

### reset? (F) message signal FM modulated waveform FM deviation (Hz) error in (no error)

Figura 3.50. MT Modulate FM.vi.

Realiza la modulación en frecuencia sobre una onda portadora de radio frecuencia, de acuerdo a la información banda base o parámetros del mensaje de la señal. Devuelve la envolvente de la señal modulada FM.

### **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado MODULACIÓN FM.
- 2. Iniciamos la programación con el módulo transmisor, el indicador boolean nos indica el estado de la generación.

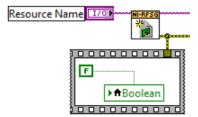


Figura 3.51. Configuración módulo Tx.

**3.** Al igual que en la modulación AM, configuramos la frecuencia central y la potencia de la señal portadora; habilitamos la generación IQ indicando al driver la generación de una forma de onda arbitraria y utilizamos un *Property node* para establecer y obtener propiedades o parámetros para generar la señal moduladora.

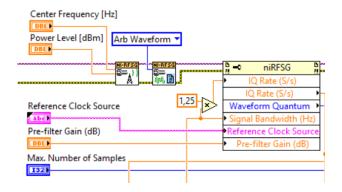


Figura 3.52. Configuración de portadora y parámetros para la señal moduladora.

**4.** Configuramos los parámetros para el ancho de banda de la señal a transmitir, creando controles para la frecuencia del mensaje y la desviación de frecuencia, si recordamos el ancho de banda necesario para la trasmisión es  $B = 2 (\Delta f + f_m)$ .

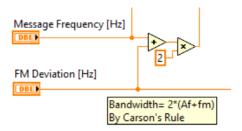


Figura 3.53. Configuración del ancho de banda.

5. Con los parámetros de configuración creamos la onda moduladora que se va a trasmitir con la ayuda de las herramientas Basic Function Generator.vi y rfsg\_FindWaveformParamsForFrequency.vi.

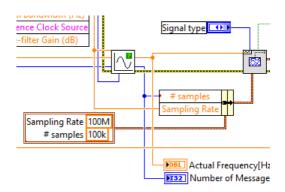


Figura 3.54. Generación de la onda moduladora.

 Realizamos la modulación de la moduladora con la herramienta MT Modulate FM.vi.

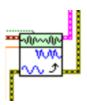


Figura 3.55. Modulación FM.

7. La escritura, generación y control de generación de la señal transmitida se realiza con las mismas herramientas de la modulación AM, y se realiza el cierre de sección de la generación.

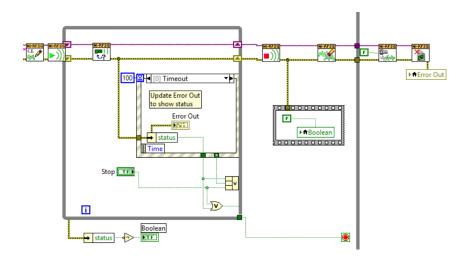


Figura 3.56. Escritura de la señal FM, transmisión y cierre de la sesión de transmisión.

8. Se utiliza un *While Loop* para que la generación de la señal sea continua.

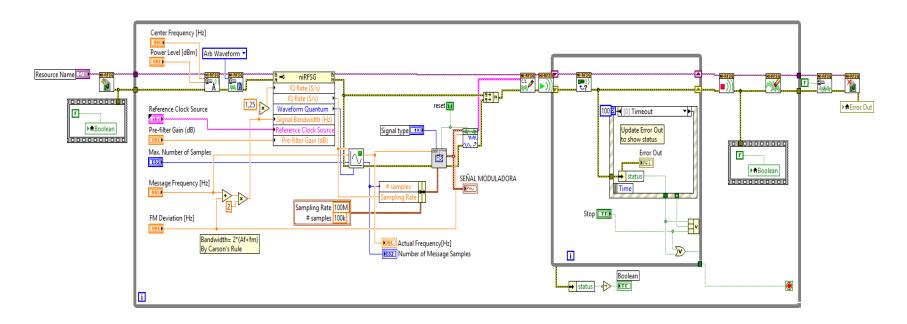


Figura 3.57. Diagrama de bloques de la Modulación FM.



Figura 3.58. Panel frontal de la Modulación FM.

### 3.2.2.2. Demodulación FM, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de recepción FM es necesario utilizar la siguiente herramienta adicional a las de configuración y las estudiadas anteriormente.

### MT Demodulate FM.vi

# reset? (F) FM modulated waveform FM deviation (Hz) carrier correction? (F) error in (no error) remove transient when reset...

Figura 3.59. MT Demodulate FM.vi.

Realiza la demodulación de la señal IQ de entrada. La señal de información recuperada se devuelve en el parámetro *FM demodulated waveform*.

### **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado DEMODULACIÓN FM.
- 2. Iniciamos sesión configurando el módulo receptor.

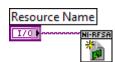


Figura 3.60. Configuración módulo Rx.

**3.** Los parámetros de configuración para la señal IQ de la demodulación FM son los vistos en el demodulador AM, ya descritos en el programa anterior.

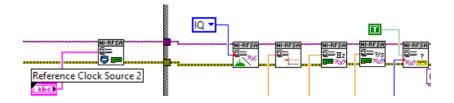


Figura 3.61. Herramientas de configuración de la señal IQ.

4. Iniciamos la adquisición de la señal IQ con la herramienta niRFSA Read IQ.vi, la señal devuelta es introducida en el MT Demodulate FM.vi que demodula la señal FM recibida y mandamos a mostrar en un indicador gráfico la señal de información.

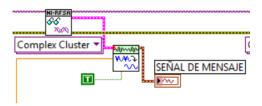


Figura 3.62. Demodulación de la señal FM.

5. Para capturar la señal modulada configuramos el niRFSA Read IQ.vi en Complex WDT que adquiere la señal en dominio del tiempo y mandamos a un indicador gráfico.

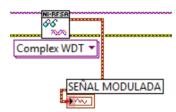


Figura 3.63. Señal Modulada FM.

**6.** Para la adquisición del espectro de la señal FM, realizamos la misma configuración del espectro de AM.

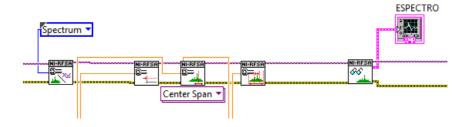


Figura 3.64. Adquisición del espectro de la señal FM.

7. Cerramos sesión de la adquisición tanto del espectro como de la señal IQ.



Figura 3.65. Cierre de sesión de adquisición.

**8.** Para cada uno de los parámetros de configuración tanto para el espectro como para las señales IQ se crean controles.

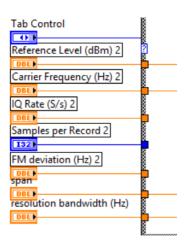


Figura 3.66. Controles de configuración.

**9.** En el programa utilizamos un *While Loop* general para realizar continuamente la recepción. De la misma manera que AM en la adquisición se realizó una máquina de dos estados: adquisición de espectro y adquisición de señal IQ (modulación), utilizando un *Case Structure*, el equipo PXIe-1075 trabaja bien en espectro o en señal IQ pero no con ambas al mismo tiempo.

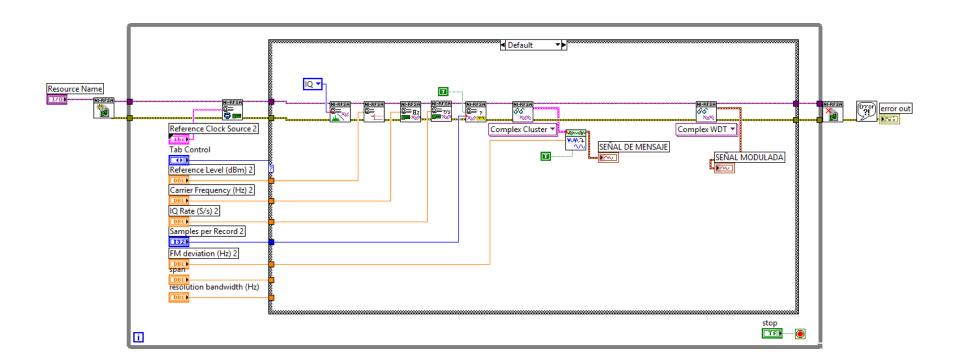


Figura 3.67. Diagrama de bloques, Demodulación FM (Demodulación CASO 1).

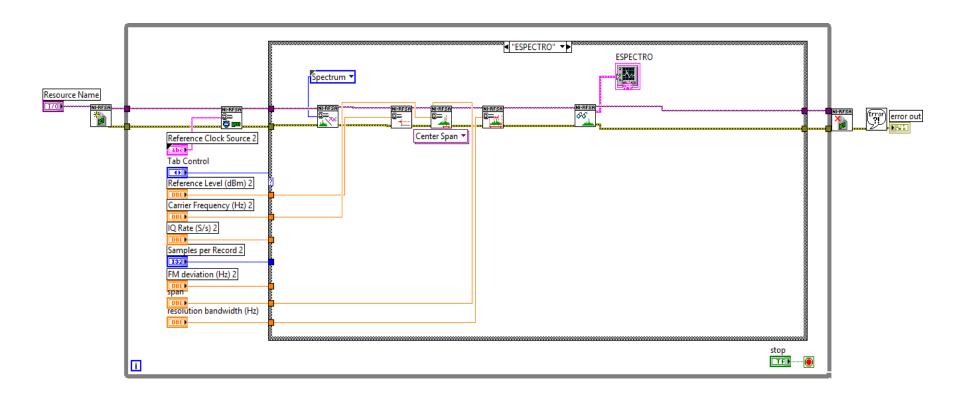


Figura 3.68. Diagrama de bloques, análisis del espectro FM (Espectro CASO 2).



Figura 3.69. Panel frontal Demodulación FM.

### 3.2.2.3 Comprobación de los programas de modulación y demodulación FM.

a. Conectar las antenas en el trasmisor y receptor del NI PXIe-1075.

**Tabla 3.4.** Antenas utilizadas para comprobar la modulación FM.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
3	UHF	1800 – 1990 MHz	Yagi	2

**b.** Abrimos los programas de modulación y demodulación FM, configuramos los siguientes parámetros en el panel frontal y observamos.

### Modulador.



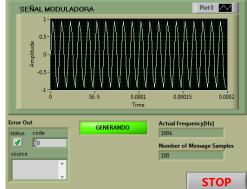


Figura 3.70. Configración del modulador FM.

### Demodulador.

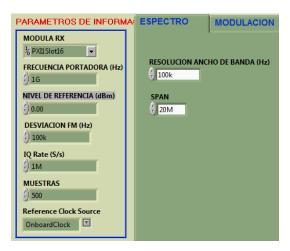


Figura 3.71. Configuración del demodulador FM.

**c.** Al correr los programas se obtienen los siguientes resultados.

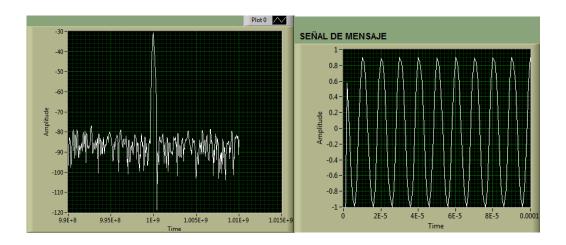


Figura 3.72. Espectro y mensaje FM.

Se puede observar el espectro central de la señal enviada y el mensaje enviado desde el transmisor.

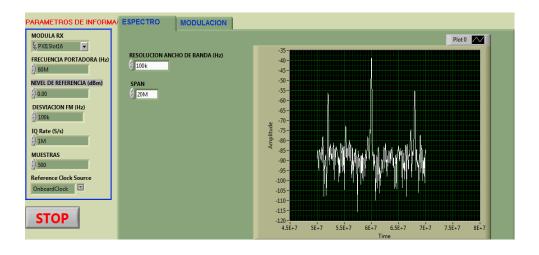
d. Configuramos el demodulador con los siguientes parámetros para obtener un índice de modulación m = 0.25 y observar las bandas laterales en el espectro de la señal FM.

### Modulador.



Figura 3.73. Configuración del modulador FM para un índice de modulación m=0.25.

### Demodulador.



**Figura 3.74.** Configuración del demodulador, espectro de la modulación con m=0.25.

Las bandas significativas en la modulación FM está dado por la tabla de primer orden de Beseel, para un índice de modulación de 0.25 se dan dos bandas laterales significativas con respecto a la frecuencia de la portadora, separadas una distancia igual a:

$$banda\ superior = f_c\ +\ f_m$$
 
$$banda\ superior = 60MHz\ + 8MHz$$
 
$$banda\ superior = 68\ MHz$$

$$banda\ Inferior = f_c - f_m$$
 $banda\ Inferior = 60MHz - 8MHz$ 
 $banda\ Inferior = 52\ MHz$ 

El ancho de banda necesario es igual a:

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

$$B = 2(2MHz + 8MHz)$$

$$B = 20MHz$$

Como se ilustra en la Figura 3.74 se muestran las dos bandas laterales significativas generadas por la modulación FM.

### Conclusión.

En la modulación FM al ser una modulación angular se genera un infinito número de frecuencias laterales a los lados de la portadora original, y por la frecuencia a la que se está generando la transmisión se puede observar en la Figura 3.74 la portadora original más las frecuencias laterales de la modulación, sin embargo, para un análisis más exacto solo se toman las frecuencias más significativas según la tabla de Beseel de primer orden, permitiendo observar para un índice de modulación igual a 0.25 solo dos bandas laterales significativas.

### 3.2.2.4. Ejercicios de aplicación de la modulación FM.

- 1. Determinar por fórmulas de la modulación FM.
  - a. El número de frecuencias de las bandas laterales según la tabla de Beseel de primer orden.
  - **b.** La distancia desde la portadora a las bandas laterales significativas.
  - **c.** El ancho de banda de la señal modulada con la ley de Carson.

Con los siguientes parámetros:

**Tabla 3.5.** Valores para el cálculo de las frecuencias de las bandas significativas y ancho de banda FM.

Frecuencia de la	Frecuencia de la	Frecuencia de		
portadora	moduladora $(f_m)$	desviación (Δf)		
60 MHz	3Mhz	6Mhz		
80MHz	5Mhz	0Mhz		
70MHz	4Mhz	2Mhz		

2. Conectar las antenas en el trasmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla 3.6. Antenas utilizadas para el ejercicio FM.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
11	HF-VHF-UHF	25 - 1300 MHz	Discono	2

- **3.** Colocar los parámetros del punto 1 en los programas: MODULACIÓN FM y DEMODULACIÓN FM. Comparar los resultados obtenidos con los cálculos realizados.
- **4.** Configurar el modulador para obtener un índice de modulación m=1, y determinar los siguientes valores.
  - a. Conjunto de frecuencias laterales significativas.
  - b. Ancho de banda según la ley de Carson.
  - c. Confirmar los valores en el demodulador FM.

López Navas, Vallejo Lucero

### 3.3. Comunicaciones Digitales.

En las comunicaciones digitales se hace referencia a la modulación donde la señal portadora es una señal analógica (senoidal), pero la señal de datos o moduladora es un tren de pulsos discretos entre ceros y unos. Para el análisis de los sistemas de comunicación digital es necesario saber interpretar los diagramas en los demoduladores como son:

### Diagrama de ojo.

Un diagrama de ojo es un método utilizado para el análisis del comportamiento de los enlaces de transmisión digital, siendo una herramienta de sincronización que proporciona una buena visualización de los errores en los niveles y en la sincronización. Es construido observando las salidas de un transmisor digital y corresponde a una gráfica que muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinado.

### Parámetros en el diagrama de ojo.

En el diagrama de ojo los parámetros más importantes a ser analizados son:

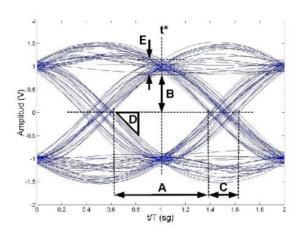


Figura 3.75. Diagrama de ojo.

Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015).

**A** = Anchura del ojo o Intervalo de tiempo en el que se puede muestrear la señal.

 $\mathbf{B}$  = Altura del ojo o Margen de ruido.

C = distorsión de los cruces por cero o más conocido como Jitter.

**D** = Pendiente: Sensibilidad a errores en el instante de muestreo.

**E** = Distorsión máxima.

**t**\* = Instante óptimo de muestreo medido con respecto al origen de tiempo.

### Diagrama de constelación.

Un diagrama de constelación es un método que representa en el plano complejo los estados de símbolo en términos de amplitud y fase en los esquemas de modulación digital. Los ejes del diagrama de constelación suelen ser llamados "I" en fase y "Q" en cuadratura. En la constelación se representa la relación de amplitud y fase de una portadora modulada digitalmente y por lo tanto el módulo y la fase de cada uno de las posibles señales que conforman la modulación.

Cada una de esas posibles señales viene representado por un punto denominado "punto de la constelación". El módulo viene dado por la distancia entre el origen de las coordenadas y el punto de la constelación y la fase es el ángulo entre la línea que une al origen con el punto de la constelación y el eje horizontal.

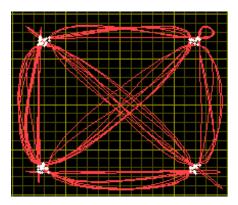


Figura 3.76. Diagrama de Constelación.

### Interpretación de los diagramas de constelación.

Los diagramas de constelación también pueden usarse para reconocer el tipo de interferencia y distorsión de una señal, siendo las más importantes:

• Ruido gaussiano: Representa puntos de la constelación difusos.

López Navas, Vallejo Lucero

110

- Interferencia de frecuencia única no coherente: Representa puntos de la constelación como círculos.
- Ruido de fase: Representa puntos de la constelación dispersos en forma rotacional.
- Atenuación: Hace que los puntos de la esquina de la diagrama se muevan hacia el centro.

**NOTA:** Mientras más separados estén los puntos del diagrama de constelación menos propenso es al ruido el sistema.

A continuación se realizarán los diferentes tipos de modulación y demodulación digital, utilizando los instrumentos de LabVIEW, con señales reales generadas por el equipo PXIe-1075.

### 3.4. Tipos de modulación digital.

### 3.4.1. PRÁCTICA: MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN ASK.

### **Objetivos:**

- a. Mejorar los conceptos básicos de los esquemas de modulación y demodulación digital por desplazamiento de amplitud ASK.
- **b.** Ingresar parámetros de valores en los programas desarrollados, con la antena correspondiente a la frecuencia.
- **c.** Analizar el comportamiento de las señales ASK transmitidas en el dominio de la frecuencia.
- **d.** Analizar el comportamiento de las señales ASK recibidas e interpretar los diferentes diagramas.

### Modulación ASK.

La modulación por desplazamiento de amplitud ASK (Amplitude-shift Keying) es la técnica de modulación digital más simple, donde la señal moduladora es digital y la señal portadora es una señal sinusoidal, la cual variar su amplitud según el estado de la señal moduladora, que es un tren de pulsos binarios (ceros y unos).

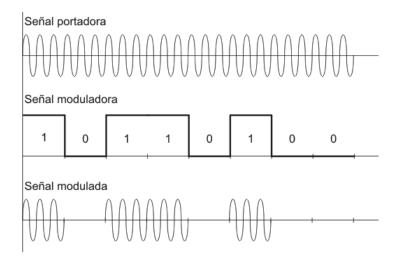


Figura 3.77. Modulación ASK.

Fuente: (JÓSE LEMOS, 2008).

Como se ilustra en la Figura 3.77 la amplitud de la señal portadora varía según el estado significativo de la señal moduladora, es decir, un "1" binario se representa mediante la presencia de la portadora con amplitud constante, y el "0" binario se representa mediante la ausencia de la señal portadora. Partiendo de la ecuación de la modulación ASK tenemos:

$$V(t) = V_p V_m(t) sen(w_c t)$$

V(t) =Señal modulada en amplitud.

 $V_p$  = Amplitud de la portadora.

 $V_m(t)$  = Amplitud de la moduladora.

 $w_c$  = Frecuencia de la señal portadora.

Por lo que la amplitud de la onda modulada va ser:

Si 
$$V_m(t)=1$$
 
$$V(t)=V_p \ sen \ (w_c \ t)$$
 Señal portadora. Pero si  $V_m(t)=0$  Señal de salida igual a 0.

Entonces, la modulación ASK puede ser descrita como la multiplicación de la señal de entrada binaria por la señal de la portadora.

### Ancho de banda de la modulación ASK.

En la modulación ASK el ancho de banda para una transmisión eficiente es el doble del requerido en la transmisión en banda base, y se denota por:

$$B = 2f_b$$
 
$$B = \text{Ancho de banda}.$$
 
$$f_b = \text{Velocidad de trasmisión de los bits}.$$

O también se puede decir que el ancho de banda mínimo depende de la tasa de baudios, a mayor tasa de baudios o símbolos por segundo a la salida del modulador mayor es el ancho de banda. Como se demuestra en la siguiente figura el ancho de banda es igual a la tasa de baudios B = Nbaudios.

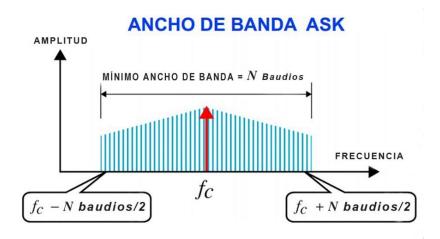


Figura 3.78. Ancho de banda mínimo ASK.

Fuente: (EDISON COIMBRA, 2010).

### Aplicaciones de la modulación ASK.

Las aplicaciones más comunes de ASK son:

- En las transmisiones con fibra óptica, ya que es muy fácil encender y apagar el haz de luz, además la fibra óptica soporta las desventajas de los métodos de modulación de amplitud, por poseer poca atenuación.
- En los radares en el margen de microondas.
- Transmisión por cable transoceánico.

### 3.4.1.1. Modulación ASK, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de modulación ASK es necesario utilizar las siguientes herramientas adicionales a las de configuración.

### MT Generate System Parameters.vi

### samples per symbol (16) M-ASK (2) error in (no error) ASK system parameters bits per symbol error out

Figura 3.79. MT Generate System Parameters.vi.

Calcula los parámetros para su uso en la modulación y demodulación. El sistema de parámetros es devuelto en un clúster, que debe ser conectado a la modulación o demodulación apropiada.

### MT Generate Filter Coefficients.vi

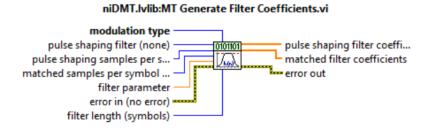


Figura 3.80. MT Generate Filter Coefficients.vi.

Calcula los coeficientes del filtro de conformación de impulsos y filtros adaptados que apliquen la modulación y demodulación digital.

### MT Modulate ASK.vi

# input bit stream ASK system parameters symbol rate (Hz) pulse shaping filter coeffi... error in (no error) reset? (T) flush buffers? (F)

Figura 3.81. MT Modulate ASK.vi.

Recibe una secuencia de bits de datos, lleva a cabo la modulación ASK, y devuelve la forma de onda banda base en el parámetro de forma de onda compleja de salida.

### mod\_Create Tx Sequence.vi

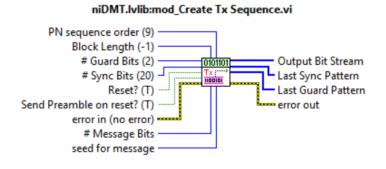


Figura 3.82. mod\_Create Tx Sequence.vi.

Permite crear una secuencia de bits ordenados para poder transmitirlos y luego sincronizarlos con los demás VIs.

### MT Generate Bits (User Defined).vi

## user base bit pattern total bits (128) O101101 output bit stream error in (no error) reset? (T)

Figura 3.83. MT Generate Bits (User Defined).vi.

Genera la secuencia de bits de datos a ser modulada. Este polimórfico VI puede generar secuencias de bits de Fibonacci o Galois pseudonoise (PN). También puede generar secuencias de bits en base a un patrón definido por el usuario. El patrón seleccionado se repite hasta que se genera el número especificado por el usuario de bits totales.

### **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado MODULACIÓN ASK.
- 2. Iniciamos sesión configurando el módulo trasmisor.

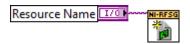


Figura 3.84. Configuración módulo TX.

**3.** Configuramos la frecuencia central y la potencia de la señal portadora; habilitamos la generación IQ indicando al driver la generación de una forma de onda arbitraria.

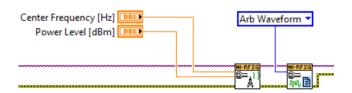


Figura 3.85. Configuración de la señal portadora.

**4.** Utilizamos un *Property node* para establecer y obtener propiedades o parámetros para la modulación.

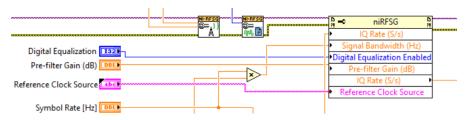


Figura 3.86. Configuración de los parámetros de la portadora.

A cada una de las propiedades le asignamos controles para cambiar las variables pre-establecidas.

5. Creamos tres controles, TX Filter, Alpha, Filter Length, son introducidos en un clúster, estas variables se conectan el un Unbundle By Name, y las salidas se conectan al MT Generate Filter Coefficients.vi, que calcula los parámetros de los filtros para su uso con el MT Modulate ASK.vi.

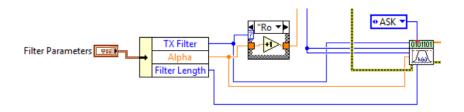


Figura 3.87. Parámetros y coeficientes de filtro para la modulación ASK.

**6.** Se generan los controles para los parámetros de la modulación ASK, cuantos muestras por símbolo y la modulación ASK multinivel que se va a realizar (número de amplitudes de salida) junto con la herramienta *MT Generate System Parameters.vi*.

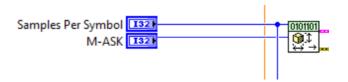


Figura 3.88. Parámetros del sistema para la modulación ASK.

**7.** Para el ancho de banda de la señal modulada se multiplica la tasa de símbolos por el valor del *Alpha* de los coeficientes de los filtros.

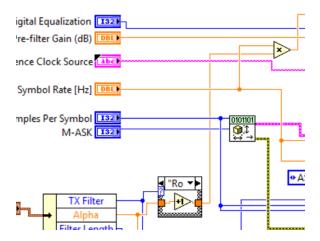


Figura 3.89. Configuración del ancho de banda.

- **8.** Para crear la señal moduladora se da dos opciones utilizando un *Case Structure*, la primera crea una secuencia de bits ordenados según los siguientes parámetros:
  - # Guard Bits: Define el número de bits de guardia que aparecen antes de la secuencia de sincronización.
  - # Sync Bits: Define el número de bits de sincronización que aparecen antes de la secuencia de mensaje.
  - # Message Bits: Define el número de bits del mensaje en la secuencia de bits transmitida.
  - **PN** sequence order: Se utiliza para determinar el período de la secuencia pseudo-aleatoria que se utiliza para generar la secuencia de bits del mensaje.

Estos controles son introducidos en un clúster, las salidas se conectan a un *Unbundle By Name* para poder sacar las variables del clúster, cada salida se conectan al *mod\_Create Tx Sequence.vi*, la salida es la trama de bits que será enviada, esa trama es infinita y hay que limitarla, para ello creamos un sub array que será limitada por los valores constante 16 y 0.

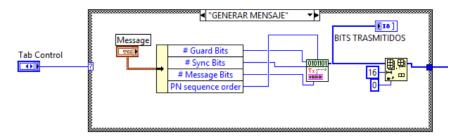


Figura 3.90. Generarción de bits, señal moduladora.

9. Se crea una trama de bits a conveniencia del usuario, el usuario introduce un patrón de bits manualmente, esa trama de bits se introduce en el MT Generate Bits (User Defined).vi que genera la secuencia de bits en base al patrón inicial.

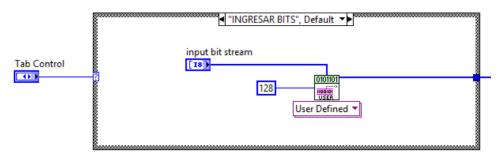


Figura 3.91. Ingresar bits por usuario, señal moduladora.

**10.** Todos los parámetros antes mencionados se conectan al *MT Modulate ASK.vi*, el cual realiza la modulación ASK a partir de esos parámetros.

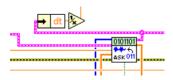


Figura 3.92. Modulación ASK.

11. Para la tasa IQ (IQ Rate S/s) del modular ASK, obtenemos de la señal modulada la variable de tiempo y sacamos el inverso, esa será la frecuencia de la tasa de bits para el transmisor.



Figura 3.93. Tasa de bits para el transmisor.

**12.** Utilizamos *rfsg\_resample and write (complex input).vi* para que vuelva a muestrear la forma de onda compleja con la nueva tasa de bits IQ de la señal modulada.

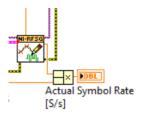


Figura 3.94. Muestreo de la señal con la nueva tasa de bits.

**13.** Con la herramienta *niRFSG Initiate.vi* se inicializa la generación de la señal modulada.



Figura 3.95. Inicializa la generación de la señal.

**14.** Utilizamos la herramienta *niRFSG Check Generator Status.vi* dentro de un *While Loop*, que revisará continuamente el estado de la generación.

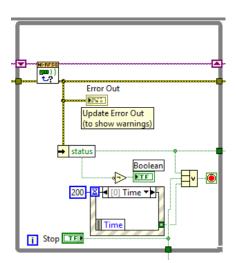


Figura 3.96. Estado de la generación.

**15.** Luego que se trasmite la señal modulada, cerramos la sesión del controlador con las herramientas de configuración.

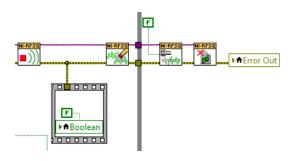


Figura 3.97. Cierre de la generación.

16. Todo el programa utiliza un While Loop para que la generación sea continua.

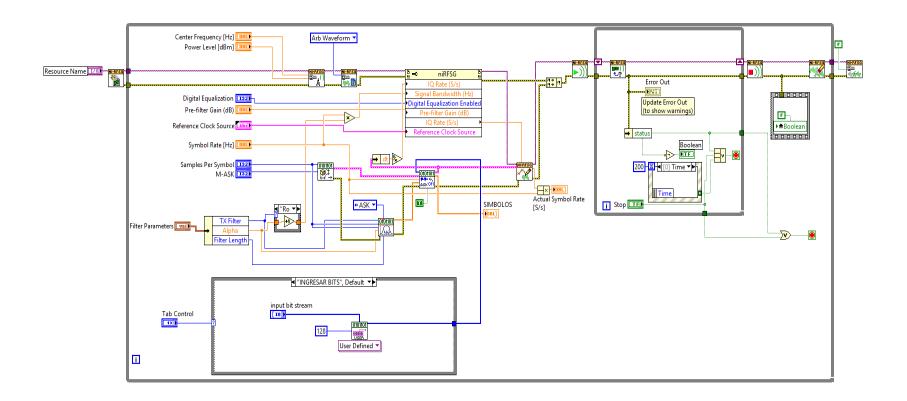


Figura 3.98. Diagrama de bloques Modulación ASK.

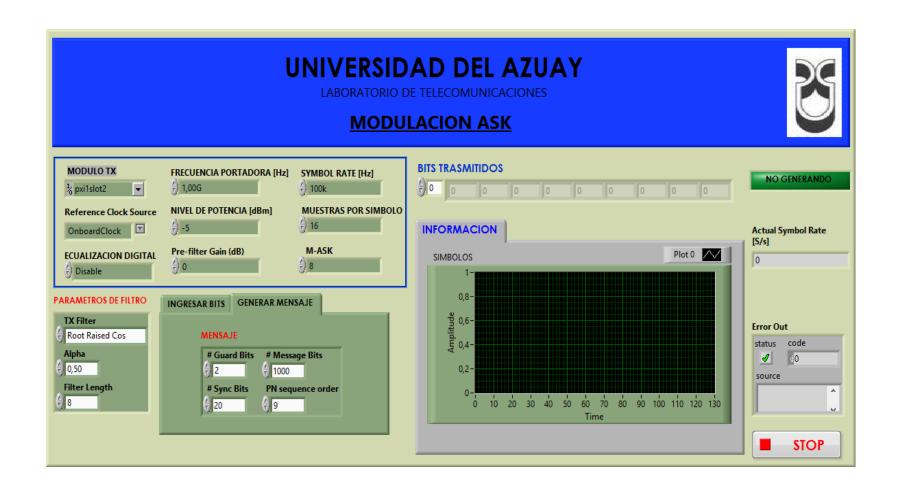


Figura 3.99. Panel Frontal del Modulación ASK.

# 3.4.1.2. Demodulación ASK, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de recepción es necesario utilizar las siguientes herramientas adicionales a las de configuración.

# MT Resample (Complex Cluster).vi

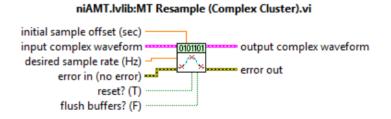


Figura 3.100. MT Resample (Complex Cluster).vi.

El demodulador requiere un número entero de muestras por símbolos, esta herramienta genera una forma de onda de valor complejo y la muestrea en base a los parámetros de entrada que el usuario específica.

# MT Demodulate ASK.vi

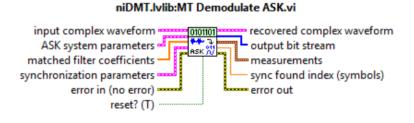


Figura 3.101. MT Demodulate ASK.vi.

Demodula una forma de onda compleja de banda base modulada ASK y devuelve una forma de onda compleja en el tiempo, los bits de información, y las mediciones realizadas durante la demodulación.

# mod\_Check Power Level.vi

#### niAMT.lvlib:mod\_Check Power Level.vi

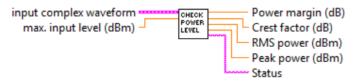


Figura 3.102. mod\_Check Power Level.vi.

Obtiene los parámetros de la señal modulada como potencia, picos etc.

# MT Format Eye Diagram (complex).vi

# niDMT.lvlib:MT Format Eye Diagram (complex).vi

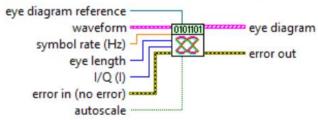


Figura 3.103. MT Format Eye Diagram (complex).vi.

Define una forma de onda compleja o de valor real, lo divide en segmentos, y determina la longitud del segmento en base a los parámetros de velocidad de símbolo y la longitud del diagrama de ojo.

# mod\_Truncate Filter Transient.vi

# input complex waveform output complex waveform samples/symbol filter length (sym)

Figura 3.104. mod\_Truncate Filter Transient.vi.

Introduce los parámetros iniciales de los filtros en la onda demodulada.

# MT Format Constellation.vi

# constellation reference waveform constellation constellation graph samples per symbol autoscale error in (no error)

Figura 3.105. MT Format Constellation.vi.

Prepara una señal para presentarla en un gráfico que muestra las ubicaciones de símbolos detectados y las transiciones entre estos símbolos. El VI define una forma de onda de valor complejo y muestra un diagrama de la constelación.

# MT Measure ASK Quadrature Impairments.vi

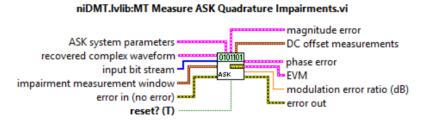


Figura 3.106. MT Measure ASK Quadrature Impairments.vi.

Obtiene las medidas realizadas durante la demodulación de la señal. Las medidas obtenidas son especificadas por el usuario para cada uno de los tipos de modulación.

# VI Server Reference

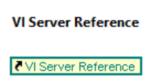


Figura 3.107. VI Server Reference.

Devuelve una referencia a la aplicación actual, con un control o indicador en el VI, o a un panel. Puede utilizar esta referencia para acceder a las propiedades y métodos para el VI, aplicación, control, indicador o panel asociado.

# **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado DEMODULACIÓN ASK.
- 2. Iniciamos sesión configurando el módulo receptor.

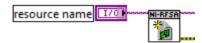


Figura 3.108. Configuramos módulo RX.

**3.** Al igual que en la modulación se generan los controles para los parámetros de la demodulación ASK, cuantos muestras por símbolo y la modulación ASK multinivel que se va a realizar (número de amplitudes de salida), con la herramienta *MT Generate System Parameters.vi*.



Figura 3.109. Parámetros del sistema para la demodulación ASK.

**4.** Configuramos el reloj de referencia para la recepción de la señal.



Figura 3.110. Clock de referencia.

**5.** Para la demodulación de la señal ASK el receptor debe estar configurado en señales IQ, con ayuda del *niRFSA Configure Acquisition Type.vi*.



Figura 3.111. Configuración para la demodulación.

6. Para receptar la señal que deseamos, configuramos la señal portadora en los siguientes parámetros: niRFSA Configure Reference Level.vi configura el nivel de potencia, niRFSA Configure IQ Carrier Frequency.vi configura la frecuencia central, niRFSA Configure IQ Rate.vi especifica los bits a muestrear, niRFSA Configure Number of Samples.vi configura el número de muestras. Además utilizamos un Property node que recupera el nivel de referencia de la señal ya recibida para obtener parámetros de la señal real.

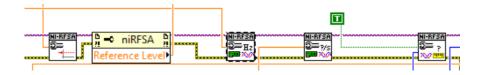


Figura 3.112. Configuración para la adquisición de la señal ASK.

7. A partir de los controles, *TX Filter*, *Alpha*, *Filter Length*, configuramos el número de muestras para el demodulador ASK.

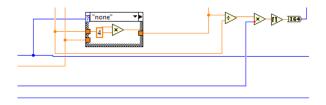


Figura 3.113. Configura el número de muestras.

8. Al igual que en el modulador las salidas de los controles, *TX Filter*, *Alpha*, *Filter Length*, se conectan al *MT Generate Filter Coefficients.vi*, que calcula los parámetros de los filtros para su uso con el *MT Demodulate ASK.vi*.

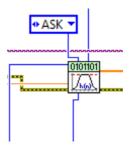


Figura 3.114. Parámetros y coeficientes de filtro para la demodulación ASK.

9. El VI niRFSA Initiate.vi inicia la adquisición de la señal transmitida, junto con el niRFSA Fetch IQ.vi recupera la señal IQ, la misma que es enviada al MT Resample (Complex Cluster).vi donde se vuelve a muestrear la señal regenerando ciertos parámetros de la señal transmitida, antes de ser demodulada.

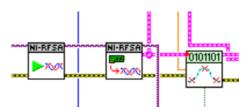


Figura 3.115. Recuperación de la señal IQ.

**10.** En el *MT Demodulate ASK.vi* se realiza la demodulación de la señal reconstruida, obteniendo la trama de bits enviada desde el transmisor.



Figura 3.116. Realiza la demodulación ASK.

**11.** Con la ayuda del *mod\_Check Power Level.vi* se obtiene parámetros de la señal demodulada.

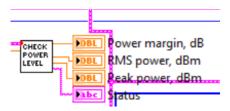


Figura 3.117. Obtiene parámetros de la señal modulada ASK.

12. Se obtiene el diagrama de ojos de la señal demodulada con el *MT Format Eye*Diagram (complex).vi.

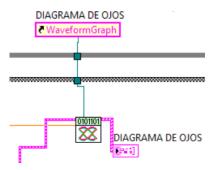


Figura 3.118. Diagrama de ojos ASK.

13. El mod\_Truncate Filter Transient.vi ingresa los parámetros de los filtros iniciales y se obtiene la gráfica de constelación de la señal demodulada con el MT Format Constellation.vi.

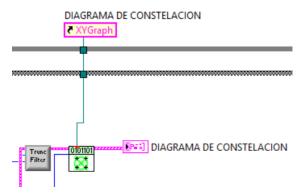


Figura 3.119. Diagrama de constelación ASK.

**14.** Se recuperan los datos más importantes de la señal demodulada (criterio del usuario) con ayuda del *MT Measure ASK Quadrature Impairments.vi*.

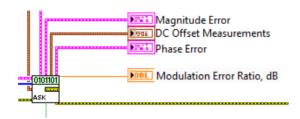


Figura 3.120. Parámetros de la señal demodulada ASK.

**15.** Para la adquisición de la señal espectral se realiza la misma configuración de los demoduladores analógicos descritos en los programas anteriores.

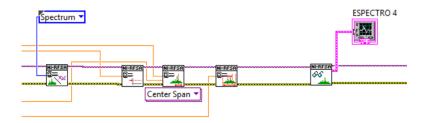


Figura 3.121. Configuración para la adquisición del espectro de la señal ASK.

16. Se aborta la recepción de la señal modulada con ayuda del niRFSA Abort.vi.



Figura 3.122. Detiene la recepción de la señal.

17. Cerramos sección de la adquisición tanto del espectro como de la señal IQ.



Figura 3.123. Cierra la sesión de la adquisición.

**18.** Para cada uno de los parámetros de configuración tanto para el espectro como para las señales IQ se crean controles.

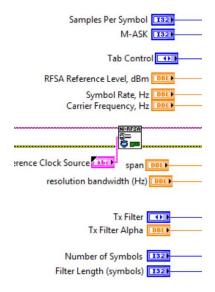


Figura 3.124. Controles de configuración.

**19.** En el programa utilizamos un *While Loop* general para realizar continuamente la recepción. Para la adquisición se utilizó una máquina de 2 estados del espectro y para la señal IQ se utilizó un *Case Structure*, el equipo PXIe-1075 trabaja bien en espectro o en señal IQ pero no con ambas al mismo tiempo.

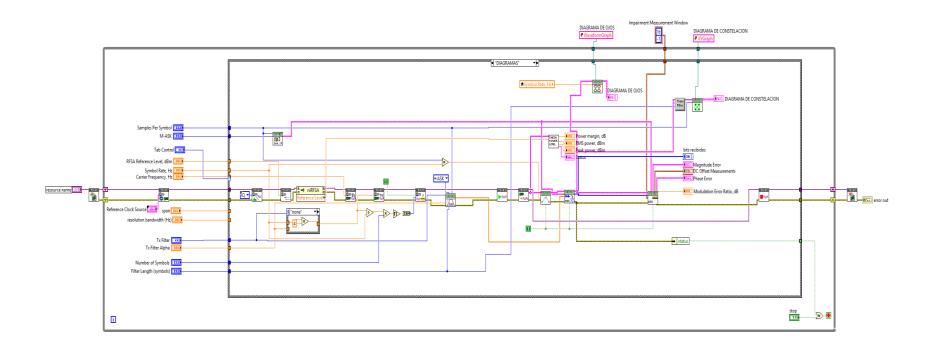


Figura 3.125. Diagrama de bloques Demodulación ASK (Demodulación Caso 1).

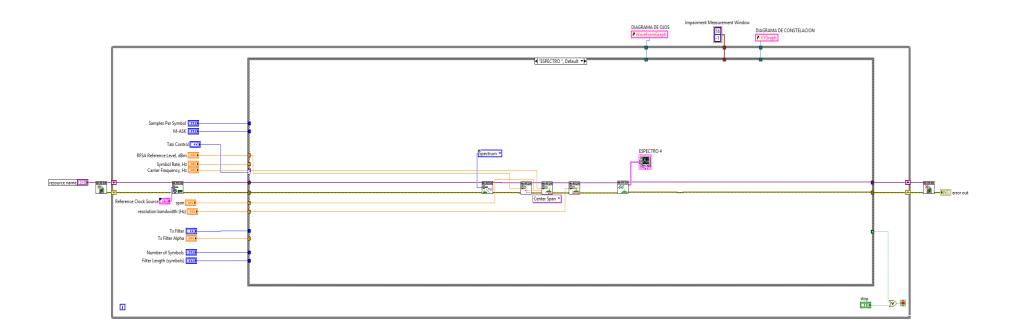


Figura 3.126. Diagrama de bloques, análisis del espectro ASK (Espectro Caso 2).



Figura 3.127. Panel frontal Demodulación ASK.

# 3.4.1.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación ASK.

**a.** Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

**Tabla 3.7.** Antenas utilizadas para comprobación de la modulación ASK.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

**b.** Abrimos los programas de modulación y demodulación ASK, configuramos los siguientes parámetros en el panel frontal y observamos.

# Modulador.

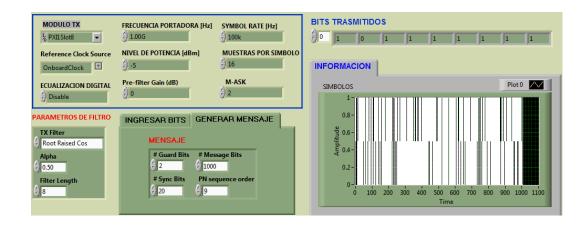
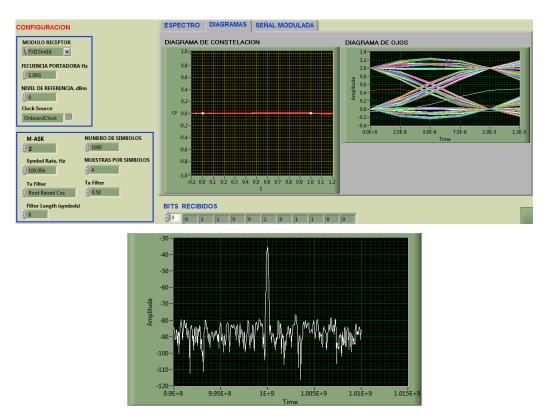


Figura 3.128. Configuración del modulador 2-ASK y bits transmitidos.

# Demodulador.



**Figura 3.129.** Configuración del demodulador, Constelación, diagramas de ojo y espectro de la señal modulada.

Al configurar la señal para 2-ASK se observa la constelación con dos puntos al igual que el diagrama de ojos, por lo que se tiene dos amplitudes de salida diferentes en la modulación.

c. Configuración del modulador y demodulador para 8-ASK.

# Modulador.



Figura 3.130. Configuración del modulador para 8-ASK.

# Demodulador.

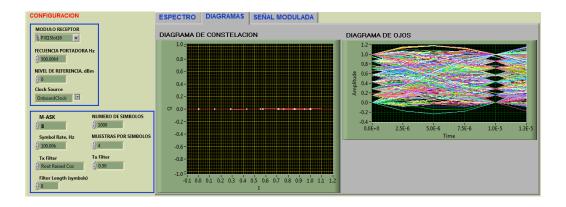


Figura 3.131. Configuración de demodulador, constelación y diagrama de ojo para 8-ASK.

Se observa la constelación con 8 puntos a la misma frecuencia pero a distinto nivel, y el diagrama de ojos de la misma forma, todas las combinaciones de la modulación ASK tiene diferente amplitud.

# Conclusión.

En la modulación ASK al cambiar solo la amplitud de salida se observa los dos niveles de amplitud a la misma frecuencia al trabajar con 2-ASK (Figura 3.129), pero al trabajar con más de 8-ASK los puntos de salida se hacen más cercamos haciéndolo propenso al ruido en la transmisión, como se ilustra en el diagrama de constelación y el de ojo los cruces por cero son más cercanos (Figura 3.131).

# 3.4.1.4. Ejercicios de aplicación de la modulación y demodulación ASK.

1. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla 3.8. Antenas utilizadas para el ejercicio de modulación ASK.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

**2.** Configurar el modulador y demodulador con los siguientes parámetros y observar la constelación y diagramas de ojos, explicar.

# Modulador.

Tabla 3.9. Parámetros para el modulador ASK.

Frecuencia portadora	500MHz
Nivel de potencia	-5
Muestras por símbolo	16
M - ASK	4
Alpha	0.50

# Demodulador.

Tabla 3.10. Parámetros para el demodulador ASK.

Frecuencia portadora	500M
Nivel de referencia	0
M-ASK	4
Muestras por símbolo	4
Tx Filter	0.50

López Navas, Vallejo Lucero

# 3.4.2. PRÁCTICA: MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN FSK.

# **Objetivos:**

- **a.** Profundizar en los conceptos básicos de los esquemas de modulación y demodulación digital por desplazamiento de frecuencia FSK.
- **b.** Ingresar parámetros de valor en los programas desarrollados, con las antenas correspondientes a la frecuencia.
- **c.** Analizar el comportamiento de las señales FSK transmitida en el dominio de la frecuencia.
- **d.** Analizar el comportamiento de las señales ASK recibidas e interpretar los diferentes diagramas.

# Modulación FSK.

La modulación por desplazamiento de frecuencia FSK (Frequency-shift Keying) es una técnica de transmisión digital, donde la señal moduladora o información es un flujo de pulsos binarios que varían entre dos niveles de voltaje discretos (ceros y unos), mientras que la señal portadora es una onda sinusoidal de amplitud constante.

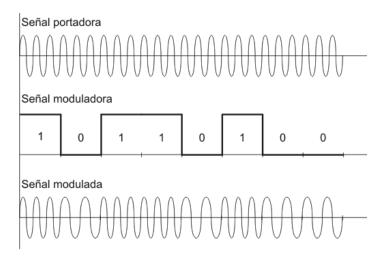


Figura 3.132. Modulación FSK.

Fuente: (JÓSE LEMOS, 2008).

Como se ilustra en la Figura 3.132 la señal moduladora es digital y varía entre ceros y unos, donde un "1" representa "marca" y el "0" representa "espacio", dando lugar a la señal modulada donde la frecuencia varía según el estado de la señal moduladora. Partiendo de la fórmula general de la modulación FSK:

$$V(t) = V_c \cos \left[ \left( w_c + V_m(t) \frac{D_w}{2} \right) t \right]$$

V(t) = Forma de onda FSK binaria.

 $V_c$  = Amplitud pico de la portadora no modulada.

 $w_c$  = Frecuencia de la portadora en radianes.

 $V_m(t)$  = Señal modulante digital binaria.

 $D_w$  = Cambio en frecuencia de salida en radianes.

La variación de la frecuencia de salida de la modulación FSK depende de la amplitud de voltaje binario  $V_m(t)$ , que nos proporciona la polaridad  $\pm$  para el cambio de frecuencia de salida  $(D_w)$ , si se trata de un 1 el estado es positivo y se obtiene  $w_c + D_w$  aumentando la frecuencia de salida, pero si se trata de un 0 se toma como  $w_c - 0$  o  $w_c$ , disminuyendo la frecuencia de salida de la modulación FSK.

# Índice de modulación de FSK.

El índice de modulación FSK es la razón entre la desviación de frecuencia  $(D_f)$  y la frecuencia modulante  $(f_a)$  y se denota por:

$$MI = \frac{D_f}{f_a}$$

MI =Índice de modulación FSK.

 $D_f$  = Desviación de frecuencia (Hz).

 $f_a$  = Frecuencia modulante (Hz).

El índice de modulación no tiene unidades, y se mantiene bajo la unidad produciendo así un espectro de salida de banda relativamente angosta. El peor caso, o el ancho de banda más amplio, ocurre cuando tanto la desviación de frecuencia y la frecuencia

modulante están en sus valores máximos. Por lo tanto el mínimo ancho de banda depende del índice de modulación, para un índice de modulación entre 0.5 y 1, se generan dos o tres conjuntos de frecuencias laterales significativas, el mínimo ancho de banda es dos o tres veces la razón de bit de entrada.

#### Ancho de banda de la modulación FSK.

El cálculo del ancho de banda de la modulación FSK se hace mediante la ecuación:

$$B = 2(D_f + f_b)$$

B =Ancho de banda.

 $D_f$  = Desviación de frecuencia.

 $f_b$  = Frecuencia de la moduladora.

Por lo que el ancho de banda de la modulación FSK depende del índice de modulación teniendo dos casos que son:

# Ancho de banda angosta o reducida.

Si el índice de modulación es pequeño, se da la modulación en banda angosta, la variación de frecuencia de la señal modulada produce una diferencia de fase menor a  $\pi/2$  ( $m_f < \pi/2$ ). La modulación de banda angosta produce un espectro de frecuencia similar a ASK, se diferencia en que la amplitud de las armónicas se ve afectada por la frecuencia, lo que significa que hay una pequeña modulación en amplitud sobrepuesta en FSK. Cuando se trabaja con banda angosta, coincide el ancho de banda necesario para ASK y para FSK.

#### Ancho de banda ancha.

Cuando el índice de modulación es grande, se da la modulación en banda ancha, la variación de frecuencia de la señal modulada produce una diferencia de fase mayor a  $\pi/2$  ( $m_f > \pi/2$ ). En esta condición se ven las ventajas de FSK sobre ASK, aumentando la protección contra el ruido y las interferencias, obteniendo un comportamiento más eficiente que ASK, en este caso la pequeña modulación de amplitud mencionada en el caso anterior de FSK de banda angosta, se hace

despreciable. Como desventaja es necesario un mayor ancho de banda, debido a la mayor cantidad de bandas laterales (un par por cada armónica).

# Aplicación de la modulación FSK.

Se emplean en radiocomunicaciones o estaciones de radiofonía pública y en los sistemas de transmisión de datos y señales digitales.

# 3.4.2.1. Modulación FSK, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de trasmisión es necesario utilizar las siguientes herramientas adicionales a las de configuración y a las estudiadas anteriormente.

# MT Bit Stream to Digital Graph.vi

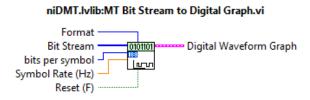


Figura 3.133. MT Bit Stream to Digital Graph.vi.

Cambia de una secuencia de bits a la gráfica de la forma de onda digital, los parámetros fundamentales para la obtención son la tasa de bits y las muestras por símbolo.

# MT Modulate FSK.vi

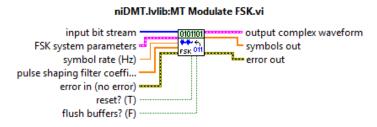


Figura 3.134. MT Modulate FSK.vi.

Recibe una secuencia de bits de datos y realiza la modulación por desplazamiento de frecuencia. Retorna la forma de onda de la modulación compleja de la señal banda base.

# **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado MODULACIÓN FSK.
- 2. En el diagrama de bloques iniciamos sesión configurando el módulo transmisor.

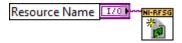


Figura 3.135. Configuración módulo TX.

**3.** Al igual que en la modulación ASK, configuramos la frecuencia central y la potencia de la señal portadora; habilitamos la generación IQ indicando al driver la generación de una forma de onda arbitraria. Utilizamos un *Property node* para establecer y obtener propiedades o parámetros para la modulación.

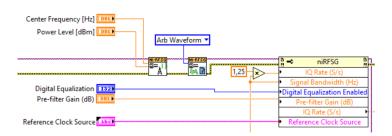


Figura 3.136. Configuración de la señal portadora y sus parámetros.

A cada una de las propiedades le asignamos controles para cambiar las variables pre-establecidas.

**4.** Para la configuración del ancho de banda, se suma la tasa de símbolos más la frecuencia de desviación y se multiplica por dos, con la fórmula  $2(fb+\Delta f)$ .

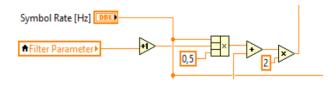


Figura 3.137. Configuración del ancho de banda.

**5.** En la herramienta *MT Generate System Parameters.vi* se cambia el selector polimórfico a FSK, para generar los controles para los parámetros de la modulación FSK, las muestras por símbolo y la modulación M-FSK multinivel que se va a realizar (número de frecuencias de salida). Además la desviación de frecuencia, existe la opción de ingresar en el panel frontal la desviación de frecuencia o el índice de modulación por el usuario.

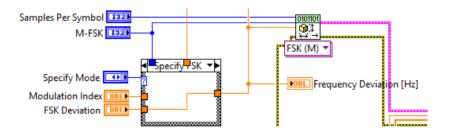


Figura 3.138. Configuración parámetros del sistema FSK.

**6.** Creamos los controles, para el *MT Generate Filter Coefficients.vi*, que calcula los parámetros de los filtros para su uso con el *MT Modulate FSK.vi*.

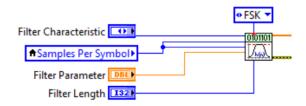


Figura 3.139. Parámetros y coeficientes de los filtros FSK.

7. La trama de bits a transmitir, se genera de la misma forma que en la modulación ASK, más el *MT Bit Stream to Digital Graph.vi*, que transforma la trama de bits a un gráfica digital para ser mostrada.

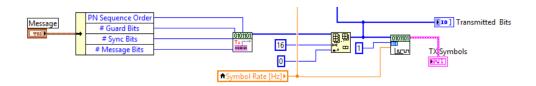


Figura 3.140. Generación de la señal Moduladora.

**8.** A partir de los parámetros antes mencionados, realizamos la modulación por desplazamiento de frecuencia con *MT Modulate FSK.vi*.

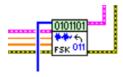


Figura 3.141. Modulación FSK.

**9.** Utilizamos **rfsg\_resample and write** (**complex input**).**vi** para que vuelva a muestrear la forma de onda compleja y con la herramienta *niRFSG Initiate.vi* se inicializa la generación de la señal modulada.

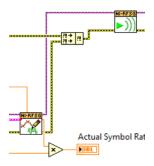


Figura 3.142. Inicializa la generación.

**10.** Utilizamos la herramienta *niRFSG Check Generator Status.vi* dentro de un *While Loop*, que revisará continuamente el estado de la generación.

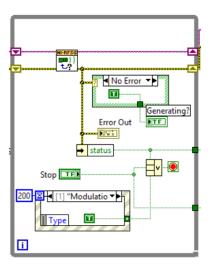


Figura 3.143. Estado de la generación.

**11.** Se transmite la señal modulada, cerramos la sesión del controlador con las herramientas de configuración.

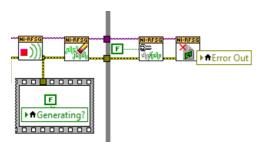


Figura 3.144. Cierre de sesión de la generación.

12. Todo el programa utiliza un While Loop para que la generación sea continua.

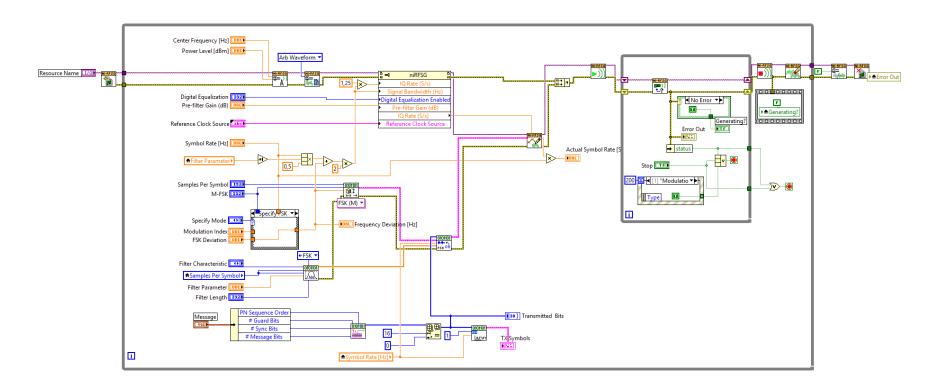


Figura 3.145. Diagrama de bloques Modulación FSK.

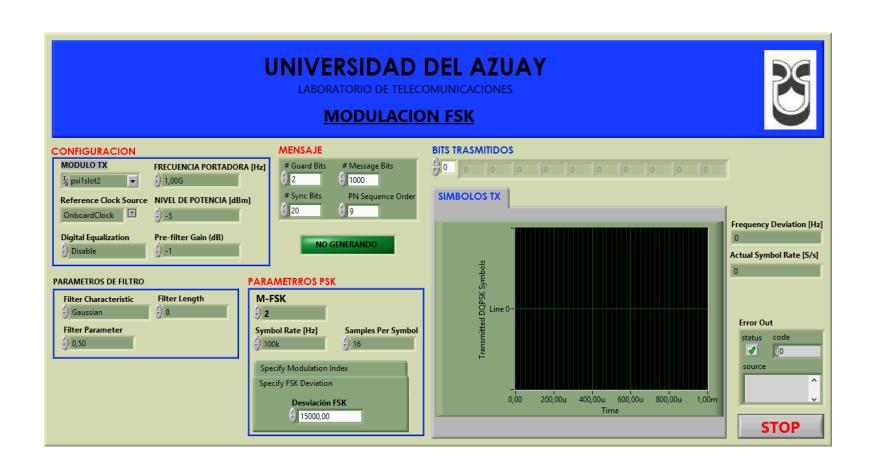


Figura 3.146. Panel frontal Modulación FSK.

# 3.4.2.2. Demodulación FSK, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de recepción es necesario utilizar las siguientes herramientas adicionales a las de configuración y las estudiadas anteriormente.

#### MT Demodulate FSK.vi

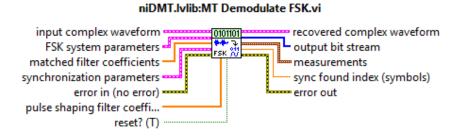


Figura 3.147. MT Demodulate FSK.vi.

Demodula una forma de onda banda base compleja modulada FSK y devuelve la forma de onda en el tiempo, los bits de información y las mediciones realizadas durante la demodulación.

# mod\_FSK Desviation Measurement.vi

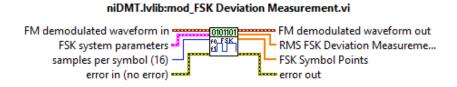


Figura 3.148. mod\_FSK Desviation Measurement.vi.

Se utiliza para obtener las mediciones de las desviaciones altas y bajas de la señal modulada, símbolos FSK según los parámetros del sistema.

# **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado DEMODULACIÓN FSK.
- 2. En el diagrama de bloques iniciamos sesión configurando el módulo receptor.



Figura 3.149. Configuración del módulo RX.

3. Para el demodulador FSK, es necesario generar nuevamente los parámetros del sistema con los elementos esperados como: Número de frecuencias M-FSK, desviación de frecuencia y símbolo de fase. Se utiliza la herramienta MT Generate FSK system parameters.vi.

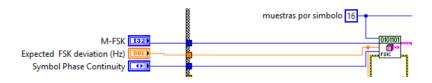


Figura 3.150. Parámetros del sistema para la demodulación FSK.

**4.** Al igual que el demodulador ASK, el receptor debe estar configurado en señales IQ, con ayuda del *niRFSA Configure Acquisition Type.vi* y configuramos los parámetros de la señal portadora con las herramientas de configuración antes descritas.



Figura 3.151. Configuración para la adquisición de la señal IQ.

**5.** Para la configuración del ancho de banda en el demodulador utilizamos la fórmula descrita a continuación.

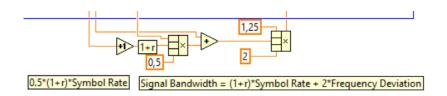


Figura 3.152. Configuración del ancho de banda.

6. Configuramos el número de muestras por recorrido de la señal modulada.

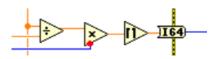


Figura 3.153. Número de muestras.

7. Las salidas de los controles, TX Filter, Alpha, Filter Length, se conectan al MT Generate Filter Coefficients.vi, que calcula los parámetros de los filtros para su uso con el MT Demodulate FSK.vi.

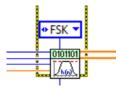


Figura 3.154. Coeficientes de filtros para la demodulación FSK.

8. El VI niRFSA Initiate.vi inicia la adquisición de la señal transmitida, junto con el niRFSA Fetch IQ.vi recupera la señal IQ, la misma que es enviada al MT Resample (Complex Cluster).vi donde se vuelve a muestrear la señal regenerando ciertos parámetros de la señal transmitida, antes de ser demodulada.

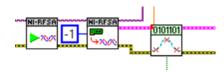


Figura 3.155. Recupera la señal IQ.

**9.** En el *MT Demodulate FSK.vi* se realiza la demodulación de la señal reconstruida, obteniendo la trama de bits enviada desde el transmisor.

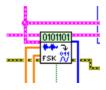


Figura 3.156. Demodulación FSK.

10. El mod\_Truncate Filter Transient.vi ingresa los parámetros de los filtros iniciales y se obtiene el diagrama de ojo de la señal demodulada con el MT Format Eye Diagram (complex).vi, con el mod\_FSK Desviation Measurement.vi se obtiene el valor de la desviación de la frecuencia.

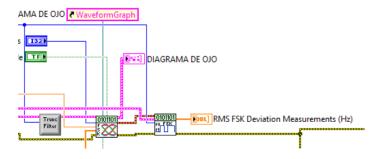


Figura 3.157. Diagrama de ojos de la señal demodulada FSK.

11. Para la adquisición de la señal espectral se realiza la misma configuración de los demoduladores anteriores.

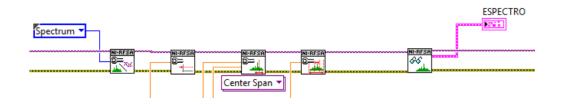


Figura 3.158. Configuración para la adquisición de espectro de la señal FSK.

**12.** Para cada uno de los parámetros de configuración tanto para el espectro como para las señales IQ se crean controles.

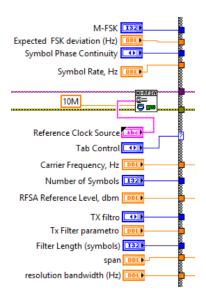


Figura 3.159. Controles de configuración.

**13.** En el programa utilizamos un *While Loop* general para realizar continuamente la recepción. Para la adquisición del espectro y de la señal IQ se utilizó un *Case Structure*, como en los demoduladores anteriores.

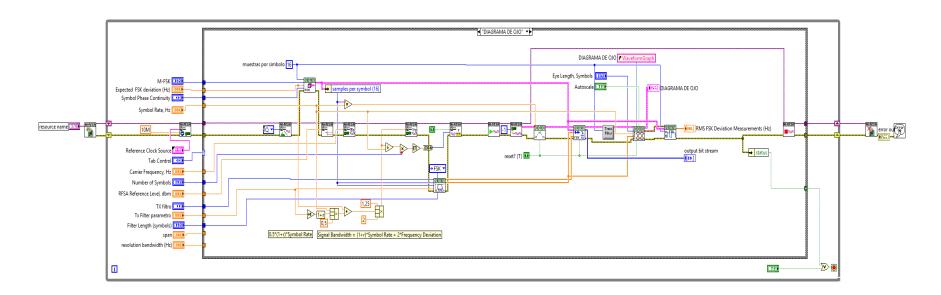


Figura 3.160. Diagrama de bloques Modulación FSK (Diagrama de ojos, Caso 1).

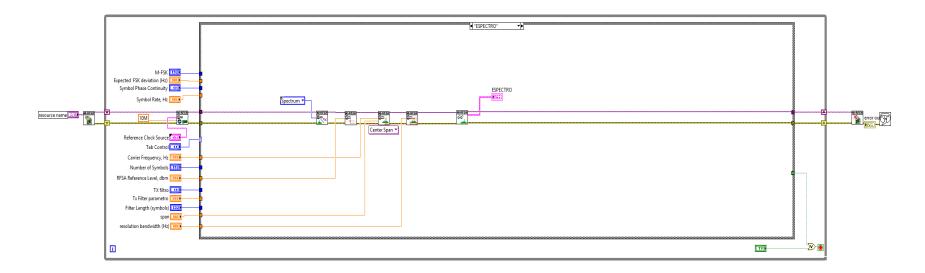


Figura 3.161. Diagrama de bloques, análisis del espectro FSK (Espectro, Caso 2).



Figura 3.162. Panel frontal Demodulación FSK.

# 3.4.2.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación FSK.

a. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla 3.11. Antenas utilizadas para comprobación de la modulación FSK.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
3	UHF	1800 - 1990 MHz	Panel	2

**b.** Abrimos los programas de modulación y demodulación FSK, configuramos los siguientes parámetros en el panel frontal y observamos.

# Modulador.

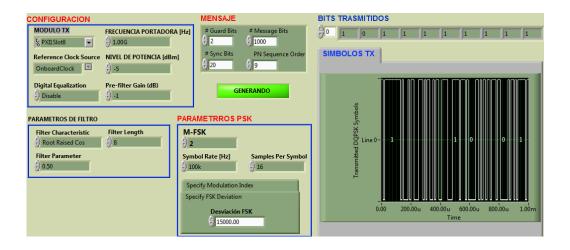
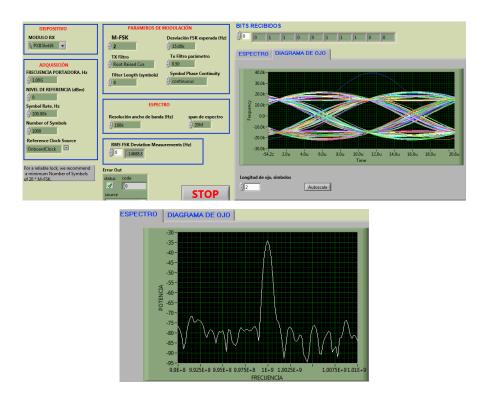


Figura 3.163. Configuración del modulador 2-FSK y bits transmitidos.

# Demodulador.



**Figura 3.164.** Configuración del demodulador, diagramas de ojo y espectro de la señal demodulada FSK.

c. Configuración del modulador y demodulador para 4-FSK.

# Modulador.

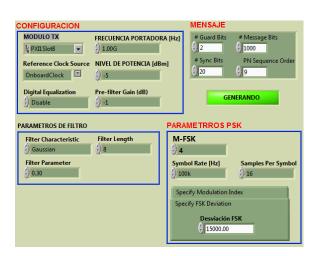


Figura 3.165. Configuración del modulador para 4-FSK.

#### Demodulador.

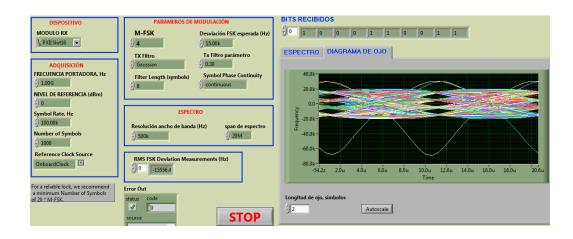


Figura 3.166. Configuración del demodulador y diagrama de ojo para 4-FSK.

#### Conclusión.

En la modulación FSK solo se puede observar el diagrama de ojo, en la Figura 3.164 representa la configuración de 2-FSK mostrando un diagrama sin distorsión entre los cruces por cero, sin embargo, al transmitir más de 2-FSK se produce la distorsión de los sistemas y de la combinación de bit, haciéndolo más propenso a interferencias, por lo que, en la modulación 4-FSK aparecen líneas de ruido Figura 3.166.

# 3.4.2.4. Ejercicios de aplicación de la modulación FSK.

1. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

**Tabla 3.12.** Antenas utilizadas para el ejercicio FSK.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

**2.** Configurar el modulador y demodulador con los siguientes parámetros, observar la constelación, diagramas de ojo y explicar.

# Modulador.

Tabla 3.13. Parámetros para el modulador FSK.

Frecuencia Portadora	500M
Nivel de potencia	-5
M-FSK	4
Samples per Symbol	16
Desviación FSK	15000

# Demodulador.

Tabla 3.14. Parámetros para el demodulador FSK.

Frecuencia portadora	500M
Nivel de potencia	0
M-FSK	4
Tx Filter Parámetro	0.50
Desviación FSK esperada	15000

López Navas, Vallejo Lucero

# 3.4.3. PRÁCTICA: MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN PSK.

# **Objetivos:**

- **a.** Profundizar los conceptos básicos de los esquemas de modulación y demodulación digital por desplazamiento de fase PSK.
- **b.** Ingresar parámetros de valor en los programas desarrollados, con las antenas correspondientes a la frecuencia.
- **c.** Analizar el comportamiento de las señales PSK transmitidas en el dominio de la frecuencia.
- **d.** Analizar el comportamiento de las señales PSK recibidas e interpretar los diferentes diagramas.

# Modulación PSK.

La modulación por desplazamiento de fase PSK (Phase shift keying), es una técnica de modulación digital, la moduladora es una señal digital binaria, mientras que la señal portadora es una onda senoidal que varía su fase según el cambio de estado de la señal moduladora.

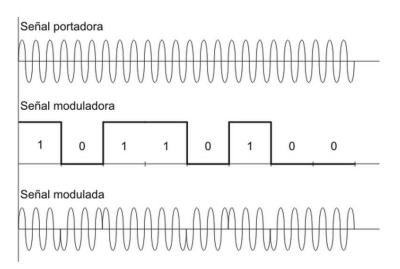


Figura 3.167. Modulación PSK.

Fuente: (JÓSE LEMOS, 2008).

Como se ilustra en la Figura 3.167 la fase de la señal portadora varía según el estado lógico de la señal moduladora, es decir, conforme la señal digital de entrada cambia de estado se representa dos fases de salida, una fase de salida representa un "1" lógico y la otra un "0" lógico, la fase de la portadora de salida se desplaza entre dos ángulos que están 180 grados fuera de fase y su amplitud se mantiene constante. Matemáticamente la modulación PSK está dada por:

$$V(t) = V_p V_m(t) \cos(w_c t)$$
  
 $V(t) = \text{Se} \| \mathbf{a} \|$  modulada.  
 $V_p = \text{Amplitud de la portadora.}$ 

 $V_m(t)$  = Amplitud de la Moduladora.

 $w_c$  = Frecuencia de la señal portadora.

La amplitud de la señal moduladora está dado por:

$$V(t) = \begin{cases} +1 \ para \ un \ "1" \ binario \\ -1 \ para \ un \ "0" \ binario \end{cases}$$

Cuando 
$$V(t) = +1$$
 
$$V(t) = +V_p \cos(w_c t)$$
 Señal portadora de entrada.

Así para la combinación de entrada de dos bits (ceros y unos) se dan solo dos fases de salida desfasadas entre si 180 grados.

## Ancho de Banda de la modulación PSK.

El ancho de banda mínimo requerido por la modulación PSK es el mismo que el de la modulación ASK por lo que se describe con:

163

$$B = NBaudios$$

B =Ancho de banda.

NBaudios = Tasa de baudios.

Como la tasa de baudios es la misma que la tasa de bits podemos encontrar que el ancho de banda necesario es:

$$B = f_b$$

B =Ancho de banda.

 $f_b = \text{Tasa de bits.}$ 

O también como:

$$f_b = \frac{1}{t_b}$$

Tenemos que el ancho de banda es:  $B = \frac{1}{t_h}$ 

B =Ancho de banda.

 $t_b$  = Tiempo de duración de un bit.

# Velocidad de transmisión de la modulación PSK.

La velocidad de transmisión de datos está dado por la ecuación:

$$V = B \log_2 N$$

V =Velocidad de transmisión.

B = Ancho de banda para la transmisión.

N = Número de fases de salida.

Como se demuestra en la ecuación de la modulación PSK el número de fases de salida es limitado por la entrada binaria y el ancho de banda depende de la combinación de bits de entrada, sin embargo la velocidad de trasmisión de datos siempre se mantiene constante, así se realice la modulación PSK multinivel o M-PSK.

#### Modulación M-PSK (Multi-PSK).

Una ventaja de la modulación PSK es enviar más de un bit de información mediante un solo cambio de nivel de la señal portadora, teniendo más de dos fases de salida. El número de fases de salida viene dado por la combinación de bits de entrada en la modulación, denotado por:

$$2^n = M$$

n =Combinación de bits.

M = Número de fases de salida de la portadora.

Las fases de salida en la señal portadora están separadas entre sí por un ángulo definido como:

$$\theta = \frac{2\pi}{M}$$

 $\theta$  = Ángulo de separación en la portadora.

Al ser la señal moduladora o información una trama de bits, solo se tiene ceros y unos, y podemos enviar dos unidades de información (dos bits), mediante un solo cambio de nivel de la señal portadora, por lo que se puede tener las siguientes combinaciones posibles:

Lo que nos da 4 faces de salida por la fórmula anterior y cada una estará desfasada 90 grados o  $\pi/2$  radianes como se ilustra en la siguiente figura.

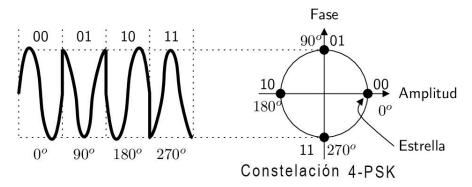


Figura 3.168. Modulación 4-PSK o QPSK.

Fuente: (VICENTE GONZÁLEZ RUIZ, 2013).

En el caso anterior se enviaron dos bits de información a los cuales se los denomina dibits. En forma similar se puede obtener tribits, cuadribits, etc.

#### Ancho de banda de M-PSK.

El ancho de banda de la modulación multi-nivel depende de la combinación de bits de entrada, a mayor número de bits menor es el ancho de banda necesario para la transmisión de los datos. Ya que si recordamos el ancho de banda para bits unitarios es:

$$B = \frac{1}{t_b}$$

Para mandar una combinación de dibits el tiempo de duración es el doble:

$$dibits = 2 bits$$

Por lo tanto el tiempo se duplica:

$$Bdibits = \frac{1}{2t_b}$$

Y el ancho de banda de transmisión de dibits es igual a:

$$Bdibits = \frac{B}{2}$$

Bdibits = Ancho de banda dibits (2 bits)

B = Ancho de banda para bits individuales.

Lo que demuestra que el ancho de banda se reduce a la mitad cuando se hace una combinación de dibits, pero la velocidad de transmisión es la misma, lo que hace que aumente la probabilidad de interferencias en el medio. Esto se debe a que se mandan más datos a la misma velocidad de transmisión.

$$V = B \log_2 N$$

De la fórmula de la velocidad de transmisión notamos que depende del ancho de banda y del número de fases de salida, por lo que se compense la fórmula, si se reduce el ancho de banda, el número de fases de salida aumenta, y la velocidad no varía al mandar más bits en una misma fase.

**NOTA:** Si se desea transmitir 4-PSK con la misma tasa de error que en 2-PSK, se debe aumentar en 3dB la relación señal ruido.

En la siguiente tabla se muestra las combinaciones de bits más comunes en la modulación multinivel M-PSK y sus anchos de banda necesarios.

Tabla 3.15. Ancho de banda para M-PSK.

Modulación M-PSK					
Fases de salida	Combinación de	Ancho de banda			
de M-PSK	bits de entrada (n)	necesario			
2PSK o BPSK	1 bit	$f_b$			
4PSK o QPSK	2 bits	$f_b/2$			
8-PSK	3 bits	$f_b/3$			
16-PSK	4 bits	$f_b/4$			

### Aplicaciones de la modulación PSK.

La modulación PSK es muy utilizada en varios medios ya que la potencia de la fuente es constante, lo que simplifica el diseño de amplificadores y etapas receptores reduciendo costos, haciendo eficiente la transmisión de datos binarios.

Las aplicaciones más destacadas son:

- En las redes LAN inalámbricas de los estándares de la IEEE 802.11b.
- La modulación QPSK se usa en la transmisión de datos por satélite, para enviar señales de video HD.
- La modulación BPSK sirve para la transmisión de señales de televisión de alta definición HDTV y para comunicaciones por radio.
- También es usado para transmisores de bajo costo y bajas velocidades.

# 3.4.3.1. Modulación PSK, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de modulación PSK es necesario utilizar la siguiente herramienta adicional a las de configuración y las estudiadas anteriormente.

# mod\_PSK Transmitter.vi

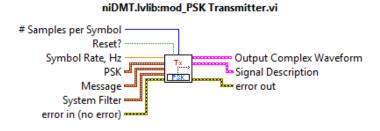


Figura 3.169. mod\_PSK Transmitter.vi.

Este subVI permite la generación de una señal modulada PSK. Se debe especificar mediante clúster las características de: mensaje, filtro del sistema y parámetros PSK. Devuelve la forma de onda compleja modulada.

#### **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado MODULACIÓN PSK.
- 2. En el diagrama de bloques iniciamos sesión configurando el módulo transmisor.

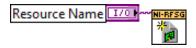


Figura 3.170. Configuración del módulo TX.

3. Configuramos la frecuencia central y la potencia de la señal portadora; habilitamos la generación IQ indicando al driver la generación de una forma de onda arbitraria. Utilizamos un *Property node* para establecer y obtener propiedades o parámetros para la modulación.

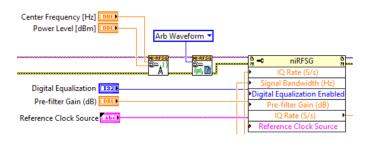


Figura 3.171. Configuración de la señal portadora y sus parámetros.

**4.** Para configurar el ancho de banda se multiplica en valor de Alpha del filtro por la Tasa de símbolos a transmitir.

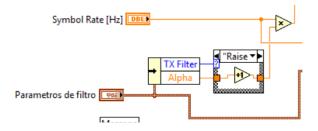


Figura 3.172. Ancho de banda de la señal PSK.

5. En este caso el subVI mod\_PSK Trasnmitter.vi ya contiene las herramientas: MT Generate system parameters.vi, mod\_Create Tx sequence.vi, MT Generate filter coefficients.vi y MT Modulate PSK.vi. Entonces, creamos un clúster de Mensaje, Parámetros de filtro y PSK parámetros, que contengan los elementos de cada herramienta. El subVI recibe cada clúster y realiza la modulación de la señal PSK con los parámetros ingresados.

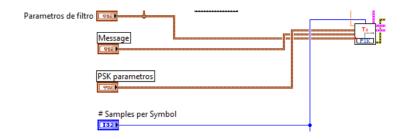


Figura 3.173. Parámetros para la modulación PSK de la señal.

Además, se debe agregar la tasa de bits (symbol rate) y número de muestras por símbolo (# samples per symbol).

**6.** Como en la modulación ASK, obtenemos la tasa de bits, y con ayuda del *rfsg\_resample and write* (*complex input*).*vi*, muestreamos la forma de onda compleja con la nueva tasa de bits IQ de la señal modulada.

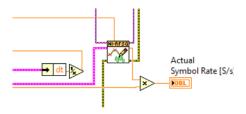


Figura 3.174. Reconstrucción de la señal PSK modulada con la nueva tasa IQ.

**7.** El subVI nos devuelve la información o descripción de la señal, extraemos los bits que contiene la información con ayuda de un *Unbundle By Name* e indicamos y graficamos con la herramienta *MT Bit Stream to Digital Graph.vi*.

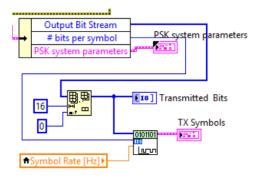


Figura 3.175. Gráfica de los bits a transmitir.

8. Graficamos el diagrama de constelación de la señal modulada.

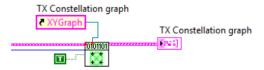


Figura 3.176. Constelación de la señal modulada.

**9.** Con la herramienta *niRFSG Initiate.vi* se inicializa la generación, chequeamos continuamente el estado de la generación y cerramos los controladores de la generación de la señal PSK, como en los programas anteriores.

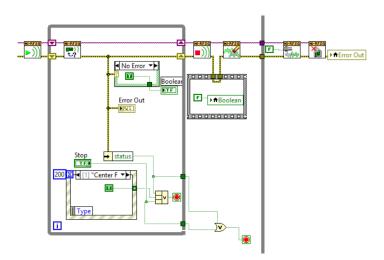


Figura 3.177. Generación, estado de generación y cierre de la sesión.

10. Todo el programa utiliza un While Loop para que la generación sea continua.

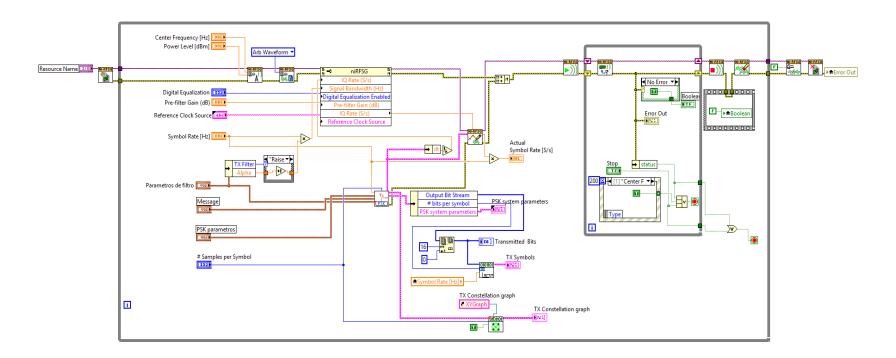


Figura 3.178. Diagrama de bloques Modulación PSK.

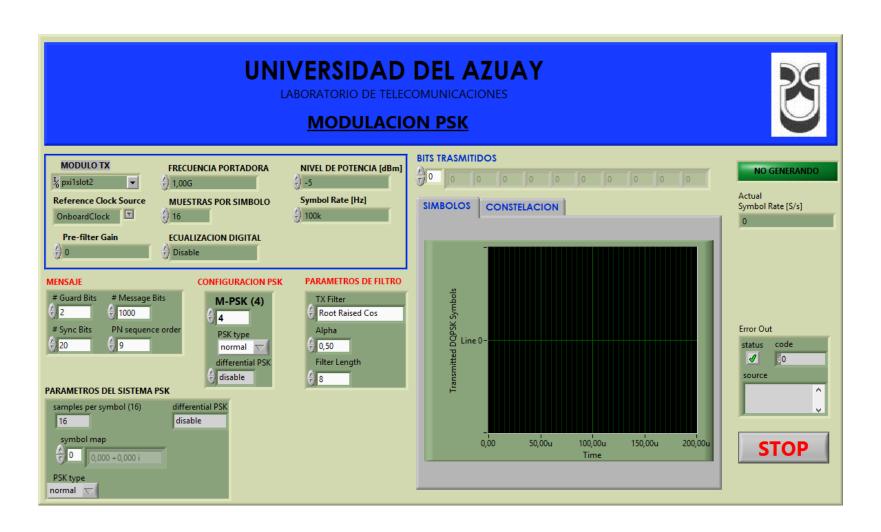


Figura 3.179. Panel frontal Modulación PSK.

# 3.4.3.2. Demodulación PSK, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de recepción es necesario utilizar la siguiente herramienta adicional a las de configuración y las estudiadas anteriormente.

#### MT Demodulate PSK.vi

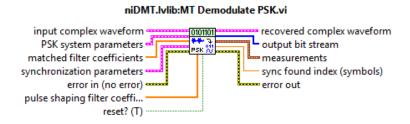


Figura 3.180. MT Demodulate PSK.vi.

Demodula una forma de onda compleja banda base modulada PSK. Devuelve el sobre muestreo de la forma de onda compleja, el flujo de bit del mensaje y las mediciones realizadas durante la demodulación.

## **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado DEMODULACIÓN PSK.
- 2. En el diagrama de bloques iniciamos sesión configurando el módulo receptor.



Figura 3.181. Configuración del módulo RX.

3. Se generan los parámetros del sistema con el *MT Generate FSK system* parameters.vi, como en los demoduladores anteriores.

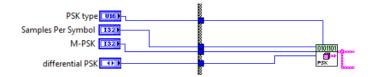


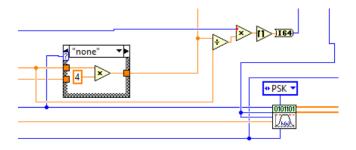
Figura 3.182. Parámetros del sistema PSK para la demodulación.

**4.** Configuramos el reloj de referencia para la recepción de la señal, y al igual que en los demoduladores anteriores, el receptor debe estar configurado en señales IQ, con ayuda del *niRFSA Configure Acquisition Type.vi* y configuramos los parámetros de la señal portadora con las herramientas de configuración.



Figura 3.183. Configuración para la adquisición de la señal IQ.

5. Como en el demodulador ASK, a partir de los controles, TX Filter, Alpha, Filter Length, configuramos el número de muestras para el demodulador PSK, y las mismas variables se conectan al MT Generate Filter Coefficients.vi, que calcula los parámetros de los filtros para su uso con el MT Demodulate PSK.vi.



**Figura 3.184.** Número de muestras y coeficientes de los filtros.

6. El VI niRFSA Initiate.vi inicia la adquisición de la señal transmitida, junto con el niRFSA Fetch IQ.vi recupera la señal IQ, la misma que es enviada al MT Resample (Complex Cluster).vi donde se vuelve a muestrear la señal regenerando ciertos parámetros de la señal transmitida, antes de ser demodulada.

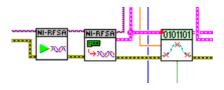


Figura 3.185. Recuperación de la señal IQ.

**7.** En el *MT Demodulate PSK.vi* se realiza la demodulación de la señal reconstruida, obteniendo la trama de bits enviada desde el trasmisor.



Figura 3.186. Demodulación PSK.

**8.** Con la ayuda del *mod\_Check Power Level.vi* se obtiene parámetros de la señal modulada.

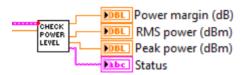


Figura 3.187. Parámetros y medidas de la señal modulada recibida.

**9.** Se recuperan los datos más importantes de la señal demodulada (criterio del usuario) con ayuda del *MT Measure PSK Quadrature Impairments.vi*.

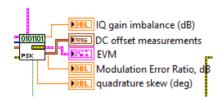


Figura 3.188. Parámetros y medidas de la señal demodulada.

10. El mod\_Truncate Filter Transient.vi ingresa los parámetros de los filtros iniciales y se obtiene la gráfica de constelación y diagrama de ojo de la señal demodulada con el MT Format Constellation.vi y el MT Format Eye Diagram (complex).vi.

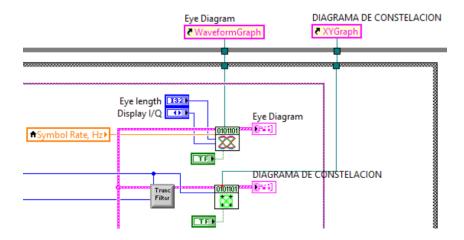


Figura 3.189. Diagrama de ojo y constelación PSK.

**11.** Para la adquisición de la señal espectral se realiza la misma configuración de los demoduladores descritos en los programas anteriores.

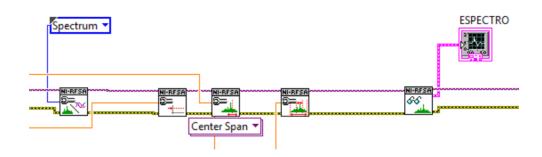


Figura 3.190. Configuración para la adquisición del espectro de la señal PSK.

**12.** Para cada uno de los parámetros de configuración tanto para el espectro como para las señales IQ se crean controles.

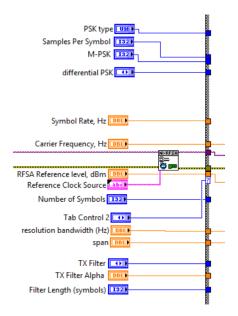


Figura 3.191. Controles de configuración.

**13.** En el programa utilizamos un *While Loop* general para realizar continuamente la recepción. Para la adquisición del espectro y de la señal IQ se utilizó un *Case Structure*, el equipo PXIe-1075 trabaja bien en espectro o en señal IQ pero no con ambas al mismo tiempo.

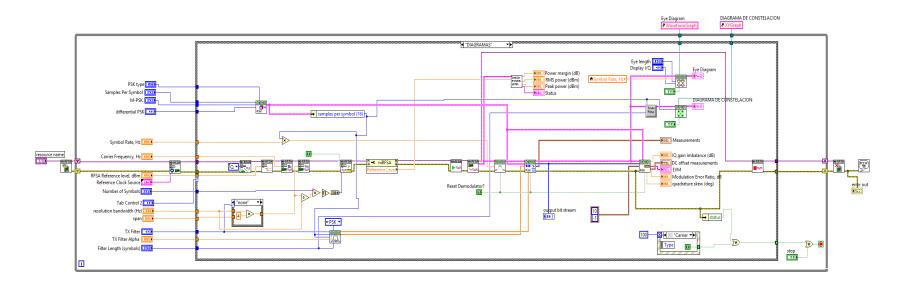


Figura 3.192. Diagrama de bloques Demodulación PSK (Diagramas, Caso 1).

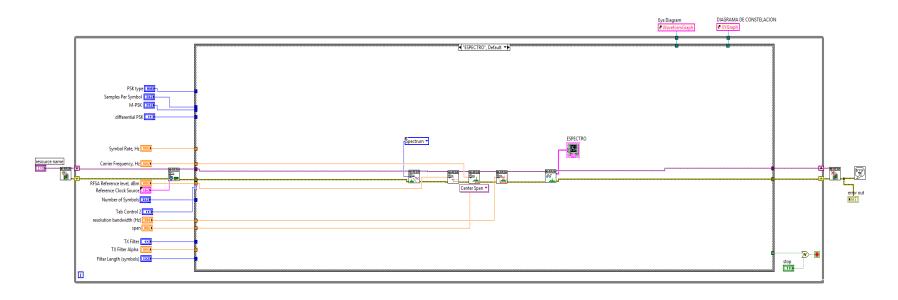


Figura 3.193. Diagrama de bloques, análisis del espectro PSK (Espectro, Caso 2).

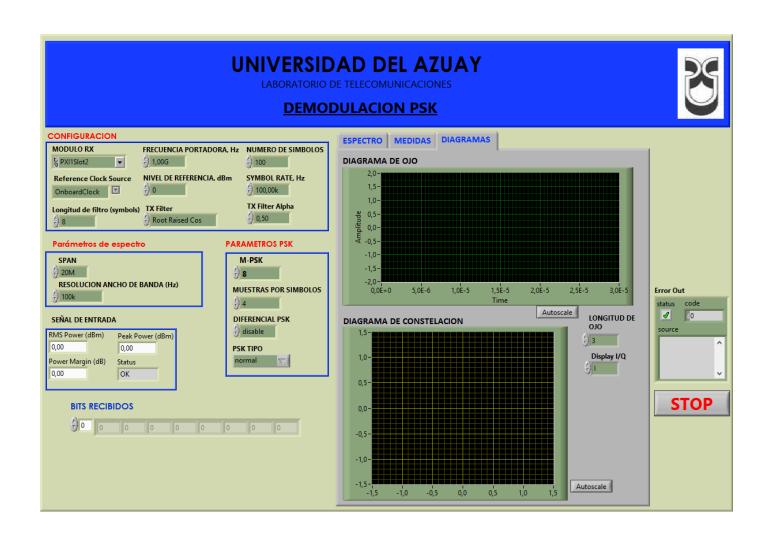


Figura 3.194. Panel frontal Demodulación PSK.

# 3.4.3.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación PSK.

a. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla 3.16. Antenas utilizadas para comprobación de la modulación PSK.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
3	UHF	1800 - 1990 MHz	Yagi	2

**b.** Abrimos los programas de modulación y demodulación PSK, configuramos los siguientes parámetros en el panel frontal y observamos.

# Modulador.

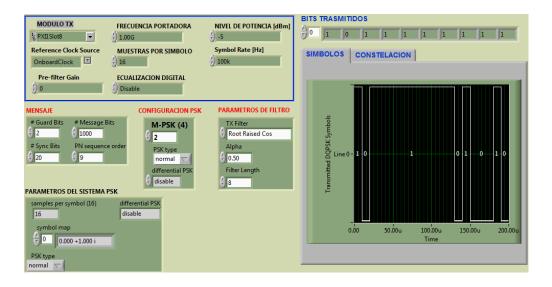
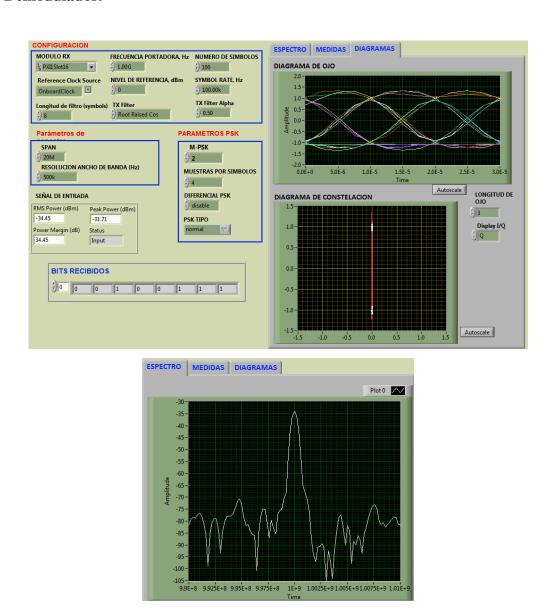


Figura 3.195. Configuración del modulador 2-PSK y bits transmitidos.

# Demodulador.



**Figura 3.196.** Configuración del demodulador, constelación, diagramas de ojo y espectro de la señal demodulada 2-PSK.

En el demodulador se ve, en la constelación, como los dos puntos de las fases de salida están desfasadas 180 grados por la modulación PSK.

**c.** Configuración del modulador y demodulador para 4-PSK.

# Modulador.

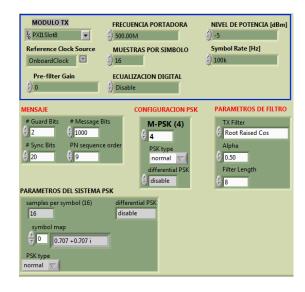


Figura 3.197. Configuración del modulador para 4-PSK.

# Demodulador.

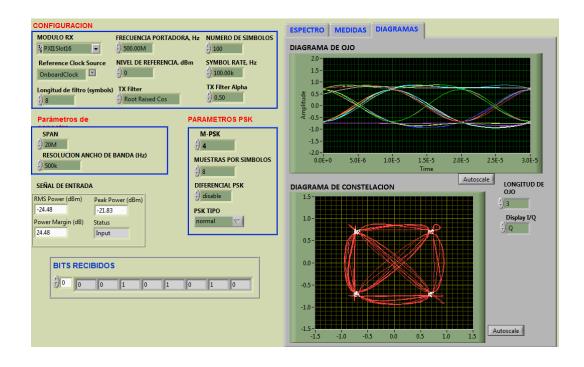


Figura 3.198. Configuración, constelación y diagrama de ojo para 4-PSK.

En la constelación se observa las 4 fases de salida de la modulación 4-PSK, pero todas están a la misma amplitud.

#### Conclusión.

En el diagrama de constelación de la modulación PSK se observa claramente el desfase de las salidas, en la figura 3.196 al ser 2-PSK solo tiene dos puntos de salida desfasados 180 grados entre ellos, pero en la configuración de 4-PSK se distinguen los 4 puntos de salida desfasados ente ellos 90 grados pero todos a la misma amplitud, esto lo hace ideal hasta una configuración de 8-PSK. Para un M > 8, los puntos de salida se mantienen muy unidos haciéndolo más propenso al ruido.

# 3.4.3.4. Ejercicios de aplicación de la modulación PSK.

1. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla 3.17. Antenas utilizadas para el ejercicio PSK.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

**2.** Configurar el modulador y demodulador con los siguientes parámetros, explicar los resultados.

#### Modulador.

**Tabla 3.18.** Parámetros para el modulador PSK.

Frecuencia portadora	500MHz
Muestras por símbolo	16
Nivel de potencia	-5
M-PSK	8
Alpha	0.50

#### Demodulador.

Tabla 3.19. Parámetros para el demodulador PSK.

Frecuencia de la portadora	500M
Nivel de referencia	0
Tx filter Alpha	0.50
M-PSK	8
Muestras por símbolo	4

# 3.4.4. PRÁCTICA: MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN QAM. Objetivos:

- **a.** Profundizar conceptos básicos de los esquemas de modulación y demodulación digital por amplitud de cuadratura QAM.
- **b.** Ingresar parámetros de valor en los programas desarrollados, con las antenas correspondientes a la frecuencia.
- **c.** Analizar el comportamiento de las señales QAM trasmitidas en el dominio de la frecuencia.
- **d.** Analizar el comportamiento de las señales QAM recibidas e interpretar los diferentes diagramas.

# Modulación QAM.

La modulación de amplitud en cuadratura QAM (Quadrature Amplitude Modulation), es una forma de modulación digital, en donde la señal moduladora es una trama de bits y está contenida, tanto en la amplitud como en la fase de la señal portadora transmitida. Esta técnica de modulación es la combinación de la modulación en amplitud (ASK) y la modulación en fase (PSK), por lo que es una modulación lineal que consiste en modular en doble banda lateral dos portadoras de la misma frecuencia desfasadas 90 grados, favoreciendo el aprovechamiento del ancho de banda disponible.

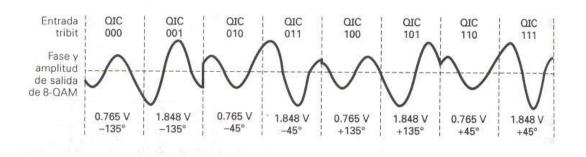


Figura 3.199. Modulación 8-QAM.

Fuente: (DANNY CH, 2013).

Como se muestra en la figura anterior la entrada es un flujo de bits agrupados de tres en tres, entonces tenemos 8 diferentes salidas desfasadas tanto en amplitud como en fase. El número de salidas depende de la combinación de bit de entrada, tal como en la modulación M-PSK, y se puede calcular de la siguiente manera:

$$2^n = M$$

n =Combinación de bits.

M = Número de fases y amplitudes de salida de la portadora.

El funcionamiento de esta modulación consiste en modular por desplazamiento de amplitud (ASK) de forma independiente, dos señales portadoras que tienen las misma frecuencia pero estan desfasadas entre si 90 grados. La señal modulada QAM es el resultado de sumar ambas señales ASK. Estas pueden operar por el mismo canal sin interferencia mutua porque sus portadoras al tener tal desfase, se dice que están en cuadratura. La fórmula general de la modulación QAM es:

$$V_{OAM}(t) = An\cos(wt) + Bn sen(wt)$$

 $V_{OAM}(t)$  = Señal modulada QAM.

An y Bn = Amplitudes de las portadoras desfasadas.

# Diagrama de constelación.

La ventaja de la modulación QAM multinivel es que al ser una modulación tanto en amplitud como en fase se tiene la distribución de puntos de información de manera más estratégica, la inmunidad que tiene la señal modulada en cuanto a las perturbaciones y al ruido de la línea, es mayor cuando más separados estén los puntos del diagrama de estados. Se trata pues de buscar una constelación de puntos con una coordenada de amplitud y fase que haga máxima la separación entre ellos.

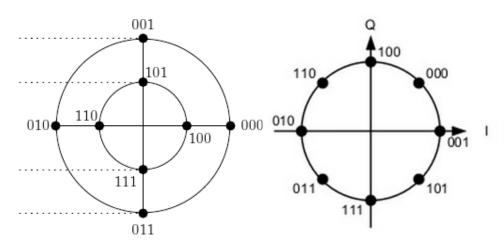


Figura 3.200a. 8-QAM.

Figura 3.200b. 8-PSK.

Fuente: (VICENTE GONZÁLEZ RUIZ, 2013).

Como se observa la constelación de 8-PSK, la distribución de los puntos está a la misma amplitud, y la separación entre ellos es más pequeña al aumentar el número de fases de salida. Sin embargo en la constelación de 8-QAM, al ser una modulación tanto en amplitud y fase, la distribución de los puntos es más evidente, que lo hace más inmune a interferencias y ruido.

# Ancho de banda.

El ancho de banda necesario para la modulación QAM es la misma que el de la modulación M-PSK, por lo que el ancho de banda disminuye al aumentar el número de fases de salida y se calcula de la misma forma. Al depender de la combinación de bits de entrada, a mayor número de bits menor es el ancho de banda necesario para la transmisión de los datos, la fórmula general para encontrar el ancho de banda es:

$$B = \frac{f_b}{n}$$

 $f_b$  = Tasa de bits de entrada.

n =Combinación de bits de entrada.

Al igual que en la modulación M-PSK el ancho de banda se reduce a la mitad cuando se hace una combinación de dibits como se ilustra en la siguiente tabla.

Tabla 3.20. Ancho de banda para la modulación M-QAM.

Modulación M-QAM				
Fases de salida	Combinación de	Ancho de banda		
de M-QAM	bits de entrada (n)	necesario		
2-QAM	1 bit	$f_b$		
4-QAM	2 bits	$f_b/2$		
8-QAM	3 bits	$f_b/3$		
16-QAM	4 bits	$f_b/4$		

# Aplicaciones de la modulación QAM.

Las aplicaciones más habituales de la modulación QAM se presenta cuando se requiere transmitir muchos datos y el ancho de banda es restringido, tales como:

- Módems telefónicos para velocidades superiores a los 2400 bps.
- > Transmisión de microondas y satélites.
- Modulación TCM (trellis coded Modulation), que consigue velocidades de transmisión muy elevadas combinando la modulación con la codificación del canal.
- ➤ Módems ADSL (Asymmetric digital suscriber line), que trabajan en el bucle de abonado, a frecuencias situadas entre 24 y 1104 KHz, pudiendo obtener velocidades de hasta 9Mbps, modulando en QAM diferentes portadoras.
- > Transmisión de señales de televisión por cable a color (las señales moduladoras corresponden a las señales de iluminancia y crominancia).

# 3.4.4.1. Modulación QAM, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de transmisión es necesario utilizar la siguiente herramienta adicional a las de configuración y herramientas ya vistas en los programas anteriores.

# MT Modulate QAM.vi

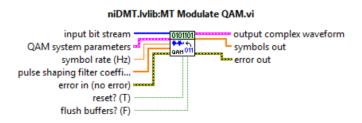


Figura 3.201. MT Modulate QAM.vi.

Recibe una secuencia de bits de datos, realiza la modulación QAM, y devuelve una forma de onda modulada en banda base compleja con sus parámetros.

#### **PROCEDIMIENTO:**

 Iniciamos la programación con las herramientas de configuración eligiendo el módulo transmisor.

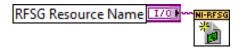


Figura 3.202. Configuración del módulo TX.

2. Configuramos la frecuencia central y la potencia de la señal portadora; habilitamos la generación IQ indicando al driver la generación de una forma de onda arbitraria. Utilizamos un *Property node* para establecer y obtener propiedades o parámetros para la modulación.

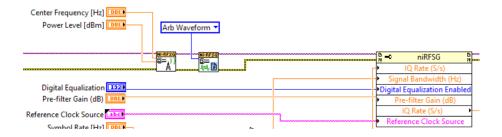


Figura 3.203. Configuración de la señal portadora y sus parámetros.

**3.** Al igual que en la modulación PSK el ancho de banda es igual a la multiplicación del valor de *Alpha* del filtro por la Tasa de símbolos a transmitir.

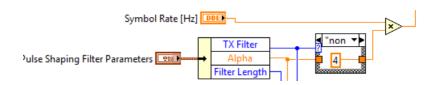


Figura 3.204. Configuración del ancho de banda.

**4.** Creamos los controles, para el *MT Generate Filter Coefficients.vi*, que calcula los parámetros de los filtros para su uso con el *MT Modulate QAM.vi*, junto con la herramienta *MT Generate System Parameters.vi* que se cambia en el selector polimórfico a QAM, para generar los controles para los parámetros de la modulación QAM (modulación M-QAM multinivel que se va a realizar).

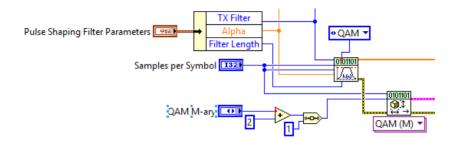


Figura 3.205. Parámetros del sistema y coeficientes de filtros para la modulación QAM.

5. La trama de bits a transmitir, se genera de la misma forma que en la modulación ASK, más el *MT Bit Stream to Digital Graph.vi*, que transforma la trama de bits a un gráfica digital para ser mostrada.

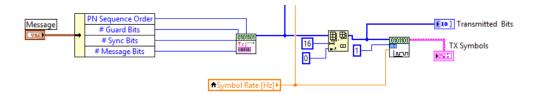


Figura 3.206. Generación de la señal Moduladora.

**6.** A partir de los parámetros antes mencionados, realizamos la modulación por Cuadratura con el *MT Modulate QAM.vi*.



Figura 3.207. Realiza la modulación QAM.

7. Como en la modulación ASK, obtenemos la tasa de bits, y con ayuda del rfsg\_resample and write (complex input).vi, muestreamos la forma de onda compleja con la nueva tasa de bits IQ de la señal modulada.

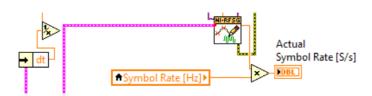


Figura 3.208. Reconstrucción de la señal QAM modulada con la nueva tasa IQ.

**8.** Con la herramienta *niRFSG Initiate.vi* se inicializa la generación, chequeamos continuamente el estado de la generación y cerramos los controles de la generación de la señal QAM, como en los programas anteriores.

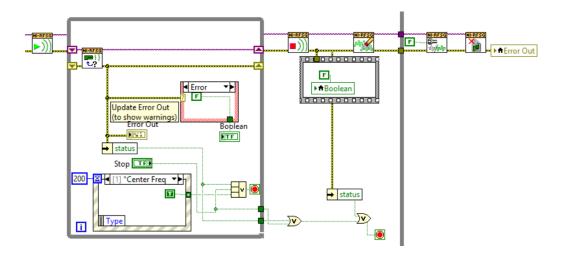


Figura 3.209. Generación, estado de generación y cierre de sesión.

9. Todo el programa utiliza un While Loop para que la generación sea continua.

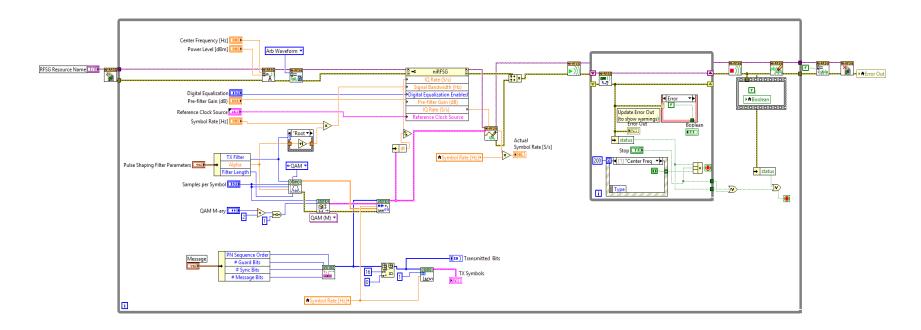


Figura 3.210. Diagrama de bloques Modulación QAM.

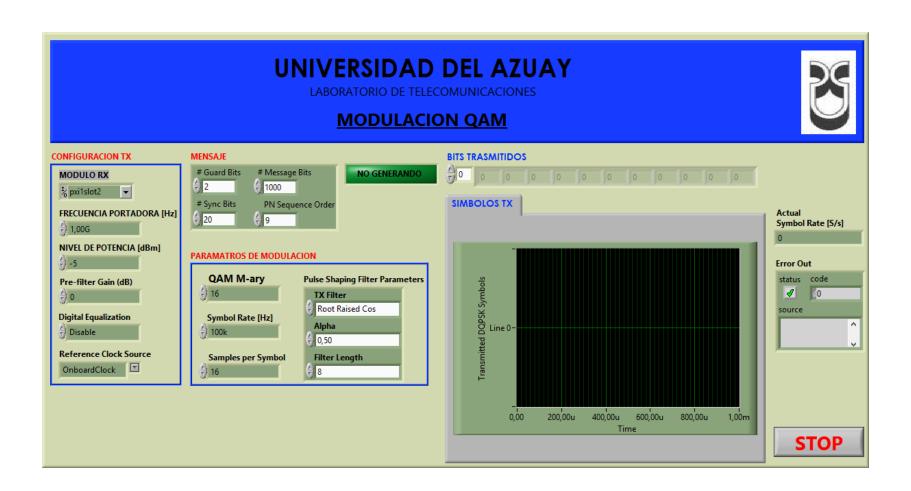


Figura 3.211. Panel Frontal Modulación QAM.

# 3.4.4.2. Demodulación QAM, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa de recepción es necesario utilizar las siguientes herramientas adicionales a las de configuración.

# MT Demodulate QAM.vi

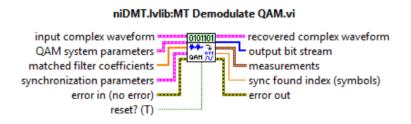


Figura 3.212. MT Demodulate QAM.vi.

Demodula una forma de onda compleja de banda base modulada en QAM y devuelve una forma de onda compleja en el tiempo, los bits de información, y las mediciones realizadas durante la demodulación.

# MT Generate QAM System Parameters.vi

# samples per symbol (16) M-QAM (16) error in (no error) OAM system parameters bits per symbol error out

niDMT.lvlib:MT Generate QAM System Parameters.vi

Figura 3.213. MT Generate QAM System Parameters.vi.

Calcula los parámetros para su uso en la modulación y demodulación QAM. El sistema de parámetros es devuelto en un clúster, que debe ser conectado a la modulación o demodulación apropiada.

#### **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado DEMODULACIÓN QAM.
- 2. Iniciamos sesión configurando el módulo receptor.

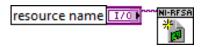


Figura 3.214. Configuración del módulo Rx.

3. Se generan los controles para los parámetros de la demodulación QAM, cuantos muestras por símbolo y la modulación QAM multinivel que se va a realizar (número de amplitudes y fase de salida) con la herramienta MT Generate QAM System Parameters.vi.

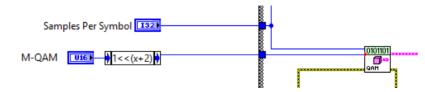


Figura 3.215. Parámetros del sistema para la demodulación QAM.

**4.** Al igual que en los demoduladores anteriores, el receptor debe estar configurado en señales IQ, con ayuda del *niRFSA Configure Acquisition Type.vi* y configuramos los parámetros de la señal portadora con las herramientas de configuración antes descritas.



Figura 3.216. Configuración para la adquisición de la señal IQ.

5. A partir de los controles, TX Filter, Alpha, Filter Length, configuramos el número de muestras para el demodulador QAM, las salidas de los controles se conectan al MT Generate Filter Coefficients.vi, que calcula los parámetros de los filtros para su uso con el MT Demodulate QAM.vi.

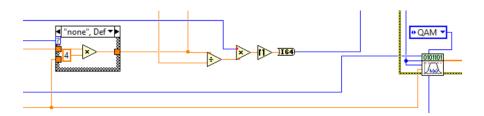


Figura 3.217. Configuración del número de muestras y coeficientes de los filtros.

6. El VI niRFSA Initiate.vi inicia la adquisición de la señal transmitida, junto con el niRFSA Fetch IQ.vi recupera la señal IQ, la misma que es enviada al MT Resample (Complex Cluster).vi donde se vuelve a muestrear la señal regenerando ciertos parámetros de la señal transmitida, antes de ser demodulada.

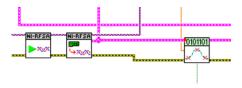


Figura 3.218. Recuperación de la señal IQ.

**7.** En el *MT Demodulate QAM.vi* se realiza la demodulación de la señal reconstruida, obteniendo la trama de bits enviada desde el transmisor.

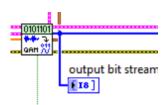


Figura 3.219. Demodulación QAM.

 Con la ayuda del mod\_Check Power Level.vi se obtiene parámetros de la señal demodulada.

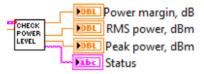


Figura 3.220. Parámetros y medidas de la señal modulada QAM.

9. Se recuperan los datos más importantes de la señal demodulada (criterio del usuario) con ayuda del *MT Measure QAM Quadrature Impairments.vi*.

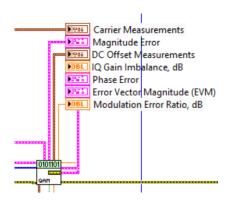


Figura 3.221. Parámetros y medidas de la señal demodulada QAM.

10. El mod\_Truncate Filter Transient.vi ingresa los parámetros de los filtros iniciales y se obtiene el diagrama de ojo y la gráfica de constelación de la señal demodulada con el MT Format Eye Diagram (complex).vi y el MT Format Constellation.vi.

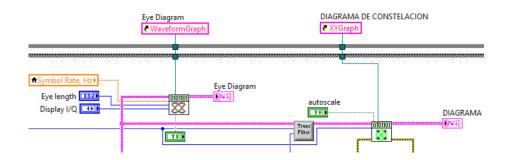


Figura 3.222. Diagrama de ojo y Constelación de la señal QAM.

**11.** Para la adquisición de la señal espectral se realiza la misma configuración de los demoduladores anteriores.

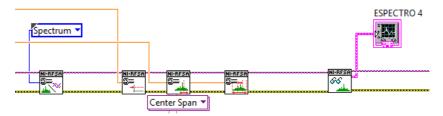


Figura 3.223. Configuració para adquisición de espectro de la señal QAM.

12. Cerramos sección de la adquisición tanto del espectro como de la señal IQ.



Figura 3.224. Cierre de sesión de la adquisición.

**13.** Para cada uno de los parámetros de configuración tanto para el espectro como para las señales IQ se crean controles.

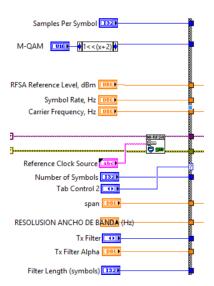


Figura 3.225. Controles de configuración.

**14.** En el programa utilizamos un *While Loop* general para realizar continuamente la recepción. Para la adquisición del espectro y de la señal IQ se utilizó un *Case Structure*, el equipo PXIe-1075 trabaja bien en espectro o en señal IQ pero no con ambas al mismo tiempo.

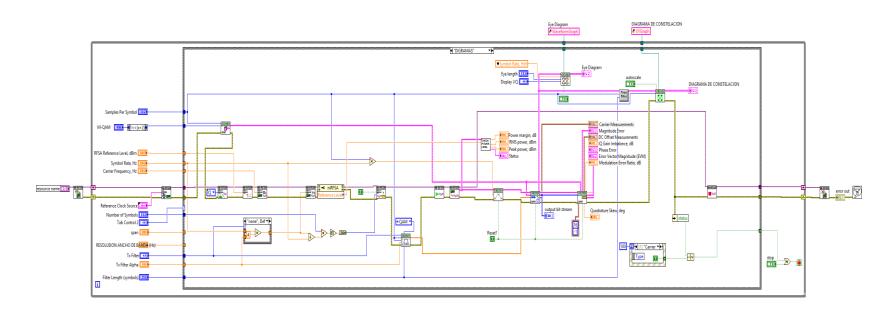


Figura 3.226. Diagrama de bloques Demodulación QAM (Diagramas, Caso 1).

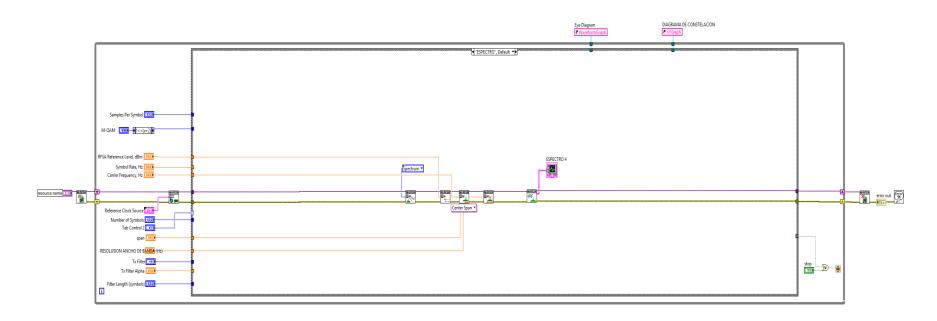


Figura 3.227. Diagrama de bloques, análisis del espectro QAM (Espectro, Caso 2).



Figura 3.228. Panel frontal Demodulación QAM.

# 3.4.4.3. Comprobación de los programas de modulación y demodulación QAM.

a. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla 3.21. Antenas utilizadas para comprobar la modulación QAM.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
3	UHF	1800 - 1990 MHz	Yagi	2

**b.** Abrimos los programas de modulación y demodulación QAM, configuramos los siguientes parámetros en el panel frontal y observamos.

# Modulador.

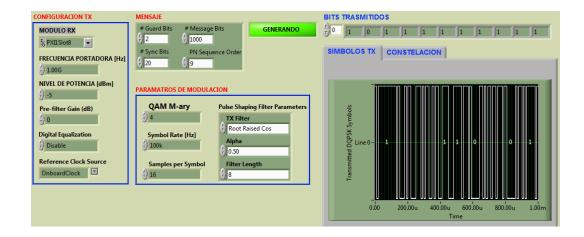
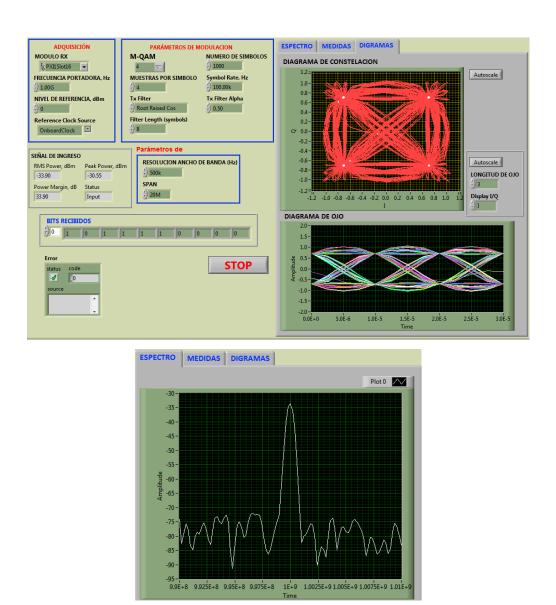


Figura 3.229. Configuración del modulador 4-QAM y bits transmitidos.

## Demodulador.



**Figura 3.230.** Configuración del demodulador, constelación, diagramas de ojo y Espectro de la señal demodulada 4-QAM.

Al configurar los parámetros, se ve la constelación con los puntos distribuidos como una modulación PSK, la diferencia de QAM y PSK se hace notar desde una modulación 8-QAM.

**c.** Configuración del modulador y demodulador para 16-QAM.

#### Modulador.

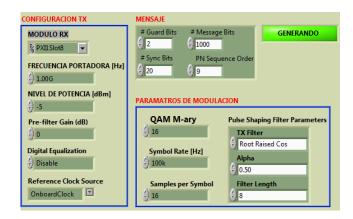


Figura 3.231. Configuración del modulador para 16-QAM.

## Demodulador.

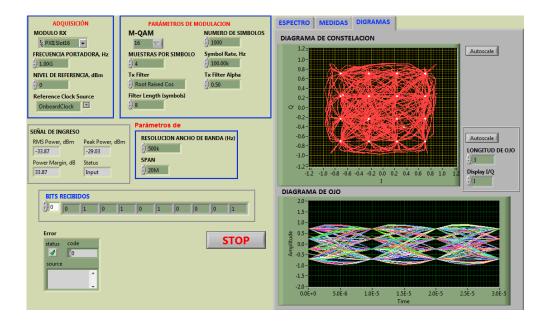


Figura 3.232. Configuración del demodulador, constelación y diagrama de ojo para 16-QAM.

En la constelación se observa una mejor distribución de los puntos de la combinación de los bits, esto mejora la inmunidad al ruido cuando se transmiten más bits en un solo cambio de fase o amplitud de la señal modulada.

# Conclusión.

En la modulación QAM se tiene una mejor distribución de los puntos de la constelación, es un sistemas adecuado para una transmisión M > 8, a comparación de un sistema PSK. Es más inmune al ruido.

# 3.4.4.4. Ejercicios de aplicación de la modulación QAM.

1. Conectar las antenas en el trasmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla 3.22. Antenas utilizadas para el ejercicio QAM.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

**2.** Configurar el modulador y demodular QAM con los siguientes parámetros y explicar los resultados.

## Modulador.

Tabla 3.23. Parámetros para el modulador QAM.

Frecuencia Portadora	500MHz
Nivel potencia	-5
QAM M-ary	32
Alpha	0.50
Samples per Symbol	16

#### Demodulador.

Tabla 3.24. Parámetros para el demodulador QAM.

Frecuancia portadora	500MHz
Nivel de referencia	0
M-QAM	32
Número de simbolos	500
Tx Filter Alpha	0.50

# **CAPÍTULO 4**

# PROPAGACIÓN Y ANTENAS

# 4.1. Antenas y Propagación.

Las antenas son una de las principales prioridades de las telecomunicaciones inalámbricas, permitiendo radiar de forma eficiente las ondas electromagnéticas a lo largo del espacio libre. En el presente capítulo se hablara de las antenas pertenecientes a la Universidad del Azuay, en el laboratorio de telecomunicaciones, las mismas que funcionan a diferentes frecuencias y poseen características diferentes para cada tipo de modulación antes mencionadas. Para ello se debe de tener breve conocimiento de los siguientes temas:

# Ondas electromagnéticas.

Las ondas electromagnéticas están formados por dos tipos de campos que son:

- Los campos eléctricos, tienen su origen en la diferencia de voltaje, entre más elevado sea el voltaje, más fuerte será el campo eléctrico que resulta.
- Los campos magnéticos, tienen su origen en las corrientes eléctricas, una corriente más fuerte resulta en un campo magnético más fuerte.

Las ondas electromagnéticas son la combinación de los campos eléctricos y magnéticos que se encuentran perpendiculares entre si y perpendiculares a la dirección de propagación y están en fase, alcanzan sus valores máximos y mínimos al mismo tiempo.

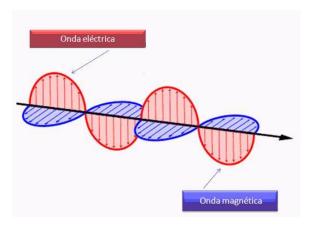


Figura 4.1. Onda electromagnética.

Fuente: (GABRIEL LEDESMA, 2015).

Los campos electromagnéticos producidos por las cargas en movimiento pueden abandonar las fuentes (antenas) y viajar a través del espacio (en el vacío) creándose y recreándose mutuamente. Esto suceda porque un campo eléctrico variable engendra un campo magnético variable y este a su vez uno eléctrico, de esta forma las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío con una velocidad constante, similar a la velocidad de la luz (c = 300000 km/s). Estas ondas no tienen barreras y es muy importante porque es una forma de que la energía se transporte a través del aire. Es decir, sin necesidad de tener que contar con cables ni ningún dispositivo físico similar.

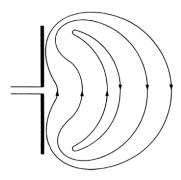


Figura 4.2. Propagación de la onda electromagnética.

Fuente: (CONSTANTINE A. BALANIS, 2005).

# Espectro electromagnético.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia y longitud de onda. El conjunto de todas las frecuencias se denominan espectro.

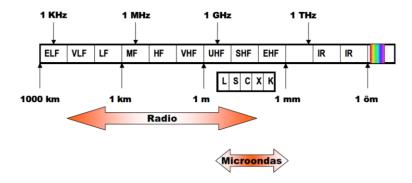


Figura 4.3. Espectro de frecuencias.

Fuente: (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2013).

Las ondas se clasifican por bandas. Las denominaciones de las bandas de frecuencia se pueden realizar por décadas, como por ejemplo MF, HF, VHF, UHF.

Banda	Denominación	frec. mínima	frec. máxima	λ máxima	λ mínima
ELF	Extremely Low Frequency	-	3 kHz	-	100 km
VLF	Very Low Frequency	3 kHZ	30kHz	100 km	10 km
LF	Low Frequency	30 kHz	300 kHz	10 km	1 km
MF	Medium Frequency	300 kHz	3 MHz	1 km	100 m
HF	High Frequency	3 MHz	30 MHz	100 m	10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHz	300 MHz	10 m	1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 MHz	3 GHz	1 m	10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHz	30 GHz	10 cm	1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30 Ghz	300 GHz	1 cm	1 mm

Figura 4.4. Banda de frecuencias.

Fuente: (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2013)

En Televisión y FM se utilizan otras denominaciones como Banda I, Banda II, Banda III, IV y V.

Banda	frec. mínima	frec. máxima	Canales
1	47 MHz	68 MHz	2,3,4 VHF
П	88 MHz	108 MHz	FM
III	174 MHz	230 MHz	5 al 12 VHF
IV	470 MHz	606 MHz	21 al 37 UHF
V	606 MHz	862 MHz	38 al 69 UHF

Figura 4.5. Frecuencias para la TV y FM.

Fuente: (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2013).

A frecuencias de microondas se utilizan otras denominaciones, como bandas L,C,S,X, que provienen de los primeros tiempos del radar.

Banda	frec. mínima	frec. máxima	λ máxima	λmínima
L	1 GHz	2 GHz	30 cm	15 cm
S	2 GHZ	4 GHz	15 cm	7.5 cm
С	4 GHz	8 GHz	7.5 cm	3.75 cm
X	8 GHz	12.4 GHz	3.75 cm	2.42 cm
Ku	12.4 GHz	18 GHz	2.42 cm	1.66 cm
K	18 GHz	26.5 GHz	1.66 cm	1.11 cm
Ka	26.5 GHz	40 GHz	11.1 mm	7,5 mm
mm	40 GHz	300 GHz	7.5 mm	1 mm

Figura 4.6. Frecuencias de microondas.

Fuente: (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2013).

A frecuencias superiores nos encontramos con la parte del espectro electromagnético correspondientes al infrarrojo, visible y ultravioleta. A frecuencias superiores tenemos los rayos X y los rayos Gamma, de energía mayor y longitudes de onda más reducidas.

Banda	Denominación	frec. mínima	frec. máxima	λ máxima	λmínima
	Región submilimétrica	300 GHz-	800 GHz	1 mm-	0,4 mm
IR	Infrarrojo	800 GHZ	400 THz	0,4 mm	0,8 µm
V	Visible	400 THz	750 THz	0,8 µm	0,4 µm
UV	Ultravioleta	750 THz	10000 THz	400 nm	12 nm

Figura 4.7. Frecuencias infrarrojo, visible y ultravioleta.

Fuente: (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2013).

#### 4.2. Antenas.

Las antenas son dispositivos metálicos capaces de radiar y recibir de forma eficiente ondas electromagnéticas que viajan por el espacio libre. Los sistemas de comunicaciones utilizan antenas para realizar enlaces punto a punto, difundir señales de televisión o radio, o bien transmitir o recibir señales en equipos portátiles. Entonces una antena es una interfaz entre el espacio libre y la línea de transmisión y viceversa, mientras una línea no irradia ni recibe energía del espacio, la antena si lo hace y eso es lo que las distingue.

López Navas, Vallejo Lucero

211

En los circuitos transmisores de radio, se producen corrientes y tenciones eléctricas de altas frecuencias conocidas como radio frecuencias (RF), para viajar por el espacio libre esas señales eléctricas son trasformadas en ondas electromagnéticas, la antena unida a un generador emite esas señales de un punto a otro. De la misma forma en el receptor de radio, la antena conectada a una impedancia recibe las ondas electromagnéticas y con la ayuda de un downconverter trasforma esas ondas recibidas a frecuencia intermedia (información), para ser tratada y decodificada.

Según la aplicación de la antena, el tamaño de la misma estará relacionada con la banda de frecuencias que se quiere captar o transmitir, para ese fin existen diferentes tipos.

# 4.2.1. Tipos de antenas.

Las antenas que serán descritas a continuación son las pertenecientes a la Universidad del Azuay, abarcan un rango de frecuencias desde los 25 MHz hasta los 6.6 GHz.

# Antena de reflector o parabólica.



Figura 4.8. Antena parabólica.

Fuente: (KAREL SEDRICK JUSTO ACOSTA, 2012).

Las antenas parabólicas usan un plato reflector con la forma de una parábola, esférica o de bocina para capturar la energía radiada por la antena y enfocarla en un haz estrecho al transmitir o para enfocar las ondas de radio recibidas por la antena a un punto focal. Las antenas parabólicas usan características físicas como antenas de elementos múltiples para alcanzar muy alta ganancia y direccionalidad, limitando las radiaciones a un cierto espacio y concentrando la potencia de las ondas

electromagnéticas y enfocándolas en una sola dirección. Se utiliza especialmente para la transmisión y recepción vía satélite.

# Antenas de Panel Plano (Flat Panel).



Figura 4.9. Antena de Panel Plano.

Las antenas de panel plano como su nombre dice son un panel con forma cuadrada o rectangular y están configuradas en un formato tipo patch. Las antenas tipo Flat Panel son muy direccionales ya que la mayoría de su potencia radiada es en una sola dirección ya sea en el plano horizontal o vertical. Las antenas Flat Panel pueden ser fabricadas en diferentes valores de ganancia de acuerdo a su construcción. Esto puede proveer excelente directividad y considerable ganancia.

# Antenas Yagi.

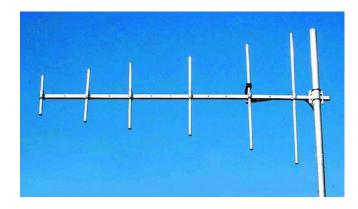


Figura 4.10. Antena Yagi.

Fuente: (COMMUNICATION ELECTRONIC - STAR ANTENNA, 2014).

Esta antena se compone de un arreglo de elementos paralelos y coplanarios independientes llamados directores, activos y reflectores, donde solo uno de ellos transmite las ondas de radio. Cada uno de los elementos que conforman una antena Yagi cumple una función específica que es:

- Los Directores dirigen el campo eléctrico.
- Los activos o dipolo radian el campo electromagnético.
- Los reflectores lo reflejan.

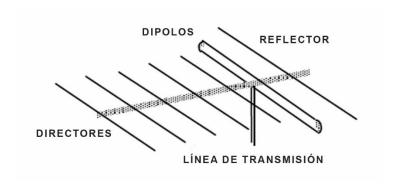


Figura 4.11. Elementos de la antena Yagi.

Una antena Yagi puede tener varios elementos directores como se ilustra en la figura anterior, el número de elementos directores determina la ganancia y directividad de la antena, su ganancia está dado por:

$$G = 10 \log n$$

G = Ganancia.

n = Número de elementos directores.

Las antenas Yagi no son tan direccionales como las antenas parabólicas, pero son más directivas que las antenas de panel plano.

## 4.2.2 Características de las antenas.

Cada antena antes mencionada posee varias características importantes que deben de ser consideradas al momento de elegir una específica para su aplicación. Las características principales de una antena son:

## 4.2.2.1. Diagrama de radiación.

El diagrama de radiación es la variación de la radiación en un ángulo alrededor de una antena cuando la misma está transmitiendo. La radiación se cuantifica por señales, el valor de densidad de potencia S a una distancia r fija de la antena. En otras palabras el diagrama de radiación no es más que la representación gráfica de la energía electromagnética radiada por una antena, vista desde fuera, en función de la dirección angular.

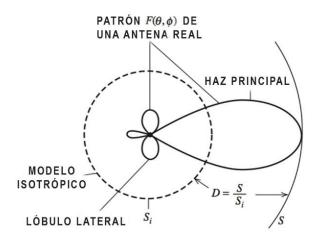


Figura 4.12. Diagrama de radiación.

Fuente: (CONSTANTINE A. BALANIS, 2005).

El diagrama de radiación se representa habitualmente en un sistema de coordenadas esférico, las tres variables de un sistema esférico son  $(r, \theta, \Phi)$ , donde la antena es colocada en el origen, la distancia a la antena queda determinada por r, mientras que  $(\theta, \Phi)$  representan las direcciones de propagación de los campos electromagnéticos.

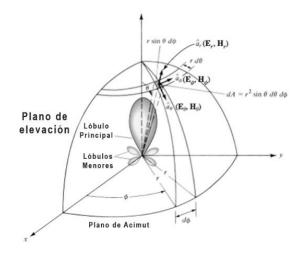


Figura 4.13. Coordenadas esféricas para un diagrama de radiación.

Fuente: (CONSTANTINE A. BALANIS, 2005).

Un diagrama de radiación está formado por lóbulos que representan la porción del diagrama de radiación limitado por regiones de intensidad de la radiación relativamente débiles y estos pueden ser sub-clasificados en:

- Lóbulo principal: se define como el lóbulo de radiación que contiene la dirección de máxima radiación.
- Lóbulos menores: es cualquier lóbulo excepto el lóbulo principal, generalmente representan la radiación en direcciones no deseadas y deben ser minimizadas.
- Lóbulos laterales: es un lóbulo de radiación que es adyacente al lóbulo principal.
- Lóbulos traseros: es un lóbulo de radiación cuyo eje forma un ángulo de aproximadamente 180 grados con respecto al lóbulo principal de una antena.

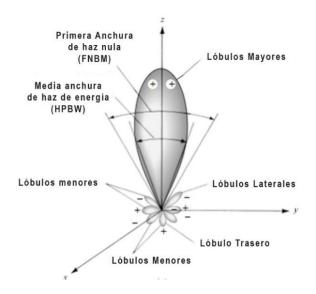


Figura 4.14. Lóbulos de radiación.

Fuente: (CONSTANTINE A. BALANIS, 2005).

Según el diagrama de radiación a una antena se le puede definir como:

- Un radiador isotrópico: es una antena sin pérdidas que radia igual en todas las direcciones (caso ideal).
- Antena direccional: tiene la propiedad de irradiar o recibir ondas electromagnéticas de manera más eficaz en algunas direcciones que en otras.
- Antena en el plano E o plano vertical: se define como una antena que contiene el vector campo eléctrico y la dirección de máxima radiación.
- Antena el plano H o plano horizontal: se define como el plano que contiene el vector campo magnético y la dirección de máxima radiación.
- Antena omnidireccional: es una antena que tiene una zona donde irradia energía por igual (puede ser plano horizontal o vertical).

# Regiones de campo.

El espacio que rodea una antena por lo general se subdivide en tres regiones:

 Región de campo cercano reactivo: es la parte de la región de campo cercano que rodea inmediatamente la antena y se define como:

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

D =Longitud de la antena.

 $\lambda$  = Longitud de onda.

• Región de radiación de campo cercano (Fresnel): es la región en la que los campos de radiación predominan y se define como:

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda}$$

D =Longitud de la antena.

 $\lambda$  = Longitud de onda.

 Región de campo lejano (Fraunhofer): es la región del campo de una antena donde la distribución de campo angular es independiente de la distancia desde la antena.

En la siguiente figura se muestran las regiones que rodea una antena:

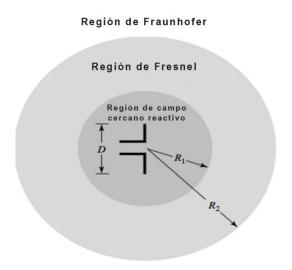


Figura 4.15. Regiones de campo.

Fuente: (CONSTANTINE A. BALANIS, 2005).

# 4.2.2.2. Densidad de potencia radiada.

La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección y describe la potencia asociada con una onda electromagnética, su unidad es vatios por metro cuadrado. Se puede calcular a partir de los valores de los campos *E y H* como:

$$W = E x H$$

W = Densidad de potencia (W/m<sup>2</sup>).

E =Intensidad del campo eléctrico (V/m).

H = Intensidad del campo magnético (A/m).

Dado que el vector W es una densidad de potencia, la potencia total al cruzar una superficie cerrada se puede conseguir mediante la integración de la componente normal del vector W sobre toda la superficie mediante la integral:

$$P = \oiint W.n d_a$$

P = Potencia total instantánea.

n =Vector unitario normal para la superficie.

 $d_a$  = El área de la superficie de una esfera de radio r.

La ecuación anterior describe la potencia media radiada por una antena.

#### 4.2.2.3. Intensidad de radiación.

La intensidad de radiación es la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección, su unidad son vatios por estereorradián. Dicho parámetro es independiente de la distancia a la que se encuentre la antena emisora. La relación entre la intensidad de radiación y la densidad de potencia radiada es:

$$U = r^2 W_{rad}$$

U = Intensidad de radiación (W/estereorradián).

 $W_{rad}$  = Densidad de radiación (W/m<sup>2</sup>).

La potencia total radiada se puede calcular integrando la intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio y está definida por:

$$P_{rad} = \oint_{\Omega} U \ d\Omega = \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} U \ sen \ \theta \ d\theta \ d\emptyset$$

#### 4.2.2.4. Directividad.

La directividad de una antena se define como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección, a una distancia, y la intensidad de radiación que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, a igualdad de potencia total radiada. Donde, la intensidad de radiación de una antena isotrópica es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por  $4\pi$ .

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi}$$

 $U_o$  = Intensidad de radiación Isotrópica.

Por lo que la directividad de una antena queda definida como:

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi \ U}{P_{rad}}$$

D = Directividad (sin unidad).

U =Intensidad de radiación (W/estereoradian).

 $U_o$  = Intensidad de radiación de una fuente isotrópica (W/estereorradián).

 $P_{rad}$  = Potencia total radiada (W).

Si no se especifica la dirección angular, se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación.

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$

 $U_{max}$  = Intensidad de radiación máxima.

López Navas, Vallejo Lucero

#### 4.2.2.5. Polarización de antenas.

La polarización se define como la orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética al salir de la antena. En las antenas se puede dar diferentes tipos de polarización según como se oriente el campo eléctrico dentro de la onda electromagnética.

## Polarización lineal.

Una onda está polarizada linealmente si el campo eléctrico del vector en ese punto siempre se orienta a lo largo de la misma línea recta en cada instante de tiempo. Esto se logra si el vector posee:

- Sólo uno de los componentes (horizontal o vertical).
- Dos componentes lineales ortogonales están en fase de tiempo o 180° (o múltiplos de 180°) fuera de fase.

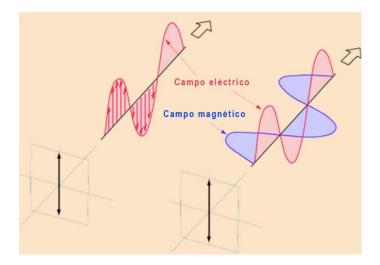


Figura 4.16. Polarización lineal.

Fuente: (MARTIN REICH, 2012).

Tomar en cuenta la polaridad de la antena es muy importante si se quiere obtener el máximo rendimiento de esta. La antena transmisora debe tener la misma polaridad de la antena receptora para conseguir el máximo rendimiento.

# 4.3. PRÁCTICA: DIAGRAMA DE RADIACIÓN.

# **Objetivos:**

- **a.** Profundizar los conceptos básicos sobre los diagramas de radiación y potencia radiada de una antena.
- **b.** Visualizar e interpretar los diagramas de las antenas.

# 4.3.1. Diagramas de radiación, desarrollo de la práctica.

Para el desarrollo del programa del diagrama de radiación es necesario utilizar las siguientes herramientas adicionales a las de configuración y herramientas ya vistas en los programas anteriores.

## niRFSA Read Power Spectrum (Cluster).vi



Figura 4.17. niRFSA Read Power Spectrum.vi.

Según los valores en las herramientas de configuración, este VI lee el espectro recibido y devuelve el valor de la potencia (dBm) que podrá ser visualizado en un indicador gráfico.

# SMT Spectrum Peak Search.vi

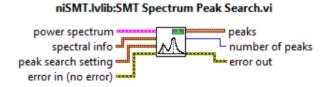


Figura 4.18. SMT Spectrum Peak Search.vi.

Realiza una búsqueda de picos en un espectro de potencia o espectro de amplitud que se especifique. El VI devuelve la frecuencia máxima, el valor de la magnitud y número de picos.

## Polar Plot with Point Options.vi

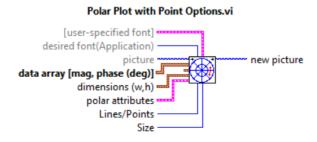


Figura 4.19. Polar Plot with Point Options.vi.

Agrega una imagen que representa un gráfico polar de los datos. Este VI puede representar datos polares como puntos o líneas entre puntos.

#### **PROCEDIMIENTO:**

- 1. Creamos un nuevo proyecto titulado DIAGRAMA DE RADIACIÓN.
- 2. Iniciamos sesión configurando el módulo receptor.



Figura 4.20. Configuración del módulo Rx.

3. El receptor debe estar configurado en señales Spectrum, con ayuda del niRFSA Configure Acquisition Type.vi. y se crean los controles y parámetros para las herramientas de configuración del receptor, tal como en los programas de demodulación visto en el capítulo anterior. Configuramos la señal deseada en los siguientes parámetros: niRFSA Configure Ref Clock.vi configura el reloj de referencia en el equipo, niRFSA Configure Reference Level.vi configura el nivel de potencia, niRFSA Spectrum Frequency Center Span.vi configura la frecuencia central, niRFSA Configure Resolution Bandwidth.vi configura la resolución del ancho de banda.

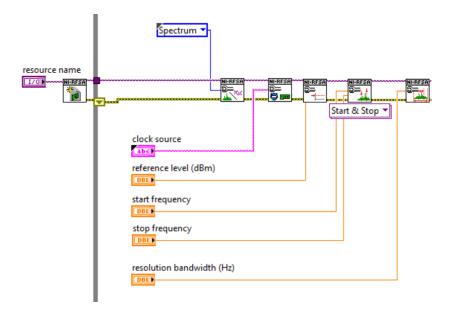


Figura 4.21. Configuración para la adquisición del espectro.

4. Utilizamos el niRFSA Read Power Spectrum.vi, esta herramienta lee el espectro de la señal deseada con los parámetros de configuración y mediante un waveform Graph la visualizamos.

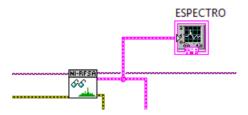


Figura 4.22. Lee el espectro de la señal recibida.

5. De la señal espectral leída, sacamos los datos numéricos de frecuencia y potencia; para esto utilizamos SMT Spectrum Peak Search.vi que nos permite obtener información de la señal recibida. En este VI es necesario configurar el tipo de información que se desea extraer, haciendo click derecho en las entradas de spectral info y peak search setting creamos constantes y configuramos los datos que deseamos, además creamos un arreglo de 2 elementos con la ayuda de la herramienta Index array, los elementos serán frecuencia y potencia.

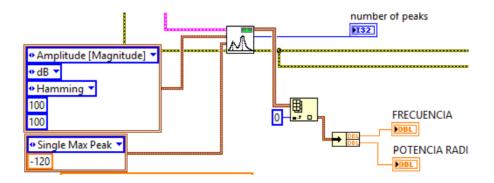


Figura 4.23. Obtenemos frecuencia y potencia del espectro.

6. Se crea un *Case Structure*, se introducen los valores de potencia vs ángulo de radiación de la antena, se manda a gráficar en un plot polar con ayuda de *Polar Plot with Point Options.vi*, graficará un diagrama de radiación de la antena según el valor del ángulo de la antena (este valor tomará el usuario al hacer click en el pulsante de "VALOR POTENCIA").

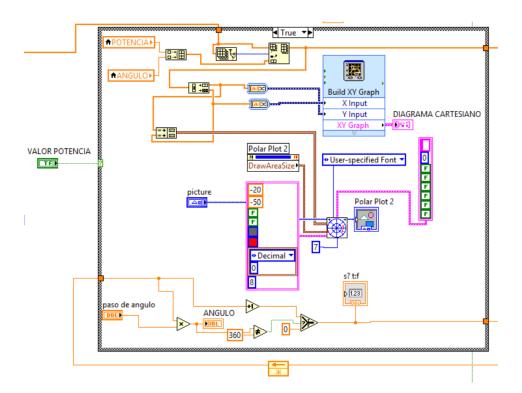


Figura 4.24. Diagrama polar.

7. Introducimos los datos de Potencia y ángulo en un solo array de dos elementos, estos datos se cargarán continuamente, se dividen y transforman de datos numéricos a datos dinámicos para obtener el diagrama cartesiano.

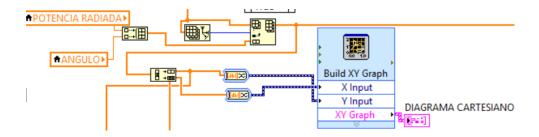


Figura 4.25. Diagrama cartesiano.

8. Con los dos datos obtenidos de magnitud y fase, creamos un clúster con *Index & Bundle Cluster Array*, e ingresamos al *Polar Plot with Point Options.vi*. Es necesario crear los parámetros para la obtención del diagrama de radiación polar como: atributos polares donde introducimos las escalas, color, formatos, características de la fuente, dimensiones, etc.

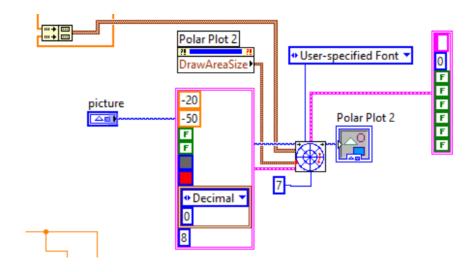


Figura 4.26. Parámetros para el diagrama polar.

9. Se limita el ángulo de giro de la antena, una vuelta total tiene solo 360° para lo cual se reinicia el ángulo de giro y vuelve a cero (para la gráfica en el VI *Polar Plot with Point Options.vi*).

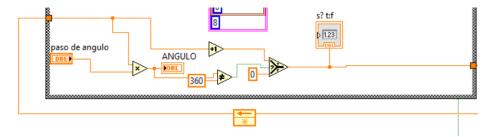


Figura 4.27. Ángulo de giro de 360°.

**10.** Y si en el *Case Structure* la opción es false, solo se manda la señal anterior directamente.

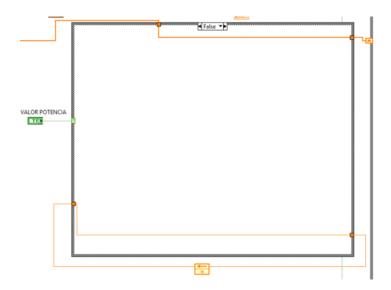


Figura 4.28. Caso false, señal anterior.

11. Se cierra la sección de configuración de la recepción de la señal.

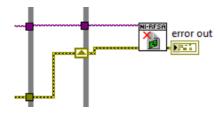


Figura 4.29. Cierre de sesión de la configuración.

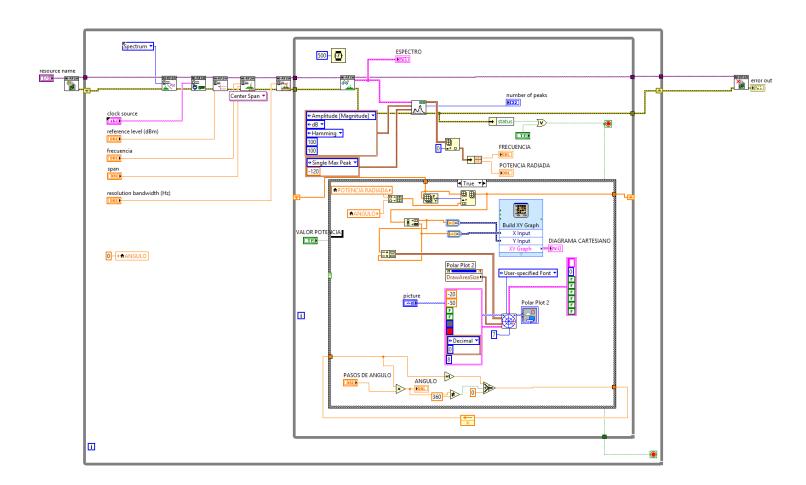


Figura 4.30. Diagrama de bloques de Radiación de antenas.

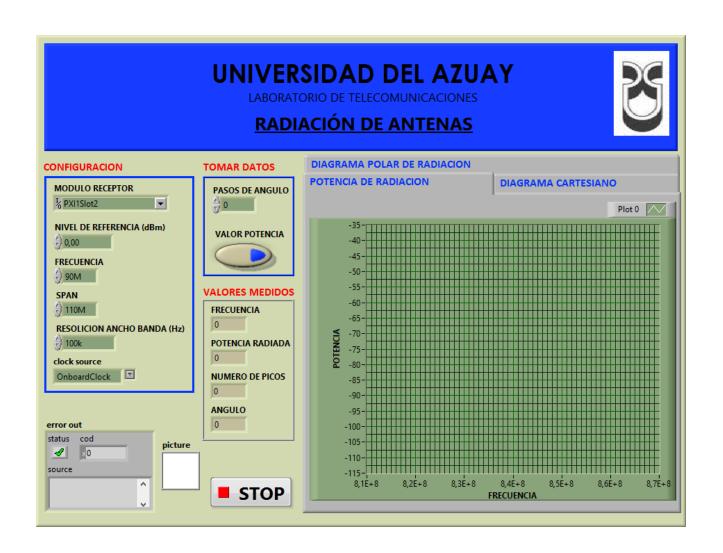


Figura 4.31. Panel frontal de Radiación de antenas.

### 4.3.2. Comprobación del programa del diagrama de radiación.

a. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

**Tabla 4.1.** Antenas utilizadas para comprobar la radiación de antenas.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
3	UHF	1800 - 1990 MHz	Yagi	2

**b.** Para el programa de radiación nos ayudamos con el programa de generación de señales del capítulo 2, lo configuramos de la siguiente manera.

### UNIVERSIDAD DEL AZUAY

LABORATORIO DE TELECOMUNICACIONES

# **GENERADOR DE SEÑAL CW**



Figura 4.32. Configuración del generador de señales.

**c.** Abrimos el programa de radiación y configuramos los siguientes parámetros en el panel frontal.



Figura 4.33. Configuración del panel frontal radiación de antenas.

**d.** Giramos una de las antenas, con respecto a la otra, con ayuda de una escala, hasta darle la vuelta completa (360 grados) y tomamos los valores en el programa (en nuestro caso son pasos de 20 en 20 grados).



Figura 4.34. Captura de la potencia radiada en el programa.

Dando los siguientes resultados:

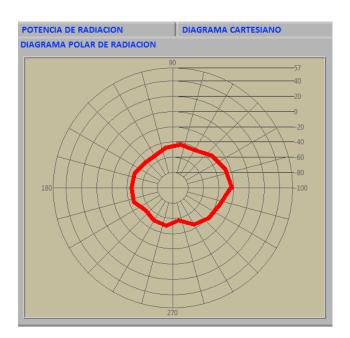


Figura 4.35. Diagrama de radiación.



Figura 4.36. Diagrama Cartesiano.

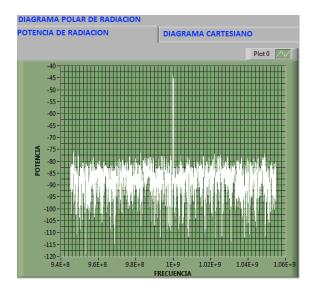


Figura 4.37. Potencia radiada.

Este diagrama de radiación es obtenido con una antena Yagi.

### Conclusión.

Al tomar el diagrama de radiación con una antena yagi la separación de las antenas debe de ser calculado para la zona de Fresnel y ver un espacio abierto, los rebotes de la señal hace que no se dé un buen diagrama de radiación, como en nuestro caso las antenas no están separadas la distancia adecuada por limitaciones de los cables de las antenas, esto hace que en el diagrama de radiación no se observe los lóbulos laterales ni los traseros con respecto al lóbulo principal de la señal a su máxima potencia.

# 4.3.3. Ejercicios de aplicación del diagrama de radiación.

- 1. Medir la intensidad de potencia radiada.
- 2. Analizar el diagrama cartesiano de potencia radiada.
- 3. Analizar el diagrama polar de potencia radiada.

Con los siguientes parámetros con una antena de panel de 5.8 GHz.

**Tabla 4.2.** Parámetros para el generador de señales y el programa del digrama de radiación con antenas de panel de 5.8GHz.

GENERADO SEÑALE		RADIACIÓN DI	E ANTENAS
MODULO TX	Pxi1slot8	MODULO RX	Pxi1slot16
FRECUENCIA	5.8 GHz	FRECUENCIA	5.8 GHz
POTENCIA	0 dBm	POTENCIA	0 dBm
MODO DE GEN.	WC	SPAN	100 MHz
		RESOLUCIÓN B	500 kHz
		PASOS ÁNGULO	20°

#### **CONCLUSIONES**

En el presente trabajo se cumplieron los objetivos generales y los específicos, concluyendo con los siguientes puntos durante el desarrollo:

- ➤ La descripción del equipo NI PXIe-1075 permite al estudiante el mejor uso del laboratorio; se da a conocer las diferentes partes, conexiones, características y con ayuda del protocolo de utilización y el modelo de prácticas, permite el desarrollo de nuevos proyectos de investigación.
- Las prácticas realizadas con la plataforma LabVIEW, facilitan el aprendizaje de los diferentes sistemas de telecomunicaciones en los procesos de: trasmisión, recepción, análisis y procesamiento de la señal, para un mejor entendimiento de lo visto teóricamente en las distintas cátedras dictadas por los docentes.
- ➤ En los diferentes programas se puede analizar los procesos de digitalización, codificación, modulación, filtrado, demodulación y codificación de las señales.
- La práctica de antenas y propagación, analizan las antenas pertenecientes a la Universidad del Azuay mediante los diagramas de radiación obtenidos, observando las características principales de cada una de las antenas.
- ➤ En cada práctica se introdujo un breve marco teórico para solventar y analizar los resultados obtenidos como son: modulaciones, espectros, diagramas de ojo, constelación y radiación, de los ejercicios desarrollados y de aplicación para los estudiantes.

Entregando como documento final un manual flexible y práctico para estudiantes y docentes, permitiendo el desarrollo de cada práctica para el entendimiento de los procesos de modulación y demodulación en un enlace cerrado de comunicaciones inalámbricas en tiempo real con señales analógicas y digitales.

### RECOMENDACIONES

Como recomendación final se puede decir que el presente documento al ser una guía para el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad del Azuay, presenta programas básicos para la explicación del funcionamiento del equipo NI PXIe-1075 y de los procesos de modulación y demodulación de sistemas de comunicaciones inalámbricas, proponiendo:

- ➤ Incentivar a los estudiantes y docentes al desarrollo de nuevas prácticas en base a los programas propuestas en el presente documento, ya que se entrega los códigos fuente para la modificación de los programas.
- ➤ La investigación de nuevos temas para el desarrollo con el equipo NI PXIe-1075.
- ➤ Desarrollo de prácticas demostrativas por parte de los docentes, al poseer un solo equipo NI PXIe-1075 en la Universidad del Azuay. Para el mejor entendimiento de las cátedras dictadas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- ANDRÉS VANEGAS GUILLÉN. (2011). Diseño e implementación del laboratorio virtual de comunicaciones analógicas y digitales de la Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador.
- COMMUNICATION ELECTRONIC STAR ANTENNA. (1 de Noviembre de 2014). COMMUNICATION ELECTRONIC. Obtenido de COMMUNICATION ELECTRONIC: http://www.hotfrog.in/business/communication-electronic-star-antenna/yagi-directional-antenna-430306
- CONSTANTINE A. BALANIS. (2005). Antenna Theory, Analysis and Design third edition. New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION.
- DANNY CH. (12 de Noviembre de 2013). http://tddumariana.blogspot.com/.
  Obtenido de http://tddumariana.blogspot.com/:
  http://tddumariana.blogspot.com/2013/11/modulacion-de-amplitud-encuadratura-qam.html
- EDISON COIMBRA. (1 de Octubre de 2010). *slideshare*. Obtenido de slideshare: http://es.slideshare.net/mattwex/45-transmision-pasobanda
- ELEMANIA ALTERVISTA. (s.a.). www.elemania.altervista.org. Obtenido de www.elemania.altervista.org: http://www.elemania.altervista.org/telecom/telecom13.html
- GABRIEL LEDESMA. (19 de Marzo de 2015). *Radiación electromagnética*. Obtenido de Radiación electromagnética: http://gabrielledesmab.blogspot.com/
- JORGE IGNACIO ANDREOTTI. (20 de Junio de 2015). Consultor de Telecomunicaciones y Electricidad (CTE). Obtenido de Consultor de Telecomunicaciones y Electricidad (CTE): http://ingenieroandreotti.blogspot.com/2015/06/modulacion-modulation-2daparte.html
- JÓSE LEMOS. (15 de Noviembre de 2008). *clientes.netvisao.pt*. Obtenido de clientes.netvisao.pt: http://clientes.netvisao.pt/jomasole/transmissao.htm
- JULIO MARTÍNEZ, E. S. (4 de Marzo de 2013). *UPV*. Obtenido de UPV: http://www.upv.es/~csahuqui/julio/s500/suple01.pdf
- KAREL SEDRICK JUSTO ACOSTA. (8 de Octubre de 2012). http://tvsatelitaltvlibrefta.blogspot.com/. Obtenido de http://tvsatelitaltvlibrefta.blogspot.com/: http://tvsatelitaltvlibrefta.blogspot.com/2012/12/que-es-la-antena-parabolica.html

- MARTIN REICH. (7 de Noviembre de 2012). *aeromodelismovirtual*. Obtenido de aeromodelismovirtual:
  - http://www.aeromodelismovirtual.com/showthread.php?p=287806
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2008). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: NATIONAL INSTRUMENTS
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Julio de 2008). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/pxie -5450\_1.jpg&title=NI%20PXIe-5450%20&oracleLang=esa
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Julio de 2008). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/pdf/products/us/cat\_PXIe\_5450.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Julio de 2008). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/pdf/manuals/372622a.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Octubre de 2009). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/tutorial/4455/en/
- NATIONAL INSTRUMENTS. (9 de Agosto de 2009). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/pdf/manuals/375026b.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (9 de Agosto de 2009). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/372058N-01/noloc\_wr26476.gif
- NATIONAL INSTRUMENTS. (9 de Agosto de 2009). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/pdf/manuals/374957b.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Febrero de 2010). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/pdf/manuals/372537b.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Abril de 2010). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=202258&mTitle=NI%20PXI-2596&mGallery=set\_ni\_2596
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Abril de 2010). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/pdf/products/us/pxi2596\_2597\_2598\_2599.pdf

- NATIONAL INSTRUMENTS. (Abril de 2010). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/375472A-01/switch/2596\_dual\_6x1\_mux/
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2010). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/pdf/products/us/cat\_PXIe\_5673.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2010). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/371025M-01/noloc\_5673e.gif
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Octubre de 2011). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/371025K-01/loc\_eps\_pxie-5611-block-diagram.gif
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Octubre de 2011). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371025K-01/rfsg/ni\_5611\_block\_diagram/
- NATIONAL INSTRUMENTS. (17 de Octubre de 2012). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/white-paper/3889/es/
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Julio de 2012). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/pdf/manuals/372870d.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (Marzo de 2012). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/372058H-01/loc\_eps\_5601\_bd.gif
- NATIONAL INSTRUMENTS. (24 de Febrero de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/new1.JPG
- NATIONAL INSTRUMENTS. (24 de Febrero de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/new3.JPG
- NATIONAL INSTRUMENTS. (24 de Febrero de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/new4.JPG
- NATIONAL INSTRUMENTS. (24 de Febrero de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/white-paper/4811/es/

- NATIONAL INSTRUMENTS. (24 de Febrero de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://sine.ni.com/images/products/us/pxie-1075\_empty\_l.jpg
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Noviembre de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-335
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Noviembre de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://sine.ni.com/images/products/us/pxie-8133\_1.jpg
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Noviembre de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-267
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Noviembre de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://sine.ni.com/images/products/us/pxie-5622\_l.jpg
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Noviembre de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-248
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Noviembre de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://sine.ni.com/cms/images/datasheet/NI5622Specs-F9.gif
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Noviembre de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/pxi\_5122\_030725\_l.jpg&title=NI%20PXI-5122&oracleLang=esa
- NATIONAL INSTRUMENTS. (6 de Noviembre de 2014). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-241
- NATIONAL INSTRUMENTS. (4 de Mayo de 2015). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de NATIONAL INSTRUMENTS: http://www.ni.com/white-paper/3299/en/
- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. (2013). *UPV*. Obtenido de UPV: http://www.upv.es/antenas/Documentos\_PDF/Notas\_clase/Tema\_1.PDF
- VICENTE GONZÁLEZ RUIZ. (25 de Noviembre de 2013). *Universidad de Almería*. Obtenido de Universidad de Almería: http://www.ual.es/~vruiz/Docencia/Apuntes/Transmission/04-Modulacion/index.html

### **ANEXO 1 SOLUCIONARIO**

# Capítulo 2

Ejercicios de Aplicación: Generación y adquisición de señales reales.

1. Abrir el programa de Adquisición de espectro y configurar los siguientes parámetros. Observar las señales adquiridas y explicar.

Tabla A1. Parámetros para la adquisición del espectro.

Módulo receptor	Pxi1slot16
Nivel de referencia	20 dBm
Frecuencia de inicio	87 MHz
Frecuencia Final	108 MHz
Resolución de ancho de banda	100
Clock source	OnboardClock

### Solución:

Al configurar el programa de adquisición de espectro con los parámetros establecidos, se obtiene el siguiente gráfico en el equipo NI PXIe-1075.

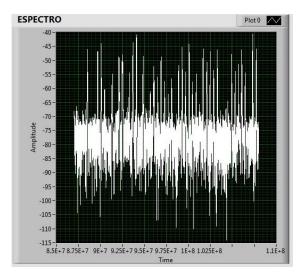


Figura A1. Espectro de radios públicas.

Obteniendo las bandas de frecuencia de radiofonía pública (Radios) en sus diferentes frecuencias y potencias. Demostrando que podemos adquirir no solo frecuencias generadas por el equipo si no señales de medio real.

2. Abrimos los programas de generación de señales y adquisición de espectro y los configuramos con los siguientes parámetros; Explicar lo que sucede.

Tabla A2. Parámetros del Generador.

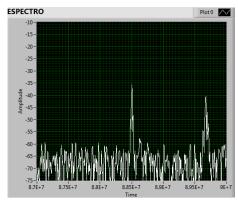
Módulo del generador	Pxi1slot8
Frecuencia central	88.5 MHz
Nivel de potencia	30 dBm
Tipo de generación	CW

**Tabla A3.** Parámetros para la adquisición de espectro.

Módulo receptor	Pxi1slot16
Nivel de referencia	30 dBm
Frecuencia de inicio	87 MHz
Frecuencia Final	90 MHz
Resolución de ancho de banda	10K
Clock source	OnboardClock

### Solución:

Al generar una señal de espectro que está utilizada como en este caso la frecuencia de la radio 88.5 FM, la señal generada por el equipo NI PXIe-1075, se sobrepondrá a la señal de la radio haciendo interferencia, esto sucede porque el equipo genera una señal con una potencia más alta que la que llega de la radio al laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad del Azuay.





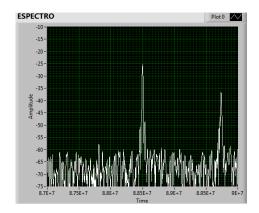


Figura A3. Señal sobrepuesta.

En la Figura A2 se muetra la señal de la radio FM 88.5MHz, y en la Figura A3 se puede ver la señal sobrepuesa al generar la señal en la misma frecuencia con el equipo NI PXIe-1075 pero a una potencia más alta.

# Capítulo 3

Ejercicios de aplicación: Modulación y demodulación AM.

- 1. Determinar por las fórmulas de la modulación AM.
  - a. Las frecuencias de las bandas laterales superior e inferior.
  - **b.** El ancho de banda de la señal modulada.

Para los siguientes parámetros:

**Tabla A4.** Valores para el cálculo de las frecuencias laterales y ancho de banda.

Frecuencia de la	Frecuencia de la	Índice de
portadora	moduladora	modulación
60 MHz	5Mhz	0.5
70MHz	8Mhz	0.8
80MHz	6Mhz	1

a)

 $banda\ superior = f_c\ +\ f_{m(max)}$   $banda\ superior = 60 MHz\ +\ 5 MHz$   $banda\ superior = 65\ MHz$ 

 $banda\ Inferior = f_c - f_{m(max)}$   $banda\ Inferior = 60MHz - 5MHz$   $banda\ Inferior = 55\ MHz$ 

$$B = 2f_{m(max)}$$
$$B = 2 (5MHz)$$

B = 10 MHz

b)

 $banda\ superior = f_c + f_{m(max)}$   $banda\ superior = 70MHz + 8MHz$  $banda\ superior = 78\ MHz$ 

 $banda\ Inferior = f_c - f_{m(max)}$   $banda\ Inferior = 70MHz - 8MHz$   $banda\ Inferior = 62\ MHz$ 

$$B = 2f_{m(max)}$$
$$B = 2 (8MHz)$$
$$B = 16 MHz$$

c)

 $banda\ superior = f_c + f_{m(max)}$   $banda\ superior = 80MHz + 6MHz$   $banda\ superior = 86\ MHz$ 

 $banda\ Inferior = f_c - f_{m(max)}$  $banda\ Inferior = 80MHz - 6MHz$   $banda\ Inferior = 74\ MHz$ 

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

$$B = 2 (6MHz)$$

$$B = 12 MHz$$

2. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla A5. Antena utilizada.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
11	HF-VHF-UHF	25 – 1300 MHz	Discono	2

3. Colocar los parámetros del punto 1 en los programas: MODULACIÓN AM y DEMODULACIÓN AM. Comparar los resultados obtenidos con los cálculos realizados.

#### Solución:

Al configurar los programas con los valores establecidos se obtiene las frecuencias de las bandas laterales a la distancia calculada, determinando que los cálculos esta correctos para la modulación AM como se observa en las siguientes figuras.

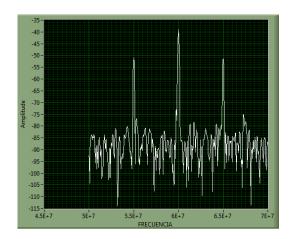


Figura A4. Portadora de 60MHz y sus bandas laterales.

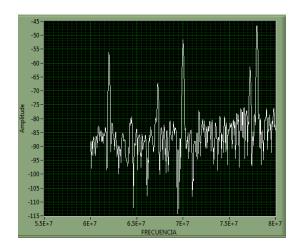


Figura A5. Portadora de 70MHz y sus bandas laterales.

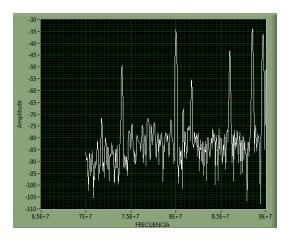


Figura A6. Portadora 80MHz y sus bandas laterales.

**4.** Repetir el punto 2 con la portadora suprimida en los programas de modulación y demodulación. Analizar las señales adquiridas: espectro y modulación.

### Solución:

Al suprimir la portadora en los programas de modulación y demodulación, se observa en las gráficas del espectro de las señales recibidas, que no hay la frecuencia central solo las bandas laterales, esto se puede hacer ya que la portadora no contiene información, toda la información transmitida esta exclusivamente en las bandas laterales.

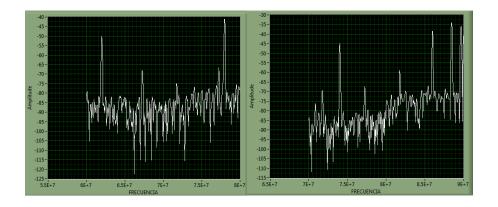


Figura A7. Señales de 70MHz y 80Mhz con portadora suprimida.

Ejercicios de aplicación: Modulación y demodulación FM.

- 1. Determinar por fórmulas de la modulación FM.
  - **a.** El número de frecuencias de las bandas laterales según la tabla de Beseel de primer orden.
  - **b.** La distancia desde la portadora a las bandas laterales significativas.
  - c. El ancho de banda de la señal modulada con la ley de Carson.

Con los siguientes parámetros:

**Tabla A6.** Valores para el cálculo de las frecuencias de las bandas significativas y en ancho de banda.

Frecuencia de la	Frecuencia de la	Frecuencia de
portadora	moduladora $(f_m)$	desviación (Δf)
60 MHz	3Mhz	6Mhz
80MHz	5Mhz	0Mhz
70MHz	4Mhz	2Mhz

a) Para los primeros parámetros calculamos el índice de modulación FM.

$$m = \frac{\Delta f}{fm} = m = \frac{6MHz}{3MHz} = m = 3$$

Para un índice de modulación igual a 3 según la tabla de Bessel se genera 6 bandas laterales significativas.

Primer par de bandas significativas:

$$banda\ superior = f_c + f_m \qquad banda\ Inferior = f_c - f_m$$
 
$$banda\ superior = 60MHz + 3MHz \qquad banda\ Inferior = 60MHz - 3MHz$$
 
$$banda\ superior = 63\ MHz \qquad banda\ Inferior = 57\ MHz$$

Segundo par de bandas significativas:

$$banda\ superior = f_c + 2f_m$$
  $banda\ Inferior = f_c - 2f_m$   $banda\ superior = 60MHz + 2(3MHz)\ banda\ Inferior = 60MHz - 2(3MHz)$   $banda\ superior = 66\ MHz$   $banda\ Inferior = 54\ MHz$ 

Tercer par de bandas significativas:

banda superior = 
$$f_c + 3f_m$$
 banda Inferior =  $f_c - 3f_m$   
banda superior =  $60MHz + 3(3MHz)$  banda Inferior =  $60MHz - 3(3MHz)$   
banda superior =  $69MHz$  banda Inferior =  $51MHz$ 

El ancho de banda necesario es igual a:

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

$$B = 2(6MHz + 3MHz)$$

$$B = 18MHz$$

247

$$m = \frac{\Delta f}{fm} = m = \frac{0MHz}{5MHz} = m = 0$$

Para un índice de modulación igual a 0 solo se muestra el espectro la frecuencia de la portadora.

espectro de la señal = 
$$f_c$$
  
espectro de la señal =  $80MHz$ 

El ancho de banda necesario es igual a:

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

$$B = 2(0MHz + 8MHz)$$

$$B = 16MHz$$

c) Calculamos el índice de modulación FM con los parámetros dados.

$$m = \frac{\Delta f}{fm} = m = \frac{2MHz}{4MHz} = m = 2$$

Para un índice de modulación igual a 2 se generan 4 bandas laterales.

Primer par de bandas significativas:

$$banda\ superior = f_c + f_m \qquad banda\ Inferior = f_c - f_m$$
 
$$banda\ superior = 70MHz + 4MHz \qquad banda\ Inferior = 70MHz - 4MHz$$
 
$$banda\ superior = 74\ MHz \qquad banda\ Inferior = 66\ MHz$$

Segundo par de bandas significativas:

$$banda\ superior = f_c + 2f_m$$
  $banda\ Inferior = f_c - 2f_m$   $banda\ superior = 70MHz + 2(4MHz)\ banda\ Inferior = 70MHz - 2(4MHz)$   $banda\ superior = 78\ MHz$   $banda\ Inferior = 62\ MHz$ 

El ancho de banda necesario es igual a:

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

$$B = 2(2MHz + 4MHz)$$

$$B = 12MHz$$

2. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

**Tabla A7.** Antena utilizada.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
11	HF-VHF-UHF	25 - 1300 MHz	Discono	2

3. Colocar los parámetros del punto 1 en los programas: MODULACIÓN FM y DEMODULACIÓN FM. Comparar los resultados obtenidos con los cálculos realizados.

### Solución:

Al configurar el equipo con los parámetros establecidos se puede observar las bandas generadas en la modulación FM, según la tabla de Bessel de primer orden, sin embargo hay que recordar que solo se calcula las bandas más significativas, puesto que en la modulación FM se genera un número infinito de bandas laterales y por lo tanto el ancho de banda también es infinito, esto hace que el ancho de banda requerido sea mayor para la modulación FM que en la modulación AM.

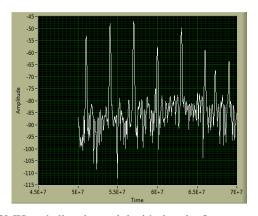


Figura A8. Portadora de 60MHz e índice de modulación igual a 3.

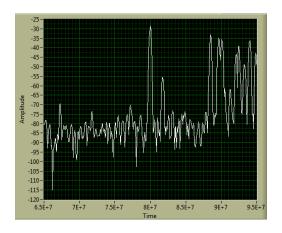


Figura A9. Portadora de 70MHz e índice de modulación igual a 0.

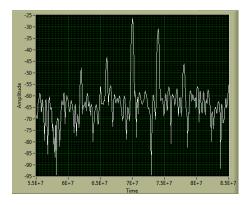


Figura A10. Portadora de 80MHz e índice de modulación igual a 2.

- **4.** En el modulador configurar para obtener un índice de modulación m=1, y determinar los siguientes valores.
  - a. Conjunto de frecuencias laterales significativas.
  - b. Ancho de banda según la ley de Carson.
  - c. Confirmar los valores en el demodulador FM.

Para que el índice de modulación sea igual a 1 la frecuencia de desviación y la frecuencia de la moduladora tienen que tener el mismo valor, para nuestro caso son igual a 2 MHz.

$$m = \frac{\Delta f}{fm} = m = \frac{2MHz}{2MHz} = m = 1$$

 a) Según la tabla de besel para un índice de modulación igual a 1 se producen 2 pares de bandas laterales que son igual a:

$$banda\ superior = f_c + f_m$$
  $banda\ Inferior = f_c - f_m$   $banda\ superior = 70MHz + 2MHz$   $banda\ Inferior = 70MHz - 2MHz$   $banda\ superior = 72\ MHz$   $banda\ Inferior = 68MHz$ 

Segundo par de bandas significativas:

$$banda\ superior = f_c + 2f_m$$
  $banda\ Inferior = f_c - 2f_m$   $banda\ superior = 70MHz + 2(2MHz)\ banda\ Inferior = 70MHz - 2(2MHz)$   $banda\ superior = 74\ MHz$   $banda\ Inferior = 66\ MHz$ 

**b**) El ancho de banda necesario según la ley de Carson es igual a:

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

$$B = 2(2MHz + 2MHz)$$

$$B = 8MHz$$

c) En el demodulador se observan las bandas laterales generadas para un índice de modulación igual a 1.

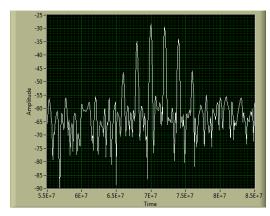


Figura A11. Índice de modulación igual a 1.

Ejercicios de aplicación: Modulación y demodulcaión ASK.

1. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla A8. Antena utilizada.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

**2.** Configurar el modulador y demodulador con los siguientes parámetros y observar la constelación y diagramas de ojos, explicar.

### Modulador.

Tabla A9. Parámetros para el modulador ASK.

Frecuencia portadora	500MHz
Nivel de potencia	-5
Muestras por símbolo	16
M - ASK	4
Alpha	0.50

# Demodulador.

Tabla A10. Parámetros para el demodulador ASK.

Frecuencia portadora	500M
Nivel de referencia	0
M-ASK	4
Muestras por simbolo	4
Tx Filter	0.50

Al configurar el equipo para una modulación 4-ASK, se observan los cuatro puntos de la constelación distribuidos a la misma amplitud. Al igual que en el diagrama de ojo se observa los cuatro niveles de las combinaciones de los bits, esto lo hace más propenso al ruido que en una transmisión de 2-ASK, recordando que la distribución de los puntos en la modulación ASK es siempre de un nivel de 0 a 1, mientras más alta sea la transmisión multinivel más propenso será al ruido.

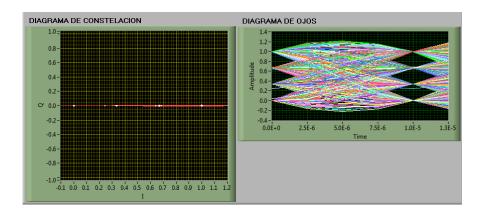


Figura A12. Diagramas de ojo y constelación para 4-ASK.

En el espectro de la señal ASK solo se puede observar la potencia a la que se está receptando la señal portadora.

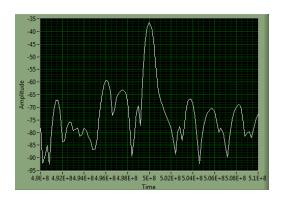


Figura A13. Espectro de la señal 4-ASK.

Ejercicios de aplicación: Modulación y demodulación FSK.

1. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla A11. Antena utilizada.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

2. Configurar el modulador y demodulador con los siguientes parámetros, observar la constelación, diagramas de ojo y explicar.

### Modulador.

Tabla A12. Parámetros para el moduador FSK.

Frecuencia Portadora	500M
Nivel de potencia	-5
M-FSK	4
Samples per Symbol	16
Desviación FSK	15000

### Demodulador.

Tabla A13. Parámetros para el demodulador FSK.

Frecuencia portadora	500M
Nivel de potencia	0
M-FSK	4
Tx Filter Parámetro	0.50
Desviación FSK esperada	15000

En la modulación FSK, no existe constelación, mostrando solo el diagrama de ojo, donde se puede ver las combinaciones de bits en la modulación multinivel con señales de ruido, esto se debe a que al modular una señal en 4-FSK se hace más propenso al ruido por el número de bits transmitidos en un mismo cambio de frecuencia.

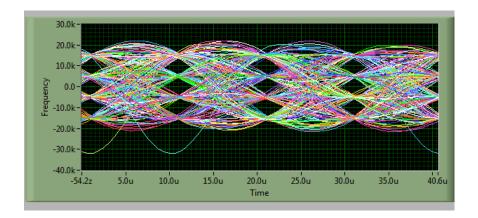


Figura A14. Diagrama de ojo de la señal 4-FSK.

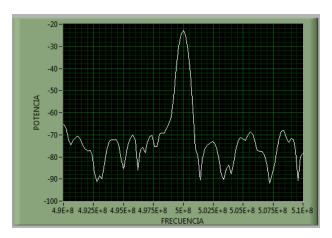


Figura A15. Espectro de la señal 4-FSK.

Ejercicios de aplicación: Modulación y demodulación PSK.

1. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla A14. Antena utilizada.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

2. Configurar el modulador y demodulador con los siguientes parámetros y explicar los resultados.

### Modulador.

Tabla A15. Parámetros de configuración del modulador PSK.

Frecuencia portadora	500MHz
Muestras por símbolo	16
Nivel de potencia	-5
M-PSK	8
Alpha	0.50

### Demodulador.

Tabla A16. Parámetros de configuración del demodulador PSK.

Frecuencia de la portadora	500M
Nivel de referencia	0
Tx filter Alpha	0.50
M-PSK	8
Muestras por símbolo	4

Al observar el diagrama de constelación de la modulación 8-PSK se hace evidente la distribución de los puntos de la constelación a 8 fases distintas, pero todas a la misma amplitud, haciendo que el sistema tenga los puntos de la constelación más cercanos, esto hace que el sistema sea más propenso a interferencias. En el diagrama de ojo se hace ineficiente el número de muestras tomadas para reconstruir la señal, haciendo que se produzca errores en la demodulación, por lo que no se puede apreciar claramente el ojo de la señal recibida.

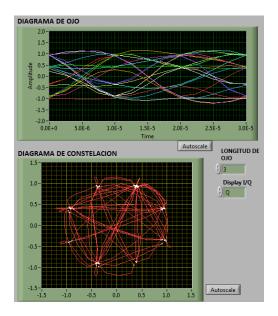


Figura A15. Diagrama de ojo y constelación para 8-PSK.

El espectro de la señal solo se puede apreciar la potencia recibida de la señal.

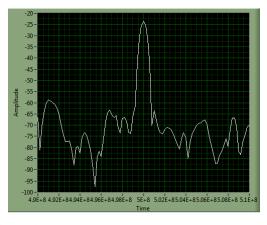


Figura A16. Espectro de la señal 8-PSK.

Ejercicios de aplicación: Modulación y demodulación QAM.

1. Conectar las antenas en el transmisor y receptor del NI PXIe-1075.

Tabla A17. Antena utilizada.

Ítem	Antena Base	Rango Frecuencia	Tipo	N° Antenas
2	UHF	500 - 866 MHz	Yagi	2

**2.** Configurar el modulador y demodular QAM con los siguientes parámetros y explicar los resultados.

### Modulador.

Tabla A18. Parámetros de configuración para el modulador QAM.

Frecuencia Portadora	500MHz
Nivel potencia	-5
QAM M-ary	32
Alpha	0.50
Samples per Symbol	16

### Demodulador.

Tabla A19. Parámetros de configuración para el demodulador QAM.

Frecuancia portadora	500MHz
Nivel de referencia	0
M-QAM	32
Número de simbolos	500
Tx Filter Alpha	0.50

La distribución de los puntos de la constelación están mejor distribuidos, por lo que la modulación QAM, al tener cambios tanto de amplitud como de fase, es más eficiente a la hora de transmitir más bits a la vez, siendo un sistema menos propenso al ruido del medio. En el diagrama de ojo se puede observar las líneas de las combinaciones de bits sin ruido alguno, a pesar de ser una combinación de 32-QAM, por lo que en cada cambio de fase y amplitud se mandan 5 bits.

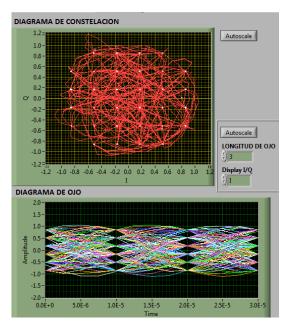


Figura A17. Diagrama de ojo y constelación para una modulación 32-QAM.

El espectro de la señal, al igual que en todas las modulaciones digitales, solo se puede apreciar la potencia de la señal recibida.

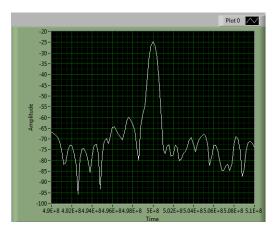


Figura A18. Espectro de la modulación 32-QAM.

# Capítulo 4

Ejercicios de aplicación: Diagrama de radiación.

- **1.** Medir la intensidad de potencia radiada.
- 2. Analizar el diagrama cartesiano de potencia radiada
- 3. Analizar el diagrama polar de potencia radiada.

Con los siguientes parámetros con una antena de panel de 5.8 GHz.

**Tabla A20.** Parámetros para el generador de señales y el programa de radiación de antenas para una antena de panel de 5.8GHz.

GENERADO SEÑALE		RADIACIÓN DE ANTENAS	
MODULO TX	Pxi1slot8	MODULO RX	Pxi1slot16
FRECUENCIA	5.8 GHz	FRECUENCIA	5.8 GHz
POTENCIA	0 dBm	POTENCIA	0 dBm
MODO DE GEN.	WC	SPAN	100 MHz
		RESOLUCIÓN B	500 kHz
		PASOS ÁNGULO	20°

Para la antena de panel de la Universidad del Azuay se hacen los respectivos cálculos para las regiones de campo de la antena que son igual a:

Datos de la antena:

D = 0.3m Longitud de la antena.

$$\lambda = \frac{c}{f_p} = \frac{3x10^8 m/s}{5.8x10^9 Hz} = 0.0517 m \text{ Longitud de onda a la frecuencia de 5.8GHz.}$$

• Región de campo cercano reactivo:

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

$$R_1 = 0.62 \sqrt{\frac{(0.3m)^3}{0.0517m}}$$

$$R_1 = 0.44m$$

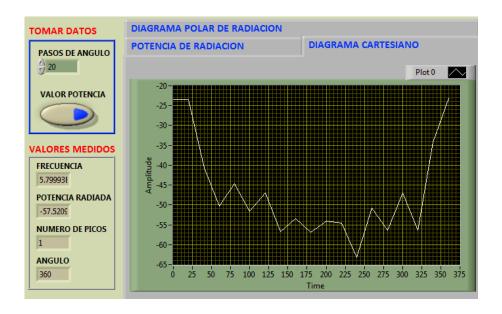
• Regiones de radiación de campo cercano (Fresnel):

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda}$$

$$R_2 = \frac{2(0,3)^2}{0,0517}$$

$$R_2 = 3,48 m$$

Para obtener el diagrama de radiación de la antena de panel de 5.8GHz las antenas de recepción y transmisión deben de estar separadas una distancia de 3,5m (Región de Fresnel), para capturar un buen diagrama de radiación, obteniendo los siguientes resultados.



**Figura A19.** Diagrama de radiación cartesiano para una antena de panel con una frecuencia de 5.8GHz.

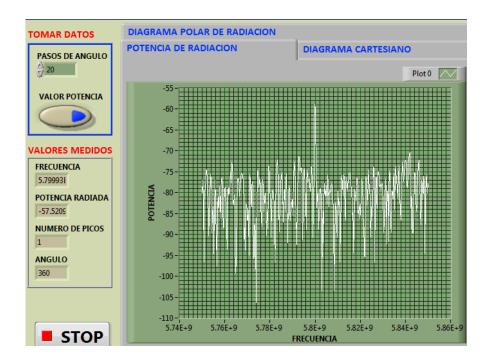


Figura A20. Espectro de la señal recibida de una antena de panel con una frecuencia de 5.8GHz.

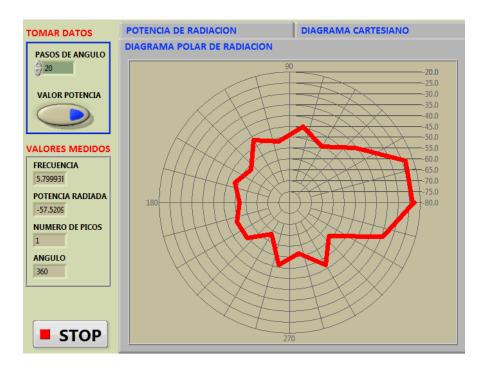


Figura A21. Diagrama de radiación polar para una antena de panel con una frecuencia de 5.8GHz.

En el diagrama polar se puede observar los diferentes lóbulos del diagrama de radiación, teniendo el lóbulo principal a su máxima radiación cuando las antenas de transmisión y recepción están de frente.