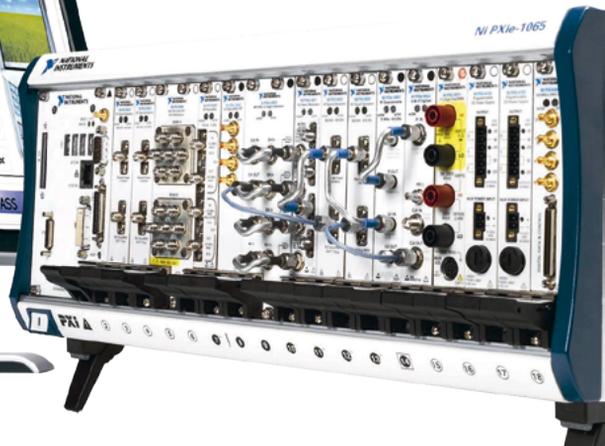




Plataforma NI PXI

FARID ALEXANDER
MELÉNDEZ PERTUZ



libro digital



UNIVERSIDAD
DE LA COSTA
1970

Plataforma

NI PXI

Meléndez Pertuz, Farid Alexander
Plataforma NI PXI / Farid Alexander Meléndez Pertuz. – Barranquilla,
Educosta, 2015
80 páginas (Ebook, Formato pdf)
ISBN: 978-958-8921-15-0

1. Interfases con el usuario (Sistemas para computador)
2. Sistemas operacionales (Computadores) 3. Programación (Computadores electrónicos digitales)

004.6 M519

Co-BrCuC

Plataforma NI PXI

Farid Alexander Meléndez Pertuz,



UNIVERSIDAD
DE LA COSTA
1970

2015



Plataforma NI PXI

Autor: **Farid Alexander Meléndez Pertuz**

CORPORACIÓN UNIVERSIDAD
DE LA COSTA CUC
Barranquilla - Colombia - Sur América

ISBN: 978-958-8921-15-0

Primera Edición
Editorial Universitaria de la Costa EDUCOSTA
Corporación Universitaria de la Costa CUC
Calle 58 No. 55-66
Teléfono: (575) 344 3597
educosta@cuc.edu.co

Coordinación Editorial:
Clara Inés De la Roche

Diagramación y Diseño:
Dolores López

Hecho el depósito que exige la ley.

©**Todos los derechos reservados, 2015**

Esta obra es propiedad intelectual de sus autores y los derechos de publicación han sido legalmente transferidos al editor. Queda prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright©

FUNDADORES
CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

EDUARDO CRISSIEN SAMPER
RUBÉN MAURY PERTUZ (q.e.p.d.)
NULVIA BORRERO HERRERA
MARÍA ARDILA DE MAURY
RAMIRO MORENO NORIEGA
RODRIGO NIEBLES DE LA CRUZ (q.e.p.d.)
MIGUEL ANTEQUERA STAND

PERSONAL DIRECTIVO
CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

TITO JOSÉ CRISSIEN BORRERO Rector	HERNANDO ANTEQUERA MANOTAS Vicerrector Financiero
MARIO MAURY ARDILA Director Departamento de Posgrados	ALFREDO GÓMEZ VILLANUEVA Decano Facultad de Arquitectura
FEDERICO BORNACELLI VARGAS Secretario General	JAVIER MORENO JUVINAO Decano Facultad de Ciencias Económicas
GLORIA CECILIA MORENO GÓMEZ Vicerrectora Académica	ALFREDO PEÑA SALOM Decano Facultad de Derecho
HENRY MAURY ARDILA Vicerrector de Investigaciones	MILDRED PUELLO SCARPATI Decana Facultad de Psicología
JORGE MORENO GÓMEZ Vicerrector de Extensión	FAIRUZ VIOLET OSPINO VALDIRIS Decana Facultad de Ingeniería
JAIME DÍAZ ARENAS Vicerrector Administrativo	NADIA JUDITH OLAYA CORONADO Decana Facultad de Ciencias Ambientales
JESSICA LYNN CRISSIEN BORRERO Vicerrectora de Bienestar	JANETH SAKER GARCÍA Decana Facultad de Humanidades

Contenido

INTRODUCCIÓN	8
PXI	11
Los módulos	14
El chasis	17
El controlador	24
El software	26
El generador de señales	28
Esquemas básicos de modulación	37
El analizador de señales	61
Visualización de señales en tiempo y frecuencia	67
CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	76

INTRODUCCIÓN

El desarrollo científico de la sociedad actual y el ritmo vertiginoso que se ha impuesto en los avances tecnológicos, destacándose el campo de las comunicaciones, en gran parte ha sido consecuencia del progreso de la instrumentación de medida, lo cual ha permitido visualizar de mejor manera los fenómenos a todo nivel, llevando a los ingenieros a acceder de forma clara y precisa a la comprobación teórica que ha permitido dar los saltos conceptuales reflejados en los productos ofrecidos en el campo hoy día, que para generaciones pasadas resultaban difíciles de desarrollar [1].

En este panorama de furor tecnológico, resalta la aparición de plataformas para pruebas y medidas automatizadas que, asociadas a equipos de cómputo, permiten la verificación experimental de todo tipo de variables, con interfaces gráficas propias de los sistemas operativos actuales y lenguajes de programación de alto nivel para hacer funcionar el hardware asociado, y que permiten el acercamiento al fenómeno a medir o comprobar sin la complejidad asociada a la proximidad del concepto ejecutorio del núcleo de procesamiento de la máquina computacional, como ocurriría en caso de utilizarse lenguajes de bajo nivel [2].

A nivel académico, estas plataformas de medida han permitido la caracterización de todo tipo de señales electromagnéticas presentes en sistemas

comerciales de variados campos (automatización, control, comunicaciones, bioingeniería), llevando a los investigadores a hacer significativos aportes como la expansión de parámetros de estándares o el desarrollo de prototipos flexibles dada la facilidad de cambios de configuración y desempeño gracias al empleo de interfaces gráficas amigables [3]. En el diseño también se han conseguido valiosos avances por parte de la academia; se tienen informes de soluciones a problemas de la industria apoyados en estas plataformas, y que fueron desarrolladas en los laboratorios de prestigiosas universidades de todo el mundo [4].

En Colombia, a nivel educativo, es poco lo que se ha podido avanzar en el campo de la implementación de soluciones de prueba y medida automatizadas debido a la escasez de equipos de este nivel, ya que su adquisición puede resultar costosa. Los laboratorios de la mayoría de las universidades mantienen su instrumentación física convencional que, aunque válida aún hoy día, limita el avance en investigación pues en el caso de las comunicaciones, para citar un ejemplo, con equipos de prueba y medida avanzada se pueden generar señales de altas frecuencias, ni siquiera detectables por muchos de los instrumentos de uso común en la academia local.

Para empezar a superar este rezago tecnológico, el programa de Ingeniería Electrónica de la Corporación Universidad de la Costa (CUC) adquirió en el año 2010 una de estas avanzadas plataformas de instrumentación para pruebas y medidas del fabricante National

Instruments: la PXI. La plataforma obtenida por la CUC, está orientada, por los módulos asociados, al campo de las comunicaciones; robusta en cuanto a generación y análisis de señales, con un amplio rango de operación y medida. Con esta adquisición, la CUC entra a figurar en el panorama nacional como una de las instituciones que cuenta en sus laboratorios con una herramienta de este tipo, y los investigadores del programa de ingeniería electrónica deben prepararse para la puesta en marcha de la misma y el inicio de sencillos proyectos de generación y análisis de señales que sean el punto de partida en cuanto a su utilización para llegar a la realización de significativos aportes al campo, pues el compromiso con la sociedad es impactar positivamente contribuyendo de alguna manera a mejorar su calidad de vida.

El presente trabajo cobra importancia en la medida en que se entienda que el instrumento adquirido no es del tipo “conecte y úselo” o “lea la guía del usuario”, lejos de eso, es un complejo conjunto de componentes que van a interactuar de la forma deseada, siempre que se tenga claro el concepto de cada una de sus partes constitutivas. Por ser una herramienta utilizada para una aplicación final, posee un sinnúmero de aplicaciones; como consecuencia de ello no existe un manual que describa la operación del conjunto, aunque sí se suministran kits de herramientas a nivel de software para ejecución de funciones básicas con LabVIEW y ejemplos de aplicaciones, en este caso de los procesos de las comunicaciones, que resultan de suma utilidad, y que combinados pueden facilitar la realización de operaciones más avanzadas como moduladores digitales y codificadores [5].

PXI

Se refiere a *PCI* (PCI: Peripheral Component Interface) *eXtensions for Instrumentation* y es un estándar introducido en 1998, desarrollado por National Instruments, esencialmente para pruebas y medidas automatizadas implementado en una plataforma modular. De esta manera, el estándar resulta muy versátil y abierto a recibir módulos de múltiples fabricantes en las carcasas asociadas en factor de forma de 3 unidades de Rack (U), o sea, 100 mm x 160 mm o 6U, es decir, 233.35 mm x 160 mm.

PXI está basado en compactPCI (cPCI) y sus aspectos mecánicos están establecidos por especificaciones Eurocard (ANSI 310-C, IEC-297, IEEE 1101.1, IEEE 1101.10, y P1101.11). Eurocard, como formato estándar para tarjetas de circuito impreso, es quien establece el subrack (sub-bastidor) y la forma en que éste recibe las tarjetas o módulos en sus ranuras, viéndose éstas como libros en un estante que se deslizan hasta alinearse con la parte frontal. En la parte trasera de las tarjetas se encuentra un conector que se adapta a un backplane (plano trasero), que es el encargado de cerrar el sub-bastidor. Esto se entiende mejor mirando la Fig. 1 [6].

Eurocard no define el tipo de conector ni las señales presentes en el plano trasero o en las tarjetas, sólo se encarga de los aspectos mecánicos, es decir, el tamaño de los conectores, la amplitud de las ranuras de desplazamiento, el redondeo a unidades de rack, etc.

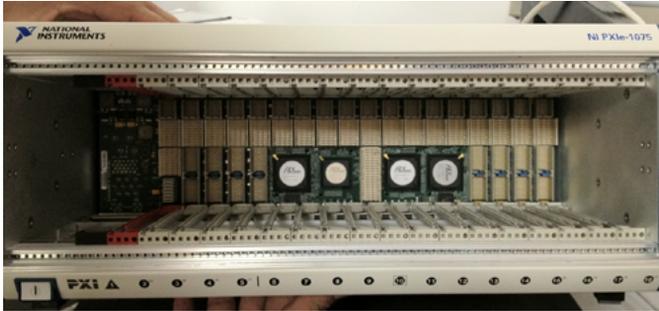


Fig. 1. Rack o sub-bastidor.

En la actualidad existe un consorcio internacional independiente denominado *PXI System Alliance* (PXISA) que se encarga de promover y mantener el estándar y su especificación, así como de asegurar la compatibilidad entre los diversos fabricantes que aportan a éste sus desarrollos.

El crecimiento en su uso ha sido rápido desde la adopción del estándar, según el estudio de Frost and Sullivan Instrumentación Modular (2011) se espera que el mercado de la instrumentación PXI crezca a una tasa compuesta de crecimiento anual del 18,1% durante los próximos 6 años. Más de 56 compañías de todo el mundo son miembros de PXISA, entre los que se destacan National Instruments, Pickering, Gigatronics y muchas otras que enriquecen constantemente el estándar con productos y plataformas orientadas a diversos campos, como son las comunicaciones, medidas basadas en equipos de cómputo, ciencias de la vida, análisis químico, automatización y muchos otros.

La especificación del estándar incluye la descripción de los módulos y la descripción de hardware y software; constantemente se está sometiendo a revisiones para hacerlo más compatible con tecnologías ya existentes y con nuevos desarrollos [7]. La adopción de este estándar ha traído al campo de la investigación los siguientes beneficios [8], según PXISA:

Estándar abierto, varios proveedores: PXI es una plataforma de desarrollo útil para sistemas de prueba automatizados. Hay varias marcas que ofrecen una amplia gama de módulos de instrumentación con más de 1500 productos PXI disponibles en la actualidad. Esto permite su incorporación a diversos campos de la investigación, contando con una sola plataforma.

Pequeño, compacto y robusto: para las aplicaciones industriales que requieren control embebido, PXI y un sistema operativo en tiempo real o un sistema operativo no determinístico (Windows, Mac, Linux) ofrecen una buena solución. El chasis de la plataforma resulta muy robusto y pequeño, lo cual es ventajoso para implementar soluciones industriales.

Amplia selección de instrumentos y módulos PXI: osciloscopios, multímetros, generadores de forma de onda, analizadores de RF y conmutadores multiplexores son sólo algunos de los módulos de instrumentación de la gran variedad disponible en la actualidad para PXI. Además, se integran estrechamente movimiento y visión en el sistema para garantizar el mayor rendimiento posible.

Estrecha integración: se puede lograr un mayor grado de integración entre los instrumentos de prueba y medida con PXI. Además de más de 1150 módulos de medida, PXI también le ofrece formas sencillas de integrar GPIB (General Purpose Interface Bus), VME (VERSA Module Eurocard bus), VXI (VME eXtensions for Instrumentation) a instrumentación completa en cualquier sistema.

Bajo costo: Considerando su pequeño tamaño y una estrecha integración, los módulos PXI y sus sistemas resultan a menudo de más bajo costo por el alto nivel de productividad que permiten en comparación con otras tecnologías para soluciones industriales más antiguas.

Un sistema PXI completo comprende: los módulos, el chasis, el controlador y el software. Éstos serán explicados a continuación:

1. Los módulos

Son las tarjetas que ofrecen el hardware específico para la aplicación a desarrollar. Se acomodan de forma deslizante en las ranuras del chasis dejando, hacia la parte externa, los conectores que corresponden a entradas y salidas, dependiendo de cada módulo. El aspecto físico de los módulos se aprecia en la Fig. 2.



Fig. 2. Módulos PXI.

Mecánicamente, los módulos pueden obtenerse con factor de forma de 3U o 6U (U: Unidad de rack), dependiendo de la plataforma a la que se vayan a asociar. Actualmente, se consiguen en el mercado módulos con conectores que permiten ser utilizados en chasis PXI y PXI Express, que es la última adición tecnológica a la plataforma y que ha supuesto mejoras en ancho de banda y características de tiempo y sincronización [9] [10]. Más adelante se aclarará mejor este punto. En la parte delantera inferior de los módulos, como se observa en la Fig. 2, se encuentra una manija que sirve para eyección e inserción de los mismos, la cual está definida por el estándar IEEE 1101.10 .

La Fig. 3 muestra la forma física de un módulo PXI 3U y la variación del conector para el paso a tecnología *express*. Las primeras especificaciones del estándar establecían dos conectores, J1 y J2, para ranuras PXI periféricas, pero posteriores revisiones determinaron el cambio a tecnología PXI Express mediante la inclusión de un conector más pequeño como reemplazo al J2 tradicional llamado eHM (express Hard Metric) y la creación de una ranura para módulos conocida como *híbrida*. La adopción de esta tecnología ha permitido la integración de señales PCI *Express* al bus PXI, lo cual trajo de la mano el sustancial aumento del ancho de banda del plano trasero (*backplane*) de la plataforma, de los anteriores 132 Mbps a 6 Gbps [9].

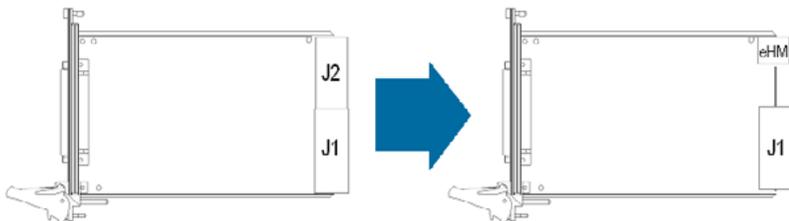


Fig. 3. Modificación del conector de un módulo PXI basado en PCI para compatibilidad con ranura híbrida [11].

Fabricantes como National Instruments garantizan a sus consumidores que se mantendrá aún la plataforma PXI tradicional y que se seguirá invirtiendo en el desarrollo de nuevos productos para el desarrollo de

aplicaciones futuras. También es posible el cambio del conector J2 por el eHM (los fabricantes ofrecen este servicio), y aunque algunos fabricantes aseguren que en la mayoría de los casos resulta innecesario, ya que dicen que en el proceso de fabricación de los chasis PXI Express actuales aún se mantienen ranuras PXI periféricas compatibles con el conector J2, esto no resulta tan acertado, pues se observa que en últimos modelos, como el chasis PXIe-1075, no se conservaron ranuras compatibles con J2 y hacen obligatorio el cambio al conector eHM.

Actualmente se ofrecen en el mercado, por parte de los miembros de PXISA, módulos para diversas aplicaciones, entre las que se destacan: procesamiento digital de señales, adquisición de imágenes, entradas y salidas analógicas, conmutación, generación de señales y análisis de señales que permiten ampliar el campo de acción del estándar y sus plataformas.

2. El chasis

El sub-bastidor o chasis, que aloja los módulos y el plano trasero que conforman el hardware de la plataforma, es parte fundamental del sistema y responde a las especificaciones Eurocard antes mencionadas (ANSI 310-C, IEC-297, IEEE 1101.1, IEEE 1101.10 y P1101.11). El aspecto físico de un chasis del fabricante National Instruments, sin módulos insertados, puede verse en la Fig. 4.

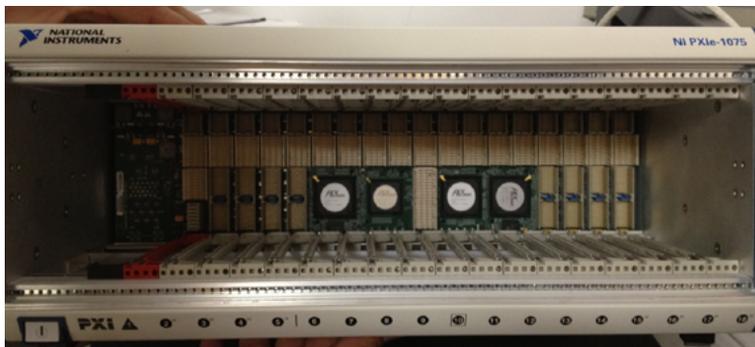


Fig. 4. Chasis PXI.

El plano trasero es la tarjeta que aloja los conectores donde se acoplarán los módulos al ser deslizados hasta el final en las ranuras de ampliación del sub-bastidor, e incluye, según la especificación y tecnología, el bus PCI así como buses de temporización y disparo. La Fig. 5 muestra tres ejemplos de planos traseros.



Fig. 5. Planos traseros para plataformas PXI [12].

En el plano trasero se encuentran el bus PCI, un reloj de referencia de sistema dedicado de 10 MHz, un bus de disparo PXI, un bus de disparo en estrella y un bus local encargado de la interconexión de todas las ranuras, cumpliendo así funciones de temporización, sincronización y comunicación. En el diagrama de bloques de la Fig. 6 se aprecia esta configuración.

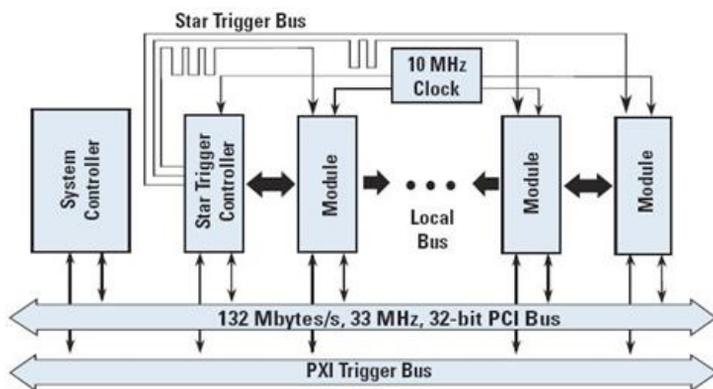


Fig. 6. Buses de temporización y disparo PXI [13].

El advenimiento de PXI Express trajo de la mano la utilización de un reloj de sistema diferencial de 100 MHz, señalización diferencial y señal diferencial de disparo *Star*. La señal de disparo *Star* (PXI DSTAR) agrega alto desempeño a la sincronización (también puede hacerse con el bus *trigger* “tradicional”), garantizando un retardo de propagación no mayor de 5 nanosegundos (ns) y retardo inter modular inferior a 1 ns. La utilización de señales diferenciales trae como ventaja principal la alta inmunidad al ruido y a interferencias electromagnéticas, lo cual

facilita la transmisión de datos a más alta velocidad [14]. El fabricante miembro de PXISA, National Instruments, explica: “Para llevar a cabo esta acción, el Star Trigger está diseñado de tal manera que las longitudes de los cables que conectan la ranura controladora a cada una de las ranuras son idénticas. El Star Trigger ha sido probado con señales TTL de hasta 105MHz” [15]. Esta configuración se aprecia en el diagrama de bloques de la Fig. 7.

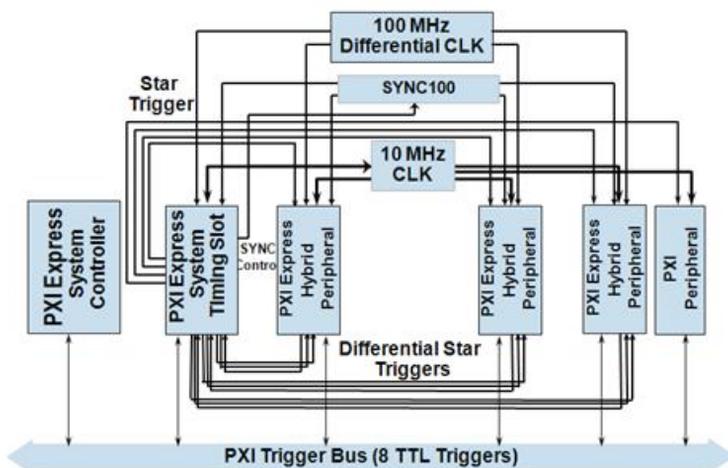


Fig. 7. Buses de temporización y disparo PXI Express [13].

El plano trasero aloja también los conectores por medio de los cuales se integran los módulos al bus. En este punto, debe recordarse que PXI es una tecnología basada en CompactPCI, de quien adoptó el conector de alta densidad de 2mm de paso, que

cumple con la norma IEC-1076 (IEC: International Electrotechnical Commission), estándar internacional, y es fabricado por múltiples proveedores, incluyendo AMP, Framatome, Burndy y ERNI. Con la llegada de la tecnología CompactPCI Express, base de PXI Express, se adoptaron algunos cambios en el conector del plano trasero y los módulos. Los primeros modelos de chasis *express* mantuvieron ranuras para compatibilidad con módulos periféricos PXI, característica conocida como *legacy*, pero en la actualidad sólo mantienen ranuras PXI Express e híbridas. Las ranuras PXI periféricas híbridas, que se muestran a continuación en la Fig. 8, pueden aceptar módulos periféricos PXI Express, tarjetas CompatPCI de 32 bits o módulos PXI compatibles con ranura híbrida [11].

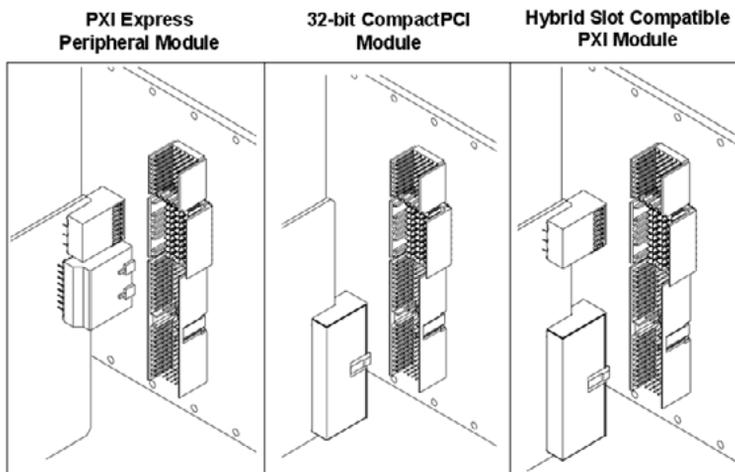


Fig. 8. Una ranura PXI Express híbrida acepta módulos PXI Express periféricos, tarjetas CompactPCI de 32 bits y módulos PXI compatibles con ranura híbrida [11].

La configuración de un plano trasero de un chasis PXI Express 1075 actual se muestra en la Fig. 9, donde se aprecia: una ranura para controlador embebido, ocho ranuras híbridas, nueve ranuras PXI Express y una ranura para temporización de sistema. Una de las ranuras PXI Express (en este caso la 10), tiene una extensión en el conector del backplane que permite su uso para temporización del sistema (*systemtiming slot*), por lo que se tienen en total 18 ranuras 3U en este chasis. Esta temporización de sistema se describirá más adelante.

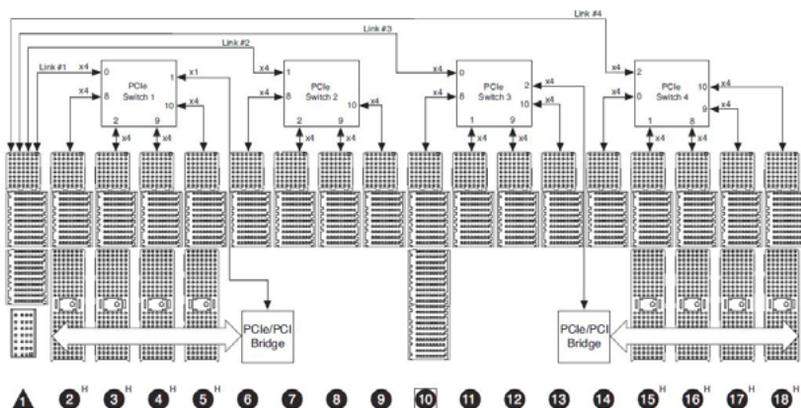


Fig. 9. Plano trasero del chasis PXIe-1075 [16].

Siguiendo con este plano trasero que resulta de los más actuales, por lo que se tomará de ejemplo para el contenido del presente trabajo, se observa claramente en el diagrama, cuatro conmutadores PCI Express para suministrar el ancho de banda adecuado a cada ranura y dos puentes para el soporte PCI Express a PCI, necesario para “atender” los dispositivos vinculados a esas ranuras

que son compatibles con periféricos PXI. Al estar basado en compactPCI (versión industrial de PCI, con la notable diferencia de permitir mayor número de ranuras de expansión), PXI es compatible desde el punto de vista eléctrico y a nivel de protocolos con su auspiciador. Para comprender mejor el significado de las especificaciones x1 y x4, se cita al fabricante National Instruments que de forma muy clara explica en su web: “Con PCI Express, los datos son enviados de manera serial a través de pares de conexiones de transmisión y recepción llamadas líneas, las cuales permiten la transferencia de datos a 250 MB/s por dirección. Se pueden agrupar múltiples líneas juntas en enlaces x1 (“por uno”), x2, x4, x8, x12, x16 y x32 para aumentar el ancho de banda de la ranura. Por ejemplo, una ranura x16 podría tener ancho de banda de 4 GB/s por dirección (250 MB/s * 16)” [11].

De esta manera, se observa para este caso, que este chasis dedica 4 GBps para atender las 17 ranuras PXI Express e híbridas, y por medio de los puentes PCIe/PCI puede atender las necesidades de 8 periféricos PXI a su máxima velocidad de transmisión, según especificación compactPCI, o sea, 132 MBps en bus de 32 bits, que, como se vio anteriormente, es el ancho de bus de los periféricos que se podrían conectar a una ranura híbrida.

En una ranura para temporización se puede conectar un módulo que mejora la capacidad de sincronización del sistema, generando y encaminando señales de tiempo y disparo a los dispositivos en el chasis, a la vez que permite exportar éstas a otros chasises PXI (Multichassis Synchronization). Puede incluir relojes de referencia de

alta estabilidad y permite aprovechar al máximo las capacidades de los buses *trigger* y *startrigger* de la plataforma.

3. El controlador

Los chasises PXI por lo general cuentan con una ranura para controlador de sistema embebido, esta es la ranura que se encuentra más a la izquierda, y diversos fabricantes ofrecen controladores que permiten hacer al sistema más manejable en caso de transporte, reduciéndolo todo a un solo paquete. Aparte de esta opción, también se puede controlar el sistema por PC externa o PC portátil, dependiendo de las necesidades del usuario. Un controlador embebido integra todos los componentes estándar de un computador en un solo módulo acomodable en el chasis, ofreciendo todas las prestaciones de un PC de escritorio o portátil, esto es, salida de video, puertos USB, Ethernet, teclado, mouse y todo aquello con lo que se puede contar en un PC normal. Generalmente, también permite la instalación del sistema operativo Microsoft Windows en sus últimas versiones, o sistemas en tiempo real ofrecidos por algunos desarrolladores (como LabVIEW Real-Time de National Instruments).

En la Fig. 9, mostrada atrás, se aprecia que la ranura para el controlador de sistema (ranura 1) es la que suministra el ancho de banda para cada uno de los conmutadores PCIe, que según especificación compactPCI es de 1GBps por conmutador. El aspecto

físico de un controlador embebido para PXI del fabricante GEOTEST se muestra en la Fig. 10.

Por otro lado, es posible también ejercer el control del sistema desde PC de escritorio o portátil, por lo que los fabricantes ofrecen kits de interfaz PCI para el caso de los PC de escritorio y PCMCIA Card Bus (PCMCIA: Personal Computer Memory Card International Association) para el caso de los portátiles. Esta modalidad se conoce como *control remoto*, y no requiere ninguna programación adicional.



Fig. 10. Controlador embebido para PXI del fabricante GEOTEST [17].

Estos kits de interfaz, en los dos casos anteriores, básicamente constan de una tarjeta que se aloja en la ranura 1 del chasis, donde también se puede instalar el controlador embebido y otra tarjeta para el PC, que para el caso de PXI Express está conectada al bus PCI Express, interconectando chasis y PC o portátil. Como ya se mencionó, para este último caso se cuenta con tarjetas que conectan al bus PCI del sistema, utilizando tecnología PCMCIA card bus. Para la conexión física entre las dos entidades, se utiliza un cable conocido como MXI Express.

4. El software

Por estar basado en la tecnología del bus PCI, PXI es totalmente compatible con sistemas operativos Windows en sus últimas versiones; esto se corrobora en su última especificación de software [18], lo que lo hace totalmente compatible con interfaces de programación de aplicaciones estándares en la industria, tales como NI LabVIEW, LabWindows™/CVI y Measurement Studio de National Instruments; Visual Basic y Visual C/C++ de Microsoft; y ATEasy de Geotest-Marvin Test Systems, Inc. Por medio de la interfaz de programación se configura el hardware asociado para desarrollar la función requerida.

En cuanto al sistema operativo, es posible que con un controlador embebido, se pueda ejecutar una opción de tiempo real. El fabricante National Instruments en su web explica: “Como una alternativa

a sistemas basados en Windows, usted puede utilizar una arquitectura de software en tiempo real para aplicaciones de tiempo crítico que requieren velocidad determinista y operación sin interfaz (sin teclado, mouse o monitor). Los sistemas operativos en tiempo real le ayudan a priorizar tareas para que las tareas más críticas siempre tomen control del procesador cuando sea necesario. Con esta característica, usted puede programar una aplicación con resultados predecibles y fluctuación reducida” [19].

Este fabricante ofrece la suite denominada LabVIEW Real-Time que permite a los usuarios crear sistemas robustos en tiempo real capaces de resolver una amplia variedad de problemas en actividades industriales, control científico y supervisión [20] por su excelente velocidad de respuesta a las interrupciones, con bajas latencias, brindando altos niveles de precisión y sincronización al sistema en ejecución. Un sistema operativo en tiempo real, a diferencia de uno de propósito general multitarea (como Windows, Linux o MAC OS), está diseñado, típicamente, para atender una sola tarea con alta confiabilidad y precisión [21].

EL GENERADOR DE SEÑALES

El generador de señales a tratar, cuya referencia comercial es NI PXIe-5673, está formado a su vez por tres módulos con funciones definidas e interconectados físicamente. Cada uno de los módulos que lo conforman tiene también su referencia, que para el caso son NI PXIe-5450, generador de señal I/Q (in Phase & Quadrature); NI PXIe-5652, generador de señal de RF y microondas con capacidad de modulación; y NI PXIe-5611, modulador de señales I/Q. De las especificaciones de los dispositivos, se extrae la información sobre el aspecto del panel frontal y los nombres de los conectores de cada uno de los módulos que forman el generador, así como la función de los mismos. La Fig. 11 muestra esta información para el módulo NI PXIe-5450. Se aprecian dos conectores SMB (Sub-Miniatura versión B) y seis SMA (Sub-Miniatura versión A). El conector SMA “CLK IN” acepta un reloj externo que puede ser usado como un reloj de referencia, de muestreo, o una base de tiempo de reloj de muestreo. El conector SMA “CLK OUT” suministra una señal de reloj que puede ser compartida por otros dispositivos. Los conectores SMB “PFI 0” y “PFI 1” son conexiones bidireccionales que pueden aceptar un disparador (*trigger*) de una fuente externa y pueden comenzar o participar en la generación de formas de onda o encaminar señales de varios relojes, eventos y fuentes de disparo. El conector SMA “CH 0+/I+” suministra una forma de onda diferencial por el canal 0; el conector SMA

“CH 0-/I-“ suministra una forma de onda diferencial complementaria por el canal 0; el conector SMA “CH 1+/Q+”, una forma de onda diferencial de salida por el canal 1; y el conector SMA “CH 1-/Q-“ suministra una forma de onda diferencial complementaria por el canal 1.

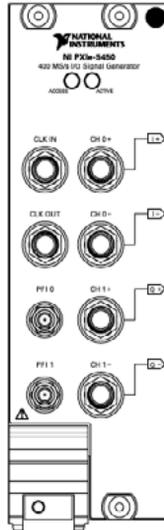


Fig. 11. Panel frontal del módulo NI PXIe 5450.

La Fig. 12 muestra la información correspondiente al panel frontal del módulo NI PXI-5652. Este módulo genera la señal de RF en la frecuencia y nivel de potencia requerida. “RF OUT” es la salida principal del módulo NI PXI-5652. “RF OUT” proporciona un valor nominal de salida de 0 dBm al conector LO IN del módulo NI PXI-5611. Su impedancia de salida

es de 50 Ω nominal. “RF OUT” cubre un rango de frecuencia de 500 kHz a 6.6 GHz con un nivel de señal máxima de +10 dBm en determinadas frecuencias y está protegida contra potencia inversa de RF de hasta +27 dBm y 25 VDC. Este conector está acoplado en AC.

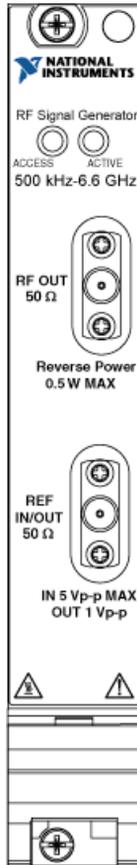


Fig. 12. Panel frontal del módulo NI PXI-5652.

La Fig. 13 muestra la información correspondiente al panel frontal del módulo NI PXIe-5611. El conector “RF OUT” provee la salida para señales de RF. Su impedancia de entrada es de 50Ω nominal. Se debe atender recomendación explícita de no aplicar más de 5 VDC o potencia inversa de 1 W a este conector del panel frontal, pues esto puede ocasionar daños al hardware. Esta salida tiene circuitería de protección de potencia inversa que se habilita con potencias superiores a +30 dBm. Este conector está acoplado en AC. El conector “PLS MOD” acepta una señal de pulso externo compatible con tecnología TTL (lógica transistor-transistor). La señal TTL compatible permite la modulación del pulso de la señal de salida de RF presente en el conector “RF OUT” del panel frontal. La entrada máxima que se debe proporcionar al conector de panel frontal “PLS MOD” es de -0,5 V a 8 V. Esta entrada está acoplada en DC. El conector “LO IN” (LO: oscilador local) recibe la portadora de RF para el modulador I/Q para producir una forma de onda de portadora de una sola banda lateral suprimida para modular la señal de banda base aplicada a las entradas I/Q [22].

“LO IN” dirige la salida del oscilador local utilizado para la combinación de varios dispositivos con una sola fuente común de oscilador local. La impedancia de salida está nominalmente a 50Ω . **El conector “LO OUT”** permite el funcionamiento de fase coherente de múltiples dispositivos mediante el uso de una señal LO común cuando existen otros dispositivos en conexión en cadena.

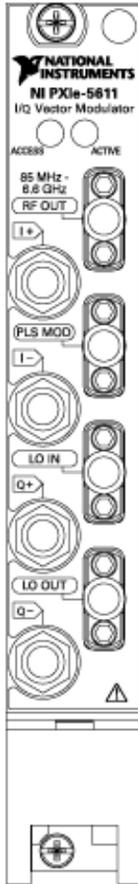


Fig. 13. Panel frontal del módulo NI PXIe-5611.

Si se tiene una conexión en cadena de más para un dispositivo NI 5611, se debe comprobar el nivel de potencia que se aplica. Debido a la tolerancia de la ganancia, se pueden perder unos pocos dB de potencia cuando la señal “LO OUT” se utiliza en un dispositivo

secundario. El control preciso de la amplitud para un solo dispositivo se logra mediante el ajuste fino de LO. Debido a las tolerancias sobre frecuencias, se pueden tener de manera significativa niveles de potencia diferentes después de tener varios dispositivos en cadena. Si la señal en el dispositivo secundario “LO IN” no está dentro de 0,5 dB de la potencia nominal de 0 dB, las especificaciones del dispositivo secundario pueden no estar satisfechas. Cuando no esté en uso, se recomienda que se aplique una terminación externa al conector del panel frontal “LO OUT” de 50 Ω . La salida es desactivada por una carga interna cuando la “LO OUT” del panel frontal no esté en uso, pero alguna potencia LO puede tener fugas y la salida debe terminarse. Los conectores “I+” e “I-” aceptan señales diferenciales analógicas en fase para el modulador I/Q. Los niveles de señal aplicados son nominalmente 0.4 V_{pk-pk} (± 0.2 V) de una sola terminal, ó 0.8 V_{pk-pk} diferencial. El ancho de banda de la señal de entrada es de hasta 50 MHz.

La impedancia de entrada es de 100 Ω diferencial. No se debe aplicar más de ± 15 VDC en estas entradas ya que podrían ocurrir daños de hardware, recomienda el fabricante. Esta entrada está acoplada en DC. Los conectores Q+ y Q- aceptan señales diferenciales para el modulador I/Q. Las demás recomendaciones de niveles de seguridad de voltaje son idénticas a las de los conectores I.

El conjunto de módulos interconectados físicamente se muestra en la Fig. 14. Estos tres módulos interactúan

comandados por la programación establecida por el usuario por medio del uso de LabVIEW y los kits de herramientas virtuales disponibles. Aunque cada módulo cumple funciones específicas, y en algunas aplicaciones puede que se requiera su uso de manera aislada, el sistema puede visualizarlos como un conjunto generador gracias a la ayuda que presta el programa de configuración de hardware de National Instruments, Measurement and Automation Explorer (NI MAX).

Es en esta herramienta de configuración en donde una vez detectado el chasis y los módulos conectados se asocian entre sí por medio del acceso a las propiedades del modulador de señales I/Q NI PXIe-5611. Al ingresar a este apartado, la interfaz genera la opción de asociar a éste un generador de forma de onda arbitraria (AWG), para lo cual se debe seleccionar el módulo NI PXIe-5450 y la opción de asociar un oscilador local (LO), en donde se debe seleccionar el módulo NI PXI 5652. De esta manera, se ha configurado el conjunto del generador de señales formado por los tres módulos anteriormente relacionados. Esta parte no reviste la más mínima dificultad y el NI MAX es totalmente amigable en este sentido.

La arquitectura de esta configuración define que en el generador de señales I/Q se forma la señal banda-base a transmitir con tasas de hasta 200 millones de muestras por segundo (MS/s); el generador de señales de RF entrega la portadora en frecuencias de hasta 6.6

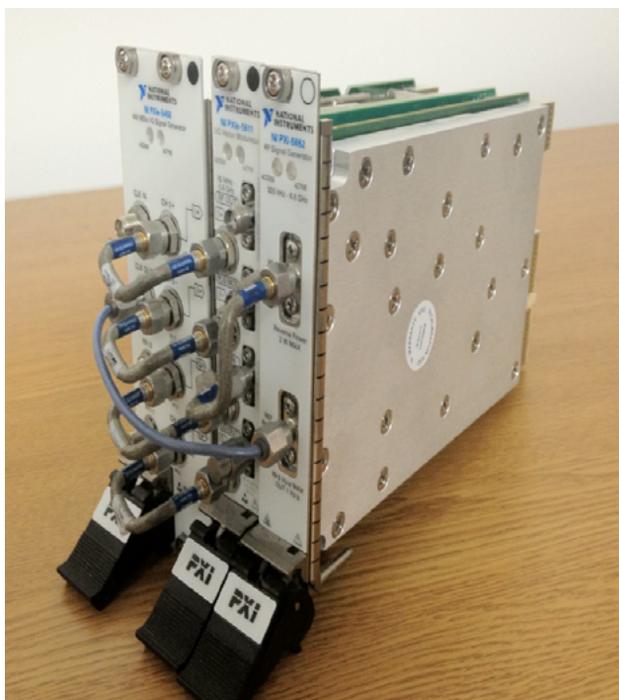


Fig. 14. Generador de señales NI PXIe-5673.

GHz y el modulador de señales I/Q se encarga de hacer la modulación, analógica o digital, de acuerdo con lo establecido en el programa que se esté ejecutando. Todo este hardware es totalmente configurable y sus parámetros son fácilmente modificables gracias a la amigable interfaz gráfica que provee el entorno de programación LabVIEW. Es posible variar la tasa de muestras por segundo de la señal I/Q, la frecuencia de la portadora y el tipo de modulación a realizar con simples clics del mouse.

La arquitectura anteriormente descrita es coherente con el diagrama de bloques mostrado en la Fig. 15. El rango de operación de este generador es de 85 MHz hasta 6.6 GHz, con un ancho de banda que puede superar los 100 MHz y potencia de RF de hasta 10 dBm. Sus características resultan sumamente amplias si se compara con sus equivalentes en la instrumentación tradicional. Al combinarse con el Modulation Toolkit (también conocido como MT, es un kit de herramientas que contiene instrumentos virtuales que pueden ser utilizados por el hardware de National Instruments o en un entorno de simulación para generar y analizar señales con modulación digital y analógica, además, soporta formatos de modulación ASK, FSK, MSK, PSK, QAM, CPM, PAM, AM, FM y PM), este generador es capaz de desarrollar los esquemas de modulación AM, FM, CPM, ASK, FSK, MSK, PSK, QAM (4, 16, 64, y 256), y ajustado con el software estándar específico puede generar las señales de GPS, GSM/EDGE/WCDMA, WLAN, WiMAX, DVB-C/H/T, ISDB-T, ZigBee, y otros de los estándares de comunicación actuales.

A partir de la comprensión de la arquitectura y sus ventajas, el sistema completo ofrece facilidades en la generación de cualquier esquema de modulación para el investigador, permitiendo visualizar de mejor manera los fenómenos y lograr la aprehensión del conocimiento a un alto nivel.

Esquemas básicos de modulación

Gracias a los VI (programas en LabVIEW, también llamados *Instrumentos Virtuales*) suministrados en el MT es posible generar esquemas básicos de modulación y variar los principales parámetros, como frecuencia de portadora y tamaño del mensaje entre otros [23].

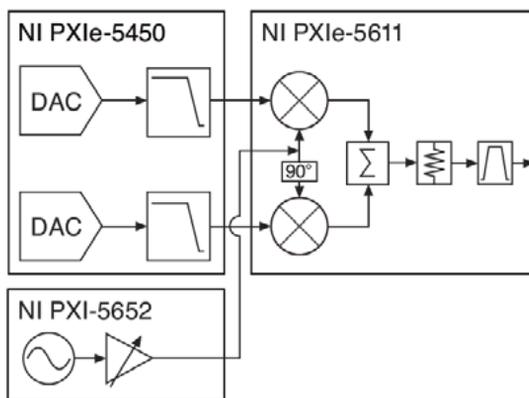


Fig. 15. Diagrama de bloques del NI PXIe-5673 [24].

Las representaciones gráficas que se mostrarán a continuación no obedecen a simulaciones de software, han sido tomadas de la salida del generador y llevadas al analizador. Para mejorar su visualización, se tomó de manera virtual la señal de salida y se aplicó a un trazador que permite eliminar las transiciones entre símbolos, consiguiendo que la constelación se parezca mucho a lo teórico que se encuentra en los textos de

comunicaciones. Se mostrarán los diagramas de constelación para los esquemas de modulación digital de manipulación de fase (PSK) y luego de fase y amplitud (QAM). Para este propósito se utilizarán dos instrumentos virtuales suministrados por el fabricante (National Instruments) que permiten la generación de los dos esquemas de modulación mencionados y sus variantes (4 QAM, 8 QAM, 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, 128 QAM, 256 QAM; BPSK, 8 PSK, 16 PSK OQPSK, 1/4 DQPSK), como son el QAM Generate y el PSK Generate, cuyos paneles frontales se muestran en las figuras 2.5 y 2.6. Estos instrumentos virtuales permiten también la variación del filtro (coseno alzado, raíz de coseno alzado) utilizado en la transmisión, admitiendo observar la variación de las respectivas constelaciones para los distintos tipos de filtrado.

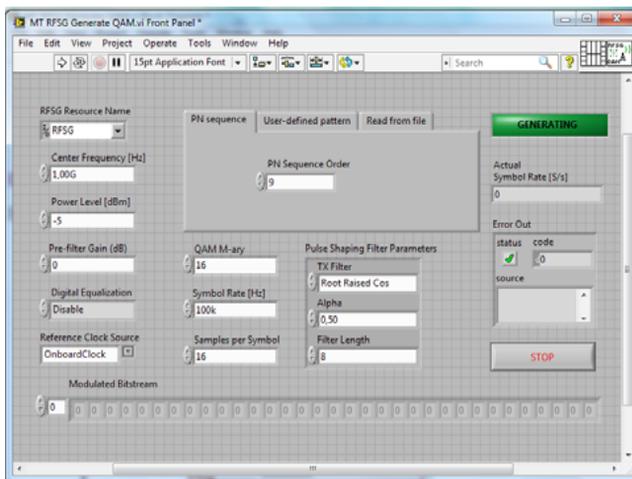


Fig. 16. Generador QAM.

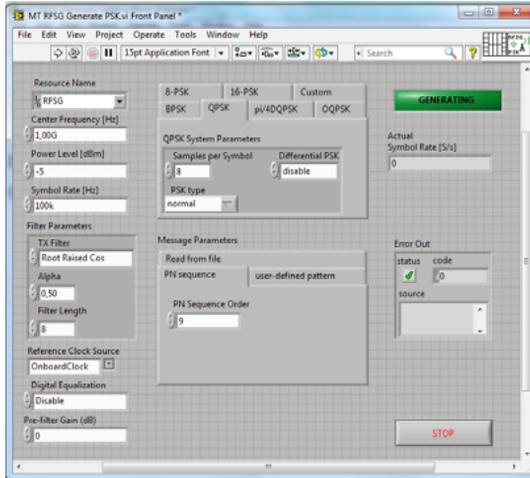


Fig. 17. Generador PSK.

La Fig. 18 muestra la constelación para una modulación BPSK (Modulación por desviación de fase binaria) realizada con el instrumento. Como mensaje se utilizó una secuencia pseudo-aleatoria de bits de orden 16 con filtro de coseno de raíz alzada y potencia de RF de -5 dB. En cuanto al tipo de filtrado, inicialmente se trabaja con éste para más adelante mostrar la diferencia al variarlo y cómo esto es notorio gráficamente en la interferencia inter-simbólica.

En la modulación BPSK son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia de señal portadora [25]. La representación muestra el comportamiento de la fase de la portadora de acuerdo con el estado lógico de la entrada digital (1 ó 0 lógico), variando entre dos ángulos desfasados a 180 grados.

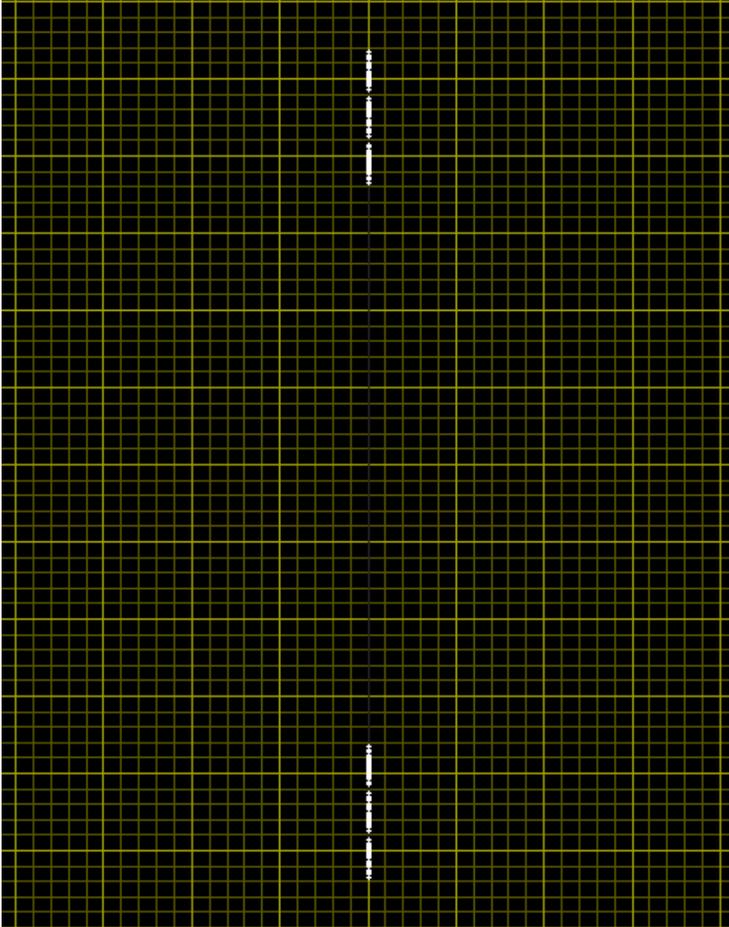


Fig. 18. Constelación para modulación BPSK.

Siguiendo con los esquemas básicos de modulación digital, a continuación se muestra en la fig. 19, la constelación para un esquema QPSK (Modulación por desviación de fase cuaternaria).

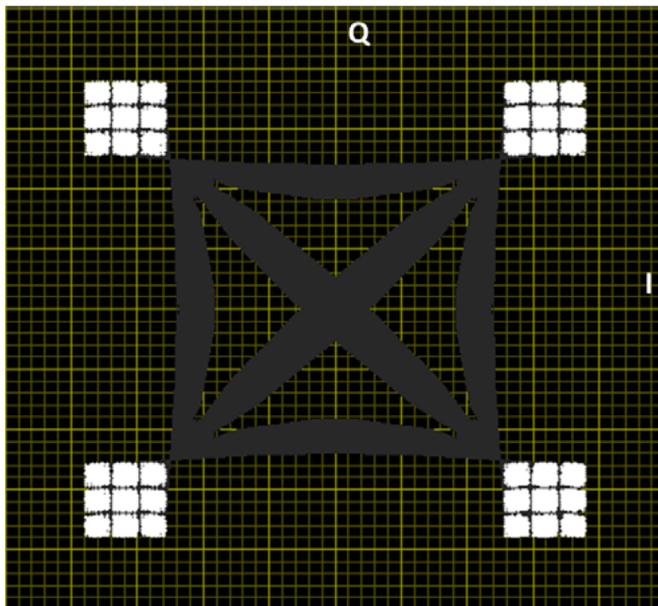


Fig. 19. Constelación para modulación QPSK.

Con la modulación QPSK son posibles 4 fases de salida para una sola señal de portadora, lo que se aprecia claramente en el diagrama de constelación mostrado. Las transiciones posibles se pueden presentar de acuerdo con tres criterios:

- Cambio de fase de la portadora de ± 180 grados cuando las componentes en fase y en cuadratura cambian simultáneamente de signo.
- Cambio de fase de la portadora de ± 90 grados cuando se da cambio de signo en solo una de las componentes.

- Ausencia de cambio de fase de la portadora cuando ninguna de las componentes cambia de signo. [26]

A continuación, se muestra en la Fig. 20 el diagrama de constelación para el esquema de modulación $\pi/4$ DQPSK (QPSK diferencial desplazada 45 grados).

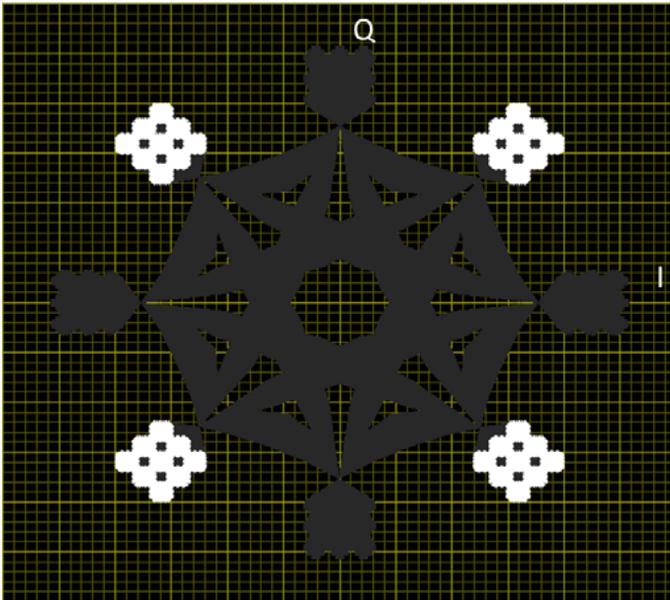


Fig. 20. Constelación para modulación $\pi/4$ DQPSK.

Como se puede apreciar en el diagrama de constelación, los símbolos han sido rotados 45 grados, con esto se evita que en la transición, la envolvente de modulación pase por el origen de los ejes, lo cual supone ventajas en la construcción de amplificadores

para radio frecuencia por la dificultad presentada en mantener la respuesta lineal extendida hasta la salida de potencia cero [27]. Esta variante de QPSK se conoce como diferencial porque para la detección se requiere decodificar la información digital basándose en diferencias relativas de fase, es decir, tomando como referencia el intervalo inmediatamente anterior. La información no está inmersa en el valor absoluto de la fase sino en la transición.

A continuación, se presenta en la Fig. 21 el diagrama de constelación para el esquema de modulación 8-PSK.

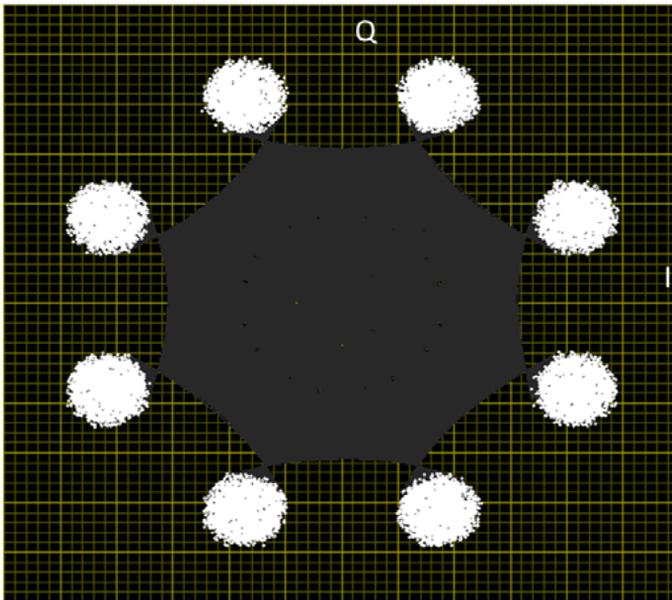


Fig. 21. Constelación para modulación 8-PSK.

Es claramente observable, gracias a la riqueza gráfica del trazador, que en la modulación 8-PSK, la portadora puede adoptar uno entre ocho ángulos diferentes de fase. Los ángulos tienen un desfase de 45 grados entre ellos para representar los diferentes símbolos. En este tipo de modulación se pueden representar 8 símbolos, por lo que la entrada corresponde a grupos de 3 bits ($2^3=8$).

La Fig. 22 muestra el diagrama de constelación para la modulación de 16-PSK generada con el equipo.

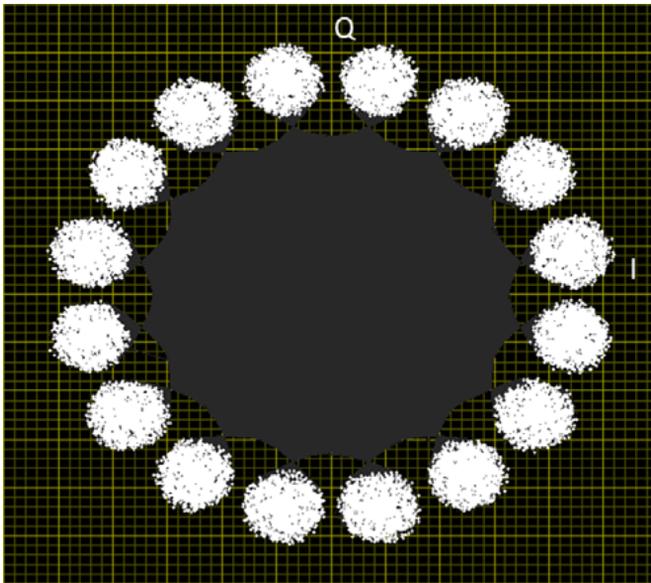


Fig. 22. Constelación para modulación 16-PSK.

En este diagrama de constelación, se observa que la fase de la portadora puede variar en 16 ángulos

diferentes, cada uno de los cuales corresponde a un símbolo y con un desfase entre ellos de 22.5 grados. Con 16 posibles salidas, es necesario manejar a la entrada 4 bits ($2^4=16$).

A continuación, se muestra en la Fig. 23 el efecto de cambiar el filtrado a coseno alzado.

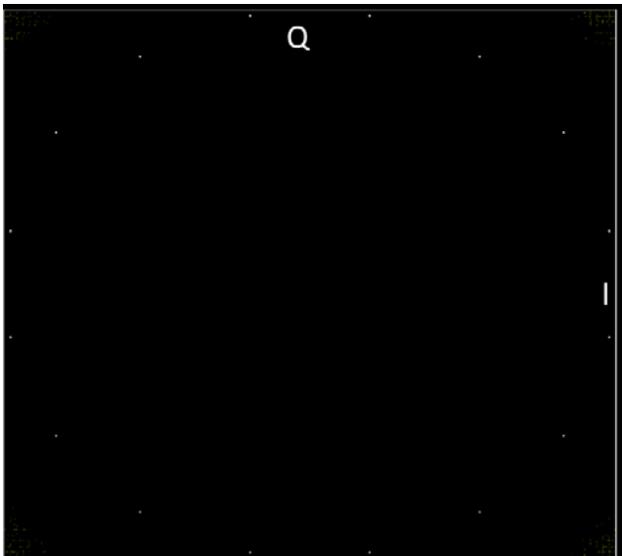


Fig. 23. Constelación para modulación 16-PSK variando el tipo de filtro a coseno alzado.

Es muy notorio cómo se concentran los puntos de símbolos, mejorando ostensiblemente la interferencia inter-simbólica, lo que reduce la tasa de errores de bits y mejora el rendimiento de la modulación. Se ha graficado con el anterior filtro para apreciar mejor la concentración de los símbolos de acuerdo con el ángulo de fase.

A continuación, se mostrará el diagrama de constelación para modulaciones QAM, en la que la portadora sufre variaciones de amplitud y fase. Así, en la Fig. 24 se observa la constelación para 4-QAM.

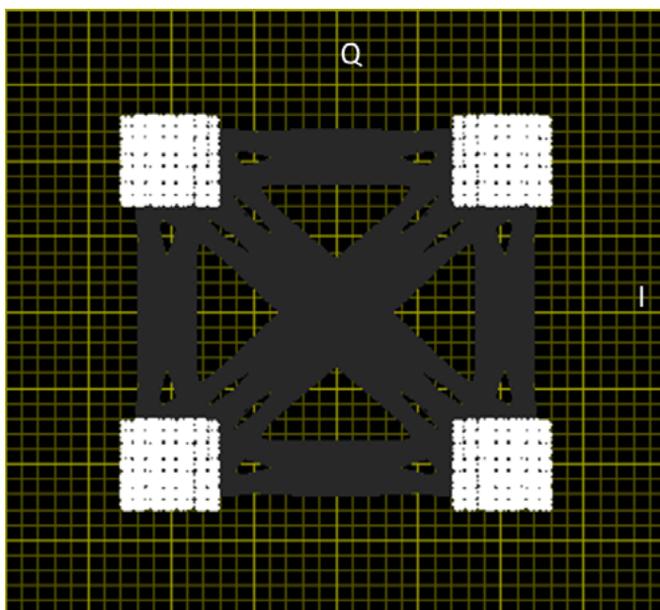


Fig. 24. Constelación para modulación 4-QAM.

La utilización del esquema de modulación 4-QAM no supone ninguna ventaja sobre el uso de QPSK. Dentro de las ventajas de modular en fase y amplitud, se incluye una mayor amplitud en el área de decisión simbólica, es decir, el rango angular en que se decide en el receptor si se recibió un símbolo u otro, lo que es más apreciable con la configuración rectangular de QAM como se verá a continuación.

Es posible también configurar QAM de forma circular, pero el ejemplo desarrollado trata el caso antes descrito por la ventaja explicada. Una de las principales características de QAM es que modula la mitad de los símbolos con una frecuencia y la otra mitad con la misma frecuencia pero desfasada 90 grados. El resultado de las componentes después se suma dando lugar a la señal QAM. De esta forma es posible llevar dos canales en una misma frecuencia mediante la transmisión ortogonal de cada uno de ellos [28].

A continuación, en la Fig. 25 se presenta el diagrama de constelación para el esquema 8-QAM rectangular.

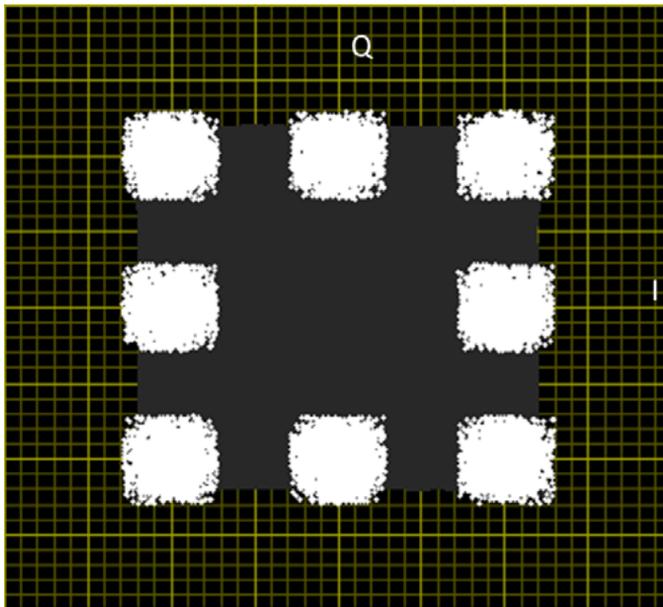


Fig. 25. Constelación para modulación 8-QAM.

En este diagrama de constelación es notorio que se presentan dos niveles de amplitud debido a que cada uno de los 8 símbolos posibles de transmitir es representado en diferente ángulo de fase y amplitud de la portadora. Esta es una de las ventajas de este sistema de modulación, pues disminuye la tasa de errores de bits. Precisamente, fenómenos como el anteriormente descrito se aprecian mucho mejor con el PXI, y por medio del software es posible variar parámetros como la frecuencia de la portadora, el tipo de filtrado, o el orden de bits (tamaño) del mensaje, observando claramente cómo cambia el diagrama de constelación y se mejora o empeora la tasa de errores de bits, viendo la interferencia entre símbolos (inter-simbólica), por ejemplo.

En la Fig. 26 se presenta el diagrama de constelación para el esquema 16-QAM rectangular. Con este esquema de modulación se pueden representar hasta 16 símbolos teniendo variaciones de amplitud en tres niveles y los cambios de fase. Para representar 16 símbolos se requieren cuatro bits a la entrada ($2^4=16$). Hasta ahora se han mostrado los diagramas de constelación eliminando las transiciones entre los símbolos, lo que permite observar mejor la constelación propiamente dicha, pero dada la facilidad de la operación de estos instrumentos virtuales, es posible visualizar las transiciones aunque ello dificulte el análisis, como en el caso del esquema anteriormente mostrado que con la variación anotada anteriormente se observaría como se muestra a continuación en la Fig. 27. Se hace obvia la

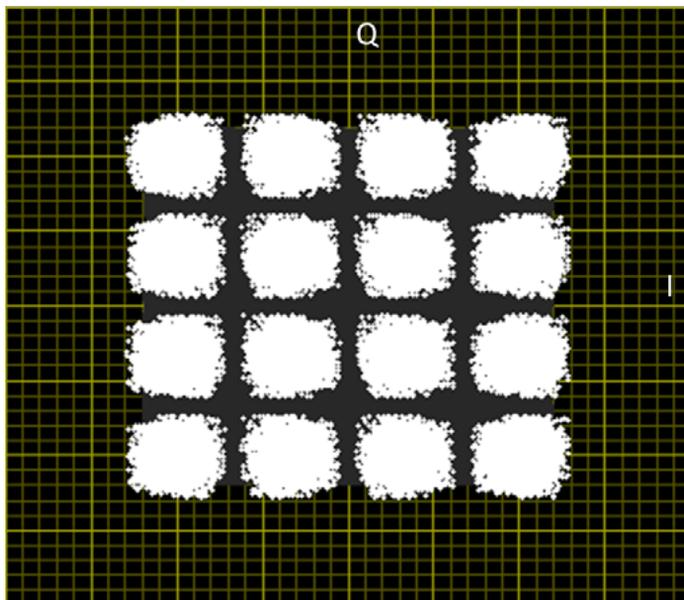


Fig. 26. Constelación para modulación 16-QAM.

utilidad de la función de eliminar esos trazos, pues, de lo contrario, el diagrama se convierte en una mancha inexpresiva.

Esta es la facilidad que permite la instrumentación modular virtual, pues ciertas cosas serían impensables con la instrumentación tradicional, y variaciones como ésta son las que permiten que la apropiación de los conocimientos sea a un muy alto nivel, admitiendo la comprensión de los fenómenos en la propia señal y manipulando todos los parámetros relacionados.

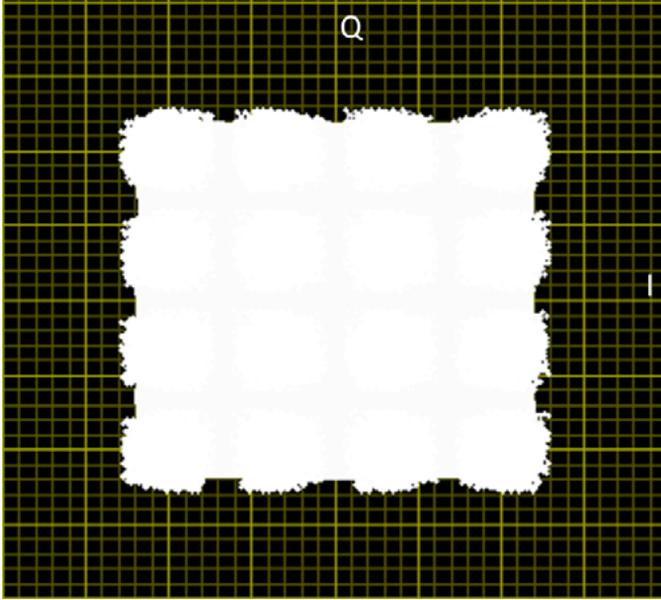


Fig. 27. Constelación para modulación 16-QAM sin eliminar las transiciones entre símbolos.

Hasta ahora las representaciones se han hecho tomando como mensaje señales digitales pseudo-aleatorias generadas por el instrumento virtual que está realizando los esquemas de orden 16. A continuación, en la Fig. 28, se muestra el diagrama de constelación para el mismo esquema de modulación variando el orden de la secuencia pseudo-aleatoria a 10. Esto se hace con el fin de mostrar cómo resulta tan fácil realizar variaciones a parámetros que a nivel de hardware es difícil alcanzar, por lo que se reitera lo que se ha comentado en todo el desarrollo del presente libro, la facilidad de manipulación de los fenómenos al más alto

nivel. Este orden define el tamaño del mensaje digital a transmitir, repercutiendo en el número de símbolos a transmitir por unidad de tiempo; esto se va a reflejar en una constelación menos cargada que la observada anteriormente.

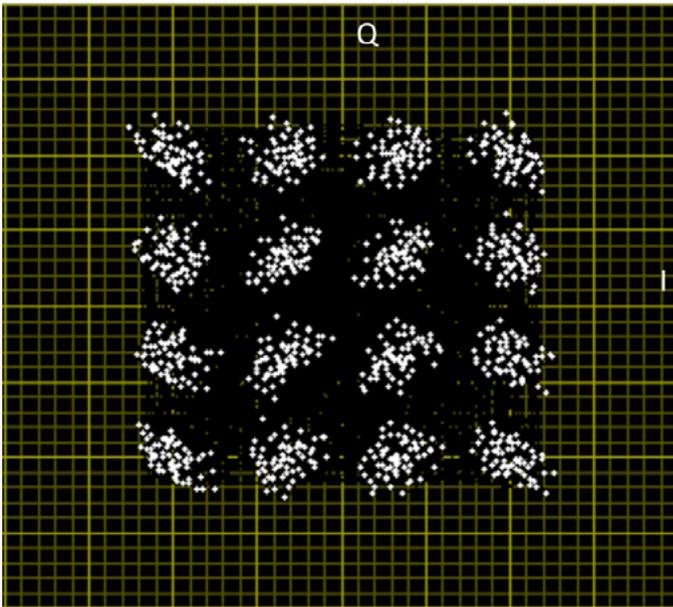


Fig. 28. Constelación para modulación 16-QAM variando la secuencia digital del mensaje a orden 10.

También es posible variar el tipo de filtrado por uno del tipo de coseno alzado; hasta el momento se ha hecho con filtro de raíz de coseno alzado. El esquema de modulación anteriormente mostrado, se vería como en la Fig. 29 con la variación referida.

Cabe aclarar que la función del filtrado en un sistema de comunicaciones digitales consiste en eliminar la mayor cantidad de componentes en frecuencia del pulso con forma de onda cuadrada, teniendo en cuenta que éste está formado por una sumatoria de señales senoidales y cosenoidales (armónicos), trayendo como consecuencia un mejor aprovechamiento del ancho de banda del sistema por la eliminación de frecuencias que no interesan, mejorando así el rendimiento y desempeño del sistema. Esta eliminación de frecuencias de la señal digital actúa directamente en la interferencia entre símbolos, mejorándola significativamente.

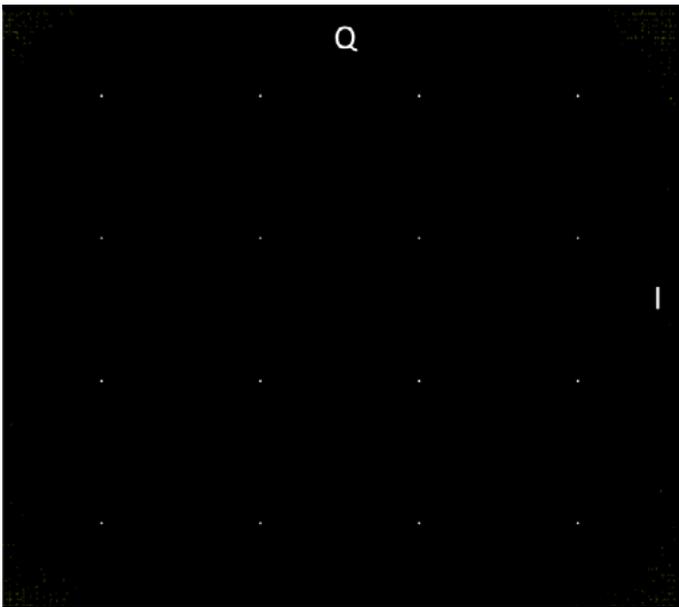


Fig. 29. Constelación para modulación 16-QAM variando el tipo de filtro a coseno alzado.

Nuevamente se han eliminado las transiciones entre símbolos para observar solamente los puntos que representan los símbolos. Es sumamente notoria la mejoría en cuanto a interferencia entre símbolos, pues la concentración es claramente definida en cada punto de la constelación.

En la Fig. 30 se muestra el diagrama de constelación para el esquema de modulación 32 QAM. Es de notar en esta gráfica la interferencia presentada entre símbolos. En la gráfica siguiente (Fig. 31), se mostrará cómo se mejora esto con la variación del tipo de filtro para la señal digital.

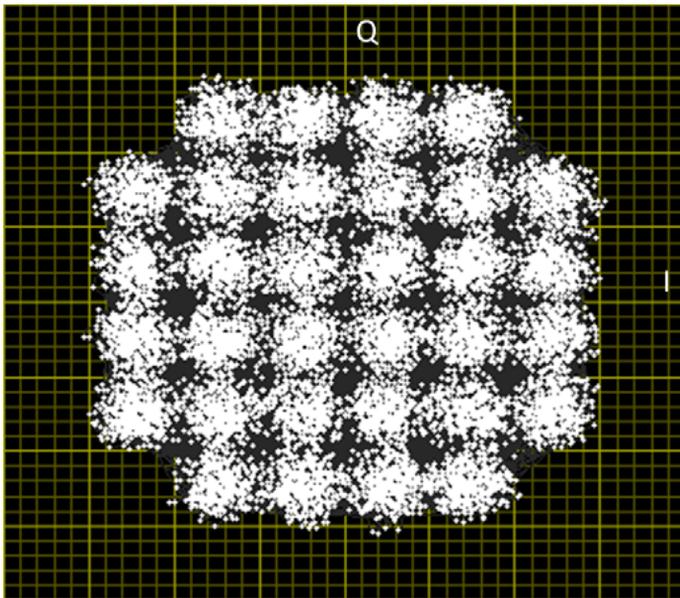


Fig. 30. Constelación para modulación 32-QAM.

En el presente libro no se discutirán las ventajas o desventajas de uno u otro sistema, sólo se muestra lo que es capaz de realizar el equipo.

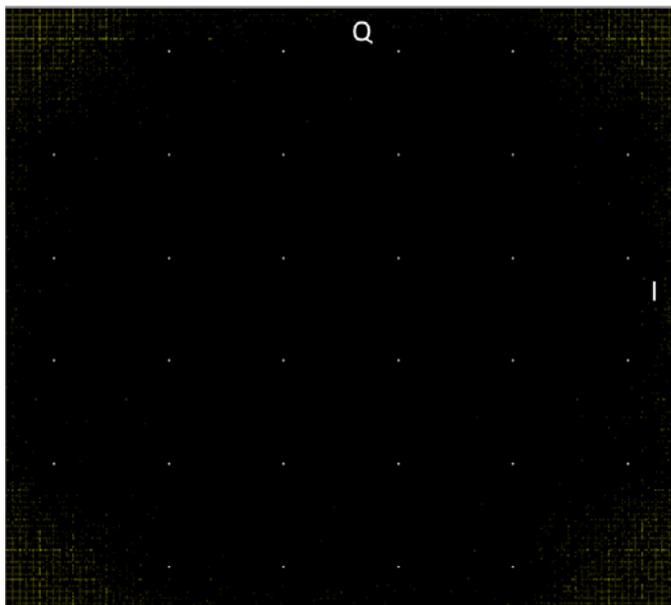


Fig. 31. Constelación para modulación 32-QAM variando el filtro a coseno alzado.

Nuevamente se han eliminado las transiciones para visualizar mejor la constelación. De no utilizar ningún tipo de filtrado, opción que también se maneja en el instrumento virtual, al graficar sin eliminar las transiciones, las gráficas podrían resultar muy similares, pero al graficar con las transiciones entre símbolos saltan las diferencias a la vista. Esto se aprecia en las siguientes dos imágenes.

Con este tipo de instrumentos, que grafiquen a este nivel, se pueden enriquecer significativamente los textos de comunicaciones, pues las comprobaciones teóricas se pueden realizar paso a paso.

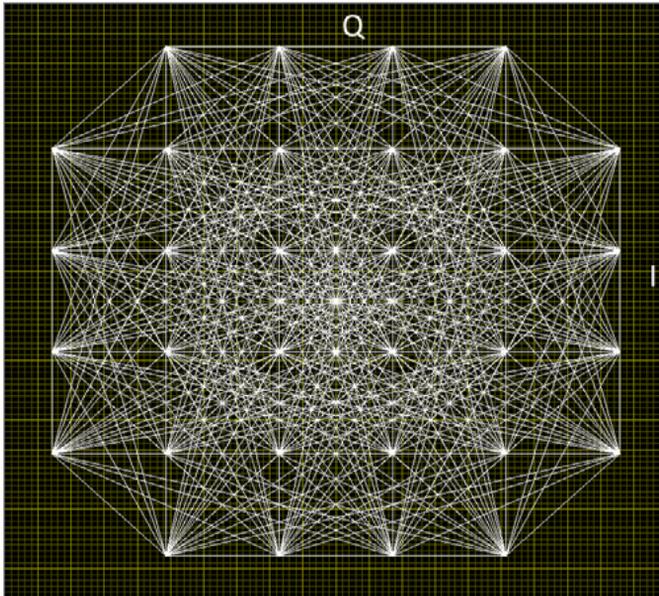


Fig. 32. Constelación para modulación 32-QAM sin filtro y con transiciones entre símbolos.

La siguiente gráfica se aprecia como una gran mancha blanca, pero en realidad son los trazos muy unidos que representan el paso de la portadora de un cambio de fase y amplitud a otro. Para representar 32 símbolos se requieren 5 bits de entrada ($2^5=32$).

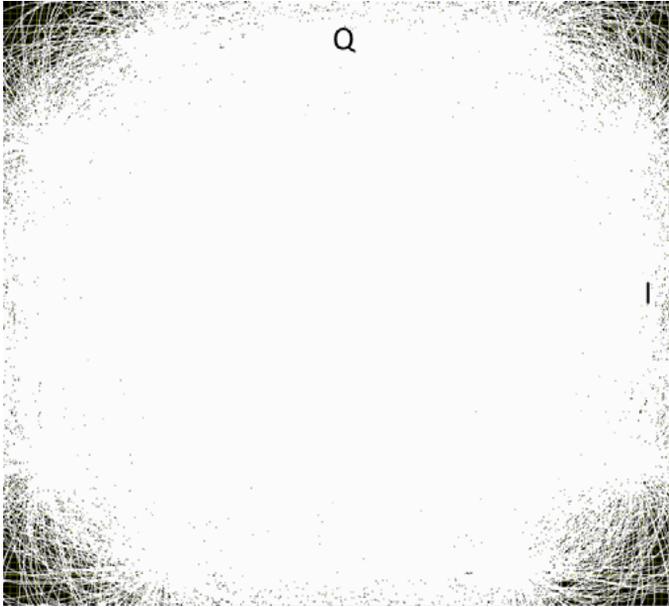


Fig. 33. Constelación para modulación 32-QAM con filtro de coseno alzado y con transiciones entre símbolos.

Algunos VI del MT permiten la inclusión de deficiencias en la señal modulada para verificar el comportamiento de la misma y permitir la comprobación teórica. De la versión de Modulation Toolkit 4.3.3 para el modelado de deficiencias se destacan los siguientes VI, cada uno de ellos está seguido de una descripción sobre su funcionalidad:

MT Add AWGN: genera ruido blanco Gaussiano, aditivo complejo de media cero (AWGN), y lo suma a la forma de onda banda-base modulada de valores

complejos, entregando la forma de onda de la señal más ruido, con E_b/N_0 especificada por el usuario.

MT AddMultiTone: genera múltiples tonos y los suma a la forma de onda banda-base modulada de valores complejos, entregando la forma de onda de la señal más los tonos.

MT Apply Fading Profile: aplica un perfil de Rice o Rayleigh para desvanecer la forma de onda banda-base modulada de valores complejos.

MT Apply I-Q Impairments: aplica varias deficiencias I-Q a la forma de onda banda-base modulada de valores complejos, incluyendo DC offset, desequilibrio de ganancia IQ, inclinación de cuadratura y desplazamiento de frecuencias.

Para medidas, se encuentran los siguientes VI:

MT Calculate BER AfterTrigger: calcula el promedio de tasa de error de bit (BER) mediante una secuencia PN (Pseudorandomnumber: número pseudo-aleatorio) o un patrón de referencia especificado por el usuario.

También se cuenta con VI medidores de deficiencias I-Q para las modulaciones ASK, CPM, MSK, PAM, MSK y QAM. Éstos calculan el desplazamiento DC, magnitud del error, error de fase, magnitud del vector error (EVM) y la relación de error de modulación (MER) para una señal demodulada. Encuentra medidas de offset de DC que incluyen I, Q y el origen. Asimismo, entrega el valor de deficiencia pico, RMS y por símbolo.

Por su parte, el MT para visualización ofrece los siguientes VI:

MT Display 3D Eye: divide una forma de onda de entrada de valor complejo en segmentos y muestra los segmentos como trazos superpuestos en un gráfico 3D. Se determina la longitud del segmento basado en la tasa de símbolos y los parámetros de entrada de la longitud del ojo.

MT FormatConstellation: prepara una señal para la presentación de un gráfico que muestra las ubicaciones detectadas de símbolo y las transiciones entre éstos. El VI recibe una forma de onda con valores complejos y muestra una gráfica constelación del contenido.

MT FormatEyeDiagram: recibe una forma de onda compleja o de valores reales, la divide en segmentos y los plotea en una gráfica de formas de onda. Se determina la longitud del segmento basado en la tasa de símbolos y los parámetros de entrada de la longitud del ojo.

MT FormatTrellisDiagram: recibe una forma de onda con valores complejos, se divide en segmentos y los muestra como diagrama enrejado (*trellis*) en un gráfico estándar de LabVIEW de forma de onda referenciado por la entrada del VI para el propósito.

MT IQ to XY Graph: formatea datos IQ para trazar en un gráfico de LabVIEW XY.

También ofrece utilidades de diseño que permiten generar los parámetros de sistema para cualquiera de los tipos de modulación antes mencionados y sus respectivos demoduladores, así como los moduladores y demoduladores propiamente dichos, que a partir de una secuencia de bits desarrollan el proceso en el caso digital, y de forma inversa para el caso de la demodulación. Por otra parte, el MT ofrece también la posibilidad de modificar los parámetros de fase, frecuencia y amplitud de una portadora con una señal analógica, convirtiendo al generador de señales en transmisor para prácticamente casi cualquier sistema comercial y permitiendo el desarrollo personalizado.

A nivel de codificación y decodificación de canal ofrece VI compatibles con BCH, LDPC, códigos convolucionales, Golay, Hamming, Reed Solomon y DSSS. Información más detallada se encuentra en la web del fabricante National Instruments, donde se ofrece la hoja de datos del Modulation Toolkit.

Con la combinación de software y hardware anteriormente descrita, la plataforma PXI queda totalmente habilitada para la generación y análisis de gran variedad de señales y la caracterización de cualquiera de los sistemas de comunicación y telemática compatibles con las actuales tecnologías.

Las señales generadas pueden ser radiadas con antenas o guiadas por medio de conductores especiales (mini coaxial SMA-SMA), como en este

caso, al analizador también presente en el mismo chasis pero a una distancia de 20 cm de separación. A estas alturas debe aclararse que en el caso de la configuración que ocupa el objetivo del presente, se cuenta en el mismo sub-bastidor o chasis con los dos instrumentos: el de prueba, para generar las señales; y el de medida, que permite el análisis de las mismas, aún no descrito.

EL ANALIZADOR DE SEÑALES

Las señales generadas por el NI PXI-5673, con sus amplios rangos de operación y características avanzadas, resultan difíciles de detectar por instrumentos clásicos. Señales del orden de los GHz y con amplios anchos de banda no resultan de fácil visualización con herramientas que no estén apoyadas en equipos de cómputo. La visualización y el análisis que permite el NI PXI-5663, analizador de señales, lo sitúan en el ámbito académico como uno de los más avanzados instrumentos para este tipo de funciones y con grandes expectativas de escalabilidad, lo que supone que será compatible con futuros desarrollos y esquemas de modulación utilizados por tecnologías emergentes.

Al igual que el generador, éste también está formado por tres módulos que operan de manera conjunta: el NI PXIe-5601, que recibe la señal modulada y la lleva a frecuencia intermedia, sintonizado por el NI-5652, generador de señal de RF y microondas, y el NI PXIe-5622, convertidor analógico a digital de 16 bits que recibe la señal de frecuencia intermedia y la digitaliza a 16 bits con tasa de muestreo de hasta 150 MS/s. De igual forma, el programa NI MAX permite la asociación de los módulos para formar el conjunto analizador mediante el ingreso al apartado de propiedades del módulo NI PXIe-5601, en donde se deben asignar como digitalizador el NI PXIe-5622 y, como LO (Oscilador Local), el NI PXI-5652. De esta manera, las tres tarjetas

arriba referenciadas, ahora son visualizadas por el sistema como un conjunto analizador de señales. La Fig. 34 muestra el panel frontal y los nombres de los conectores para el módulo NI PXIe-5601.

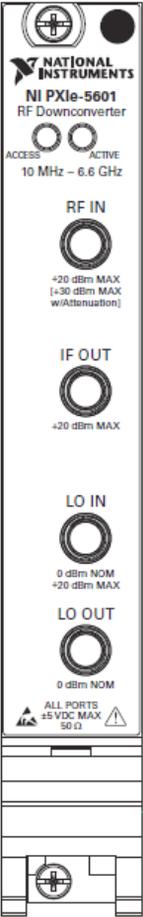


Fig. 34. Panel frontal del módulo NI PXIe-5601 [29].

“RF IN” es un conector SMA y es la entrada de RF al módulo; acepta una entrada máxima de +20 dBm nominal, y hasta +30 dBm con una atenuación de entrada ≥ 8 dB [29]. La máxima tensión de seguridad de entrada de DC es de ± 5 V. La impedancia de entrada es de 50 Ω nominal. Se debe conectar la señal analógica de entrada RF a ser medida por el analizador de señal RF vectorial al terminal “RF IN”. “IF OUT” (IF: Frecuencia Intermedia) es un conector SMA que es la salida principal IF al módulo digitalizador NI PXIe-5622 IF. La impedancia nominal del PXIe-5601 es de 50 Ω . La tensión máxima de seguridad de DC es de ± 5 V. El nivel de potencia de salida del módulo nominal IF es de -6 dBm y el nivel máximo de potencia inversa es de +20 dBm. La frecuencia de salida IF se centra entre 53 o 187.5 MHz. “IF OUT” puede generar hasta 23 dBm si los atenuadores de entrada no están configurados correctamente. A pesar de que el conector “IF IN” tiene una amplitud de 4 dBm, a gran escala, esta generación no causará daños al digitalizador. Se debe conectar el terminal “IF OUT” al conector “IF IN” en el panel frontal del módulo digitalizador NI PXIe-5622. Este conector es el terminal de salida de la frecuencia llevada a IF para la sub-conversión digital.

A continuación, en la Fig. 35 se muestra el aspecto del panel frontal para el módulo NI PXIe-5622.

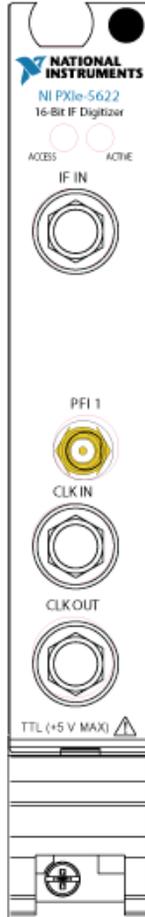


Fig. 35. Panel frontal del módulo NI PXIe-5622 [30].

El conector “IF IN” es un SMA y es la conexión analógica de entrada; digitaliza los datos y adquisiciones de disparo. El conector “PFI 1” es un SMB que funciona como conexión digital de disparo. “CLK IN” es un

conector SMA que importa una referencia externa o reloj de muestreo para el digitalizador. “CLK OUT” es un conector SMA que exporta la referencia del digitalizador o el reloj de muestreo.

El otro módulo que conforma el analizador de señales, que es el NI PXI 5652, ya fue descrito anteriormente, por encontrarse presente también en el generador. Todos los módulos PXI cuentan con dos LED (diodo emisor de luz) que permiten visualizar sus estados de operación.

La arquitectura del instrumento conjunto se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 36. A nivel de usuario e interfaz gráfica, este instrumento ofrece un panel frontal de un analizador de espectro totalmente amigable (NI RFSA Soft Front Panel) que permite visualizar señales en espectro y a nivel de constelaciones para el caso de las modulaciones, permitiendo realizar variaciones de la tasa de muestreo y escalas de los ejes X y Y para mostrar potencia vs tiempo, amplitud vs tiempo, I vs Q, e IQ vs tiempo. El rango de operación de este instrumento es de 10 MHz a 6.6 GHz, con un ancho de banda instantáneo de 50 MHz.

Combinado con el MT, el sistema es capaz de permitir medidas en varios esquemas de modulación tales como AM, FM, ASK, FSK, PSK, CPM, MSK y QAM, entregando con gran exactitud valores como la tasa de errores de bit (BER), desplazamiento DC, magnitud del error, error de fase, magnitud del vector error (EVM) y la relación de error de modulación (MER) para una señal demodulada.

Para expandir la capacidad de análisis del instrumento, el fabricante National Instruments suministra el kit de herramientas virtuales Spectral Measurement Toolkit (SMT), que en combinación con el NI PXIe-5663, permite la visualización de espectrogramas en 3D, ofreciendo funciones de medidas espectrales comunes como potencia en banda y potencia de canal adyacente.

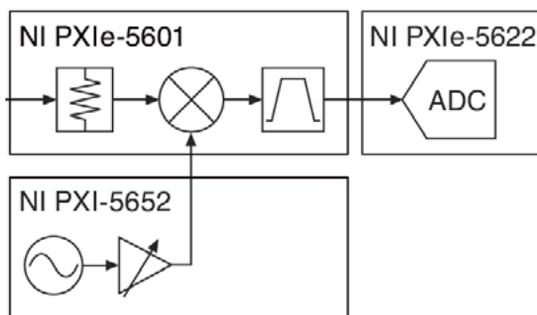


Fig. 36. Diagrama de bloques del NI PXIe 5663 [31].

La posibilidad de observar los fenómenos a ese nivel es lo que hace la diferencia en investigar con una plataforma modular de este tipo. El gran ancho de banda asociado a su desempeño, en prueba y medida, su velocidad de respuesta y la posibilidad de desplegar diagramas para el análisis de las señales, como el diagrama de ojo para observar interferencia inter-simbólica y medir el desempeño de un sistema de comunicaciones en 3D, llevan a este tipo de instrumentos a la gama de los vectoriales.

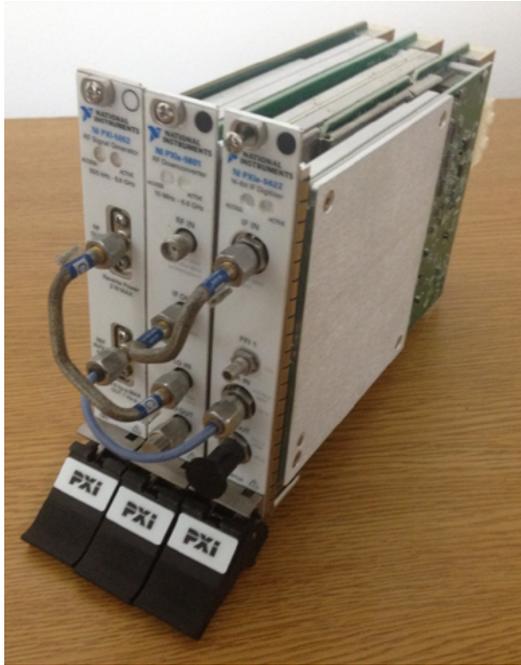


Figura 37. Analizador de señales NI PXIe-5663.

Visualización de señales en tiempo y frecuencia

Con ayuda del Scope Front Panel, asociado al módulo NI PXIe-5622 (16 bit IF digitizer), que equivale a un osciloscopio conectado a la salida del generador de señales, es posible visualizar la modulación AM (Modulación de amplitud) generada mediante la ejecución del ejemplo suministrado por el fabricante.

La señal se produce en el generador PXI-5673 y se aplica a la entrada del módulo que habilita el osciloscopio virtual mediante cable de 50 ohmios de impedancia. La señal se produce en el generador PXI-5673 y se aplica a la entrada del módulo que habilita el osciloscopio virtual mediante cable de 50 ohmios de impedancia. En la siguiente figura se puede observar la señal que resulta del proceso de modulación de una portadora de 100 MHz mediante una señal de mensaje senoidal de 5 MHz, con índice de modulación $m=0.5$.

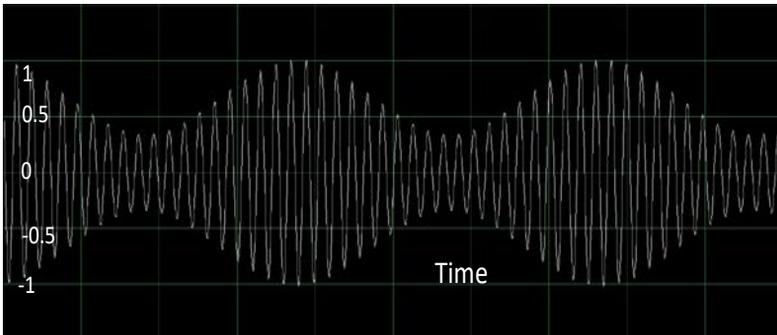


Fig. 38. Modulación de amplitud con $m=0.5$.

De la misma manera es posible verificar el cambio sufrido en la forma de onda modulada al variar el índice de modulación a un valor de 1. Esto se muestra en la figura 39.

Una buena forma de visualizar fenómenos en alta frecuencia son los barridos tanto de frecuencia como de potencia. En un barrido de frecuencia, un pulso

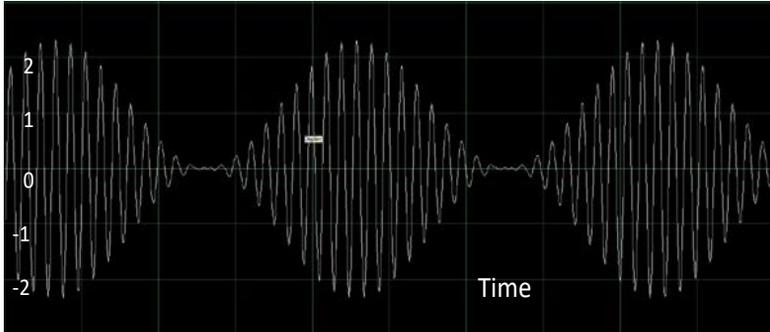


Fig. 39. Modulación de amplitud con $m=1$.

de señal se va desplazando por medio de pasos de valor de frecuencia por unidad de tiempo en un rango previamente determinado. Algunos dispositivos como los radares requieren este tipo de aplicación de RF [32]. Con el equipo es fácil visualizar un barrido de este tipo, y gracias a la flexibilidad de la programación con LabVIEW, se puede modificar el paso y el rango, así como la potencia de la señal que va a realizar el barrido. La siguiente figura muestra la secuencia de este barrido, empezando en 1 GHz y terminando en 1.2 GHz. Se muestra la señal en los dos estados extremos y en el intermedio.

También es posible representar un barrido de potencia en el que se ve claramente como la señal va variando su potencia en el tiempo.

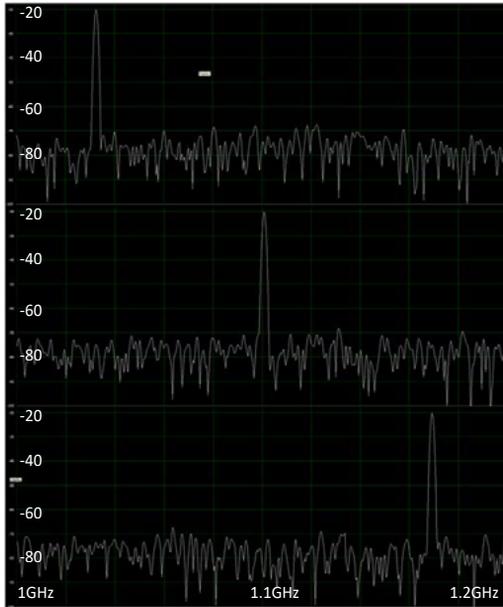


Fig. 40. Barrido de frecuencia.

Este tipo de aplicación se configura igual que la anterior, por pasos de potencia en unidad de tiempo. Se muestra la señal en los dos estados extremos y en el intermedio, como en el caso anterior. Es claro cómo la potencia va variando para la misma frecuencia todos estos parámetros configurados en el software.

En la Fig. 42 se muestra una señal que representa en el tiempo una modulación analógica de frecuencia (FM), donde se aprecian claramente los cambios de frecuencias ocurridos en la señal para una portadora de 100 KHz y un mensaje de 5 KHz.

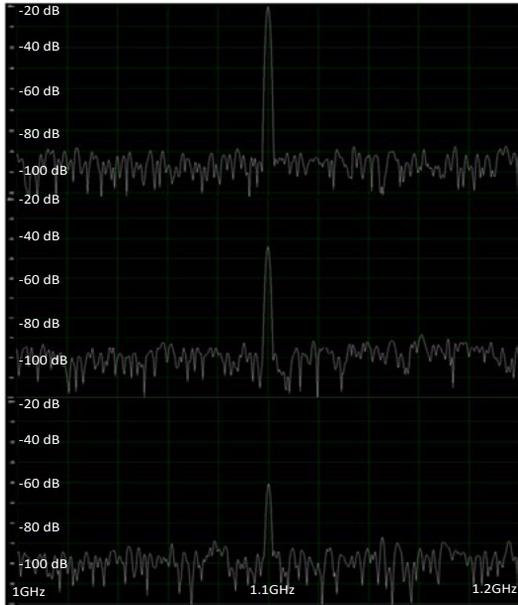


Fig. 41. Barrido de potencia.



Fig. 42. Modulación FM con portadora 100 MHz y mensaje 5kHz.

En la siguiente Fig. 43, se muestra la representación en el tiempo de una modulación digital 8 FSK con una señal portadora de 1 GHz.

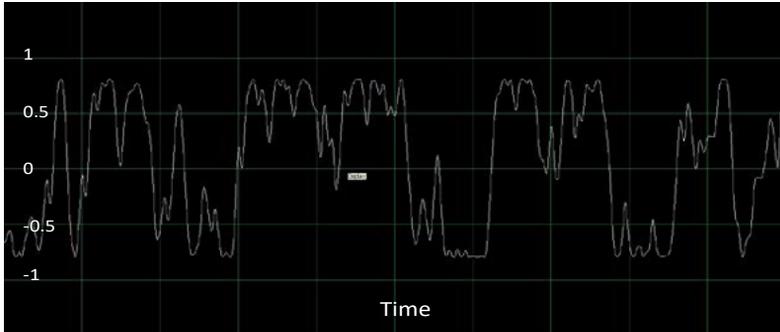


Fig. 43. Modulación 8FSK con portadora de 1GHz.

CONCLUSIONES

La configuración de módulos PXI que se describió en el presente trabajo permite la generación y análisis de señales de RF hasta 6.6 GHz. Esto hace muy útil al equipo para la caracterización de los sistemas de comunicaciones actuales e introduce al investigador al campo del diseño, desarrollo y expansión de estándares de la rama. Se presentó la descripción técnica de los módulos del fabricante National Instruments y lo que se puede realizar con ayuda de los kits de herramientas virtuales (Toolkits) del mismo fabricante, que a nivel de software extienden la capacidad propia de LabVIEW, proveyendo instrumentos virtuales (VI) listos para su uso y ejecutando tareas apoyadas en el hardware o sin él. Para el caso de la configuración tratada, se destacan el ModulationToolkit (MT) que provee VI que desarrollan todo tipo de modulaciones analógicas y digitales y el Spectral Measurement Toolkit que incrementa las capacidades de análisis y visualización.

La plataforma descrita para pruebas y medidas puede llevar a un programa de ingeniería electrónica, de telecomunicaciones y a empresas con departamentos de investigación en esta rama a hacer significativos aportes a cualquier rama de la investigación. En cuanto a las comunicaciones, es posible hacer aportes a estándares habiendo recorrido el previo camino de la caracterización de algunos de los ya existentes para familiarizarse con el entorno de programación y los kits de herramientas virtuales con que se cuenta. La escalabilidad que

garantizan los fabricantes, y que se deduce por las amplias características y rangos de generación y análisis, hacen suponer que será un equipo vigente por mucho tiempo y para futuras generaciones de tecnologías. La propuesta de análisis planteada busca incentivar la apropiación de conocimientos a ese nivel, y el desarrollo del esquema OFDM es un reto planteado a los investigadores, aunque en la web se consiguen avances previos de VI que pueden servir de base.

A nivel académico, como soporte a programas de especialización y maestría, el equipo resulta ideal por el nivel de desarrollo que permite para el planteamiento de interesantes y hasta revolucionarios proyectos de grado que justifiquen su adquisición, por el esfuerzo que a nivel económico esto representa, aspecto que en el contexto local y regional no se puede desconocer.

Se logró tener un acercamiento inicial a la plataforma de prueba y medida, buscando que la comunidad académica local y nacional se interese por este tipo de herramientas que permiten dar saltos conceptuales por la posibilidad de comprobar teorías, en este caso de señales de radiofrecuencia, a un alto nivel académico por las características extendidas del equipo y sus posibilidades de escalabilidad, que hacen suponer que será vigente para varias generaciones de tecnologías inalámbricas y de comunicaciones, actuales y venideras.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] TokSon Choe, ChanYoung Hong, Jin Bae Park y Tae Sung Yoon, «Implementation of a time-frequency domain reflectometry system with PXI platform for a coaxial cable [fault location]», en *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE*, 2004, vol. 2, pp. 964- 968 Vol. 2.
- [2] S. J. Young, «Low-level-device programming with a high-level language», *Computers and Digital Techniques, IEE Proceedings E*, vol. 127, n.º 2, pp. 37-44, 1980.
- [3] D. Cheij, «An instrument obsolescence replacement solution using a PXI-based system», en *AUTOTESTCON 2004. Proceedings*, 2004, pp. 358-360.
- [4] T. Maxwell, K. Patil, S. Bayne y R. Gale, «Hardware-in-the-loop testing of GM two-mode hybrid electric vehicle», en *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2010 IEEE 12th Workshop on*, 2010, pp. 1-5.
- [5] Guangbin Liu, Yingfeng Qiu, Zhiyong Yu y Chaoshan Liu, «Design and implementation of software radio based signal generator using Lab VIEW», en *Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2006. ISSCAA 2006. 1st International Symposium on*, 2006, p. 4 pp.-1262.

- [6] «PXI Specification Tutorial - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/2877/en/>. [Accedido: 20-jun-2014].
- [7] PXI Systems Alliance, «PXI Systems Alliance - Home». [En línea]. Disponible en: <http://www.pxisa.org/Default.aspx>. [Accedido: 04-jul-2012].
- [8] PXI Systems Alliance, «PXI Systems Alliance - Home > Specifications». [En línea]. Disponible en: <http://www.pxisa.org/Specifications/Default.aspx>. [Accedido: 04-jul-2012].
- [9] G. Caesar y M. Wetzel, «PXI Express: extending backplanes to 6 Gbyte/s while maintaining backwards compatibility», en *Autotestcon, 2005. IEEE*, 2005, pp. 231-234.
- [10] «Development of PXI Modules - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/3281/en/>. [Accedido: 20-jun-2014].
- [11] National Instruments, «Preguntas Frecuentes sobre PXI Express - Developer Zone - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/3882/es>. [Accedido: 04-jul-2012].
- [12] National Instruments, «Planos Traseros PXI Express/CompactPCI Express». [En línea]. Disponible en: http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/pxi-backplanes_1.jpg&title=Planos%20Traseros%20PXI%20Express/CompactPCI%20Express&oracleLang=esa. [Accedido: 04-jul-2012].

- [13] National Instruments, «¿Qué es PXI? - Developer Zone - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/4811/es>. [Accedido: 04-jul-2012].
- [14] J. P. L. Veraguas, *Compatibilidad electromagnética*. Marcombo, 2006.
- [15] National Instruments, «What is the Star Trigger on the PXI Backplane? - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/36C85640D7F916B186256A8B007742DA>. [Accedido: 04-jul-2012].
- [16] National Instruments, «18-Slot PXI Express Chassis for PXI and PXI Express Modules - Data Sheet - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-335/lang/es>. [Accedido: 04-jul-2012].
- [17] GEOTEST, «Controlador Embebido GX7944». [En línea]. Disponible en: <http://www.geotestinc.com/imagepreview.aspx?pid=716&size=lg&img=GX7944.jpg&model=GX7944>. [Accedido: 04-jul-2012].
- [18] PXI System Alliance, «PXI Software Specification». [En línea]. Disponible en: http://www.pxisa.org/userfiles/files/Specifications/PXISWSPEC_R2DOT3.pdf.
- [19] National Instruments, «Ventajas de la Plataforma PXI y el Software de NI para el Sistema de Medidas de Sensores. - Developer Zone - National Instruments». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/11059/es>. [Accedido: 05-jul-2012].

- [20] «LabVIEW Real-Time». [En línea]. Disponible en: <http://labviewrealtime.com/>. [Accedido: 05-jul-2012].
- [21] J.A. Stancovic y R. Rajkumar, «Real-time operating systems», *Springer*, vol. 28, n.º 2, pp. 237-253, 2004.
- [22] National Instruments, «NI 5611 IQ Modulator Front Panel - NI RF Signal Generators Help (NI-RFSG 1.9) - National Instruments». [En línea]. Disponible en: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371025M-01/rfsg/ni5611_front_panel/. [Accedido: 01-jul-2014].
- [23] National Instruments, «Datasheet PDF Template - 032753305101.pdf». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/products/us/032753305101.pdf>. [Accedido: 07-jul-2014].
- [24] National Instruments, «Vector Signal Generator NI PXIe-5673, NI PXIe-5673E». [En línea]. Disponible en: http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_PXIe_5673.pdf.
- [25] W. Tomasi, G. M. Hernández y V. G. Pozo, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson Educación, 2003.
- [26] M. Faúndez Zanuy, «Sistemas de comunicaciones», Google Libros. [En línea]. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=_arH8J1d1FYC&pg=PA148&dq=modulaci%C3%B3n+qpsk&hl=es&ei=fpRMTvevM4TUgQfs7ajjBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCkQ6AEwAA#v=onepage&q=modulaci%C3%B3n%20qpsk&f=false. [Accedido: 01-jul-2014].

- [27] A. Bateman, «Comunicaciones digitales: diseño para el mundo real», Google Libros. [En línea]. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=DDLvSzM_hecC&pg=PA149&dq=dqpsk&hl=es&ei=gp1MTvbnDYWtgQfQiamCBw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=dqpsk&f=false. [Accedido: 01-jul-2014].
- [28] L. G. Sienna, «QAM, la guía completa», *CINIT, Centro de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones, A.C.*, 01-2003. [En línea]. Disponible en: <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=10>. [Accedido: 05-jul-2012].
- [29] National Instruments, «NI PXIe-5601 Specifications». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375026a.pdf>.
- [30] National Instruments, «NI PXIe-5622 Specifications». [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375023a.pdf>.
- [31] National Instruments, «Vector Signal Analyzer NI PXIe-5663, NI PXIe-5663E». [En línea]. Disponible en: http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_PXIe_5663.pdf.
- [32] Tan Jizhao y Hu Hongfei, «A frequency-sweep radar radome with excellent performance», en *Radar, 1996. Proceedings., CIE International Conference of*, 1996, pp. 167-170.

