



## Esquema de comunicación digital usando generador vectorial y SDR

### Digital communication scheme using vector signal generator and SDR

Juan Carlos Martínez-Quintero<sup>1</sup>, Edith Paola Estupiñán-Cuesta<sup>2</sup>, María Fernanda Hernández-Sotaquira<sup>3</sup>

**Resumen:** El uso de instrumentación de telecomunicaciones representa una herramienta de gran valor para medición y generación de señales en el área investigativa y en desarrollo tecnológico. Este trabajo busca mostrar las ventajas del uso de equipos de laboratorio especializado, diseñando un escenario de comunicación inalámbrico para prueba de diferentes esquemas de modulación. Se emplea un generador vectorial Keysight N5172B EXGX-Series como transmisor y una USRP como receptor. El generador vectorial maneja un rango de frecuencia de 9 kHz a 6 GHz, con excelentes características de pureza espectral, ancho de banda, bajo EVM (Error Vector Magnitude), alta ACPR (Adjacent Channel Power Ratio) y potencia de salida variable. Este equipo permite diseñar esquemas de comunicaciones digitales predefinidas en el equipo y generar señales en banda base haciendo uso de software como Matlab. En el escenario creado se implementaron modulaciones establecidas en la configuración básica del equipo como AM, FM, MSK, PSK y QAM, verificando su modulación a través del software GNURadio y la USRP de forma

---

<sup>1</sup> Ingeniero Electrónico, Universidad Manuela Beltrán, Colombia. Especialista en Seguridad física e informática, Escuela de comunicaciones Militares, Colombia. Magister en Sistemas automáticos de producción, Universidad tecnológica de Pereira, Colombia. Universidad Militar Nueva Granada/Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. [juan.martinezq@unimilitar.edu.co](mailto:juan.martinezq@unimilitar.edu.co) <https://orcid.org/0000-0001-9893-6592>

<sup>2</sup> Ingeniera en Telecomunicaciones, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Magister en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Universidad Militar Nueva Granada/Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones. [edith.estupinan@unimilitar.edu.co](mailto:edith.estupinan@unimilitar.edu.co) <https://orcid.org/0000-0002-4100-4943>

<sup>3</sup> Ingeniera en Telecomunicaciones, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Correo electrónico: [u1400844@unimilitar.edu.co](mailto:u1400844@unimilitar.edu.co)

inalámbrica y con un osciloscopio de forma alámbrica para verificar el diagrama de constelaciones. Por otro lado, se diseñó un programa para modulación digital (QPSK) en Matlab y se validó mediante la conexión al generador usando el protocolo SCPI. Con las pruebas realizadas y el análisis de constelaciones sobre la USRP se verificó rápidamente el funcionamiento del generador RF, evitando el uso de equipos demasiado costosos como los VSA (Vector Signal Analysis). El avance en tecnologías inalámbricas es posible analizarlo gracias a este tipo de equipos.

**Palabras clave:** Constelaciones, Generador Vectorial, Modulación, SDR.

**Abstract:** Applying “telecommunications instruments” is an important tool for the generation and measurement of signals in the research field as well as for the technological development. This paper shows the advantages of using specialized laboratory devices through the design of a wireless communication environment for test with different types of modulation. A vector signal generator Keysight N5172B EXGX-Series is implemented as transmitter and a USRP as receptor. The vector signal generator implements a frequency range of 9kHz up to 6GHz and good features such as: spectral purity, bandwidth, low EVB (Error Vector Magnitude), high ACPR (Adjacent Channel Power Ratio) and variable power output. The device allows to design different digital communication scenarios -already predefined- and to generate signal in base band by using software tools such as MATLAB. In the designed scenario, the predefined modulations in the device were implemented, i.e., AM, FM, MSK, PSK, QAM. The modulation was verified with: GNU Radio software, wireless USRP and wireless oscilloscope to confirm the constellations diagram. In the same way, a software for QPSK digital modulation was developed in MATLAB and it was validated with the connection to a generator and by using the SCPI protocol. Based on the tests performed and the constellation analysis with the USRP, it was possible to verify the RF generator performance. Thus, avoiding the implementation of high-cost devices such as VSA

(Vector Signal Analysis). It is possible to analyze the technological advances with the implementation of these types of tools.

**Keywords:** Constellations, Vectorial Generator, Modulation, SDR

## **1. Introducción**

En la actualidad la tecnología se volvió parte vital en el proceso de aprendizaje, el empleo de dispositivos y equipos de instrumentación en las cátedras permiten fortalecer el proceso de enseñanza. Un ejemplo de ello es el generador vectorial Keysight N5172B EXG, este equipo tiene gran potencial en el área de telecomunicaciones permitiendo en la academia evaluar sistemas de comunicación mediante la generación de señales complejas de RF y la creación de diferentes tipos de modulación con la ayuda del software MATLAB, Signal Studio o SystemVue, mediante los cuales se pueden realizar diferentes esquemas de modulación digital. El propósito de esta investigación es enriquecer a la comunidad estudiantil de la Universidad Militar Nueva Granada en el programa de Ingeniería en telecomunicaciones o afines sobre el correcto manejo del generador vectorial. Este artículo destaca la importancia del equipo de laboratorio especializado generador vectorial Keysight N5172B EXGX-Series. Este documento está organizado inicialmente con una introducción teórica sobre los conceptos más relevantes sobre generador vectorial Keysight N5172B EXGX-Series y esquemas de modulación En la segunda sección se muestra el escenario propuesto y los resultados obtenidos y la tercera sección muestra las conclusiones del trabajo realizado.

## 1.1. Contextualización Teórica

### 1.1.1 Generador vectorial Keysight N5172B EXG X-Series

Es un equipo electrónico capaz de generar ondas de señales ya sea periódicas o aperiódicas de manera análoga o digital. Las ondas generadas son secuencias de puntos con valores de voltaje a distintos instantes de tiempo. La Figura 1 y 2 permite apreciar gráficamente las principales interfaces del equipo y funcionalidades, y en la Tabla 1 se resumen las principales características técnicas.

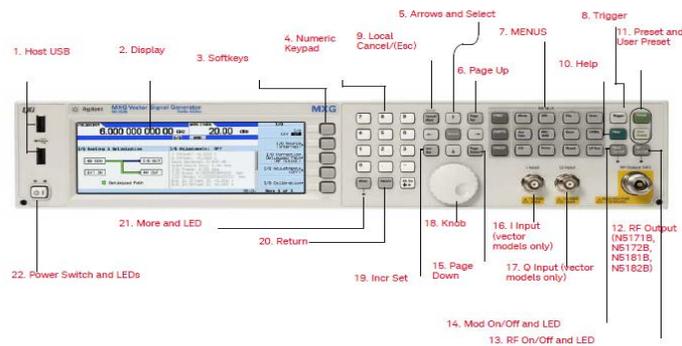


Figura 1. Panel front Generador vectorial Keysight N5172B EXG X-Series [1]

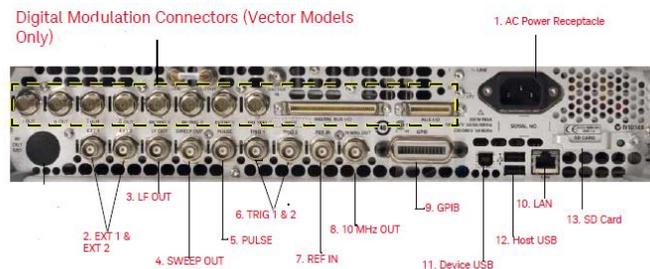


Figura 2. Panel trasero Generador vectorial Keysight N5172B EXG X-Series[1] .

<b>Equipo</b>	<b>Especificaciones Técnicas</b>	
Keysight N5172B EXG X-Series	<b>Potencia de salida a 1 GHz</b>	-144 dBm a +26 dBm
	<b>Modo de barrido</b>	Lista-Paso
	<b>Potencia de salida a 1 GHz</b>	-144 dBm a +26 dBm
	<b>Frecuencia</b>	9 kHz a 6 GHz
	<b>Software</b>	MATLAB/SystemVue/Signal Studio
	<b>Conectividad</b>	LAN (LXI)-GPIB
	<b>Señales generadas para móviles</b>	GPRS / EGPRS - GSM / EDGE/ HSPA, HSPA +/LTE/W- CDMA/EDGE Evolution/TD- SCDMA/802.11 WLAN 802.16 WiMAX
	<b>Modo Generador de Banda Base</b>	Reproducción de forma de onda y tiempo real

**Tabla 1. Especificaciones técnicas Keysight N5172B EXG X-Series** Fuente: Elaboración

Propia

El generador sintetiza cualquier tipo de forma de onda utilizando, procesamiento digital de señales preservando parámetros como: potencia, frecuencia y esquema de modulación. Dentro de sus principales características se destacan [1] [2] [3] [4]:

- Cuenta con un modulador I/Q que permite la generación de señales independientes I y Q,
- Cuenta con un BBG (Baseband Generator) que emite señales I/Q complejas.
- Permite realizar la configuración personalizada de esquemas de modulación al interior del mismo equipo mediante alguna herramienta de software compatible. Las modulaciones que son posibles crear pueden ser: Modulación analógica AM-FM-  $\Phi$ M y Modulación Digital BPSK, MSK, QAM entre otras.

- La Modulación digital hace uso señales de onda continua (CW) utilizando una arquitectura I/Q.
- El BBS usa formato de onda ARB y una vez los parámetros y la modulación se definen, el equipo calcula y genera la señal para después ser emitida.

### **1.1.2 Control Remoto del Equipo**

Una de las características del generador vectorial es que puede ser controlado remotamente a través de diferentes interfaces y protocolos como: GBPI, LAN, LXI y SCPI. GPBI (General Purpose Interface Bus) es un protocolo que permite la comunicación de los equipos programables con computadores y así poder enviar órdenes a los equipos [5]. Interface LAN (ethernet) definida por el estándar 802.3 que permite el control del equipo mediante esquemas de direccionamiento [6]. LXI (LAN Extensions for Instrumentation) está definido como un estándar basado en LAN y Ethernet, desarrollado para control de instrumentos y SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) definido como un protocolo para el control de instrumentos mediante la definición de sintaxis específica para los instrumentos [7] [8].

### **1.1.3 Modulación**

El proceso de modulación permite modificar características ya sea de amplitud, frecuencia o fase de una señal portadora de alta frecuencia mediante una señal moduladora de menor frecuencia que posee la información. La Tabla resume una vez se tiene una señal denominada portadora y se modifica sus características se generan diferentes tipos de modulación. La Tabla 3 resume algunas de las modulaciones existentes [9] [10].

$V(t) = V \text{ sen}(2\pi \cdot f \cdot t + \theta)$			
Modulación	Amplitud	Frecuencia	Fase
Análoga	AM	FM	PM
Digital	ASK	FSK	PSK
	QAM		

**Tabla 2. Técnicas de modulación**

Modulación	Nombre	Description
Análoga	AM	Modulación en amplitud (AM) que se obtiene al multiplicar una señal portadora de alta frecuencia por una señal moduladora o de información la cual ocasiona variaciones en parámetros fundamentales a la señal portadora en su amplitud obteniendo una señal modulada en amplitud.
Análoga	FM	Modulación en frecuencia (FM) caracterizada por variaciones de la señal portadora en frecuencia de acuerdo con la amplitud de la señal moduladora. Una vez la amplitud de la moduladora disminuye la frecuencia de la portadora también lo hace.
Digital	ASK	Esta transmisión consiste en asignar una amplitud distinta generalmente entre dos valores 0 o 1 a la señal portadora.
Digital	FSK	Variación de la modulación de frecuencia donde la señal moduladora es digital, BFSK (Modulación por desplazamiento de frecuencia binaria) es de naturaleza binaria que varía entre dos valores decretos de voltaje.
Digital	PSK	Modulación en fase donde la señal de entrada es digital binaria. BPSK Modulación por desplazamiento binario de fase con la posibilidad de tener dos fases de frecuencia 0 y 1, cuando la señal cambia la fase varía entre dos ángulos $0^\circ$ y el desfasados de $180^\circ$ .
DIGITAL	QAM	Contiene información en la portadora tanto en amplitud como en fase, consiste en transmisión dos mensajes por único camino, modulando la misma portadora desfasada $90^\circ$ entre mensajes. Formando dos canales ortogonales con el mismo ancho de banda
DIGITAL	I/Q	Este tipo de modulación representa la técnica expresada en IQ, donde I es la componente en fase de la forma de onda y Q la de cuadratura, tiene tanto una parte real como imaginaria en un diagrama polar.

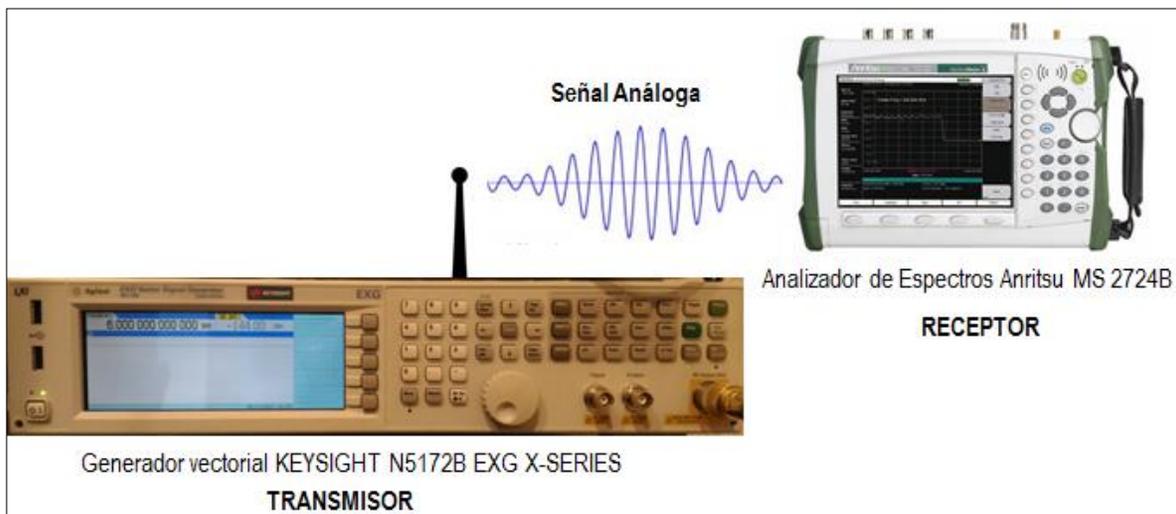
**Tabla 3. Técnicas de Modulación Análogas y Digitales [9-12]**

## 2. Desarrollo

Una vez se conocen las características del equipo, se realizan las pruebas con las modulaciones preconfiguradas en el generador vectorial Keysight N5172B EXGX-Series junto con analizador de espectro y un osciloscopio digital. Las modulaciones puestas a prueba fueron AM, FM, MSK, PSK y QAM. Para las modulaciones análogas se hicieron mediciones con analizador de espectros y para las modulaciones digitales se verificaron los diagramas de constelaciones con el osciloscopio.

## 2.1. Modulación Análoga

El escenario planteado para modulación análoga AM y FM se observa en la Figura 3. El generador vectorial está definido como transmisor y el analizador de espectro Anritsu MS2724B como receptor. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**<sup>4</sup> resume los parámetros definidos para las modulaciones puestas a prueba.



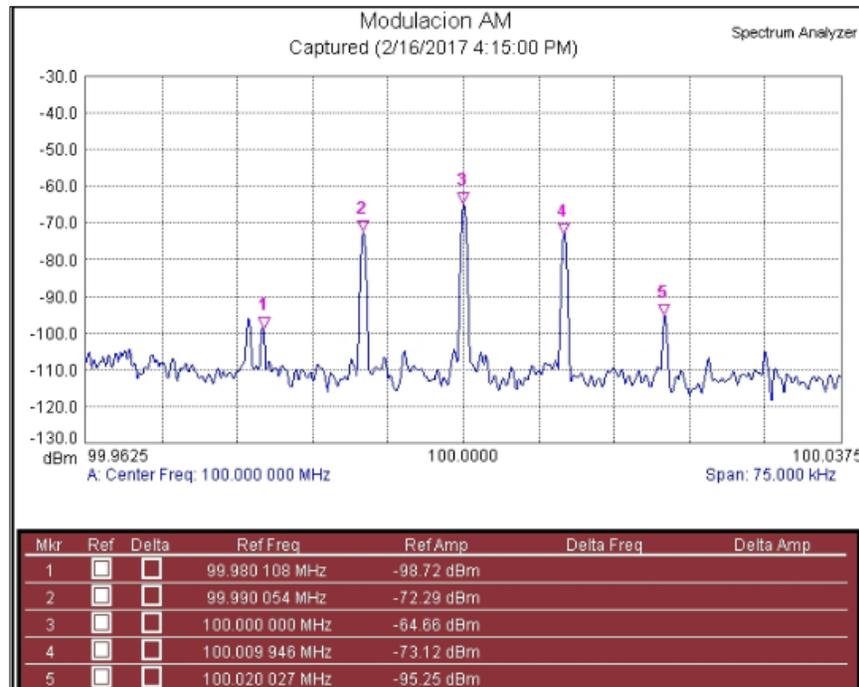
**Figura 3. Escenario implementado Modulación Análoga.**

Modulación	Frecuencia Portadora	Potencia	Frecuencia Moduladora	Índice de Modulación	Índice de desviación de frecuencia
AM	100 MHz	-20dBm	10 kHz	80%	/
FM	100 MHz	-20dBm	10 kHz	/	100 kHz

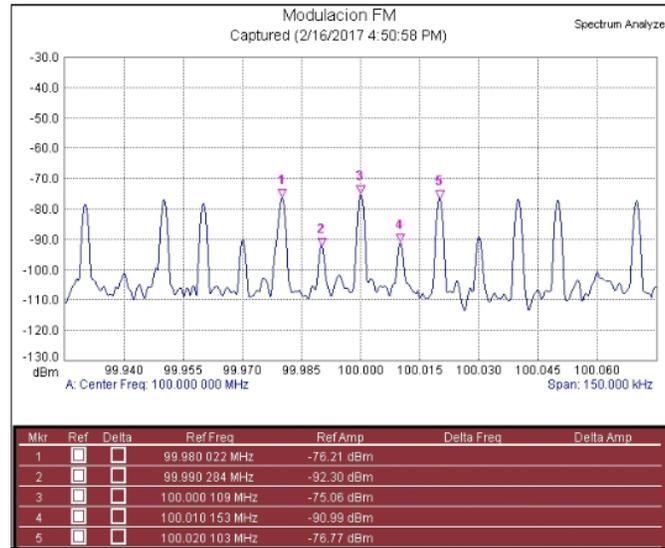
**Tabla 4. Parámetros de Modulación AM**

La

Figura 4 y Figura 5 muestran los resultados de la recepción tanto para AM como FM. De la modulación AM se observa la generación de una modulación AM doble banda lateral con portadora full, se puede observar las dos bandas laterales una con unas frecuencias de 99,990 MHz y 100,009 MHz.



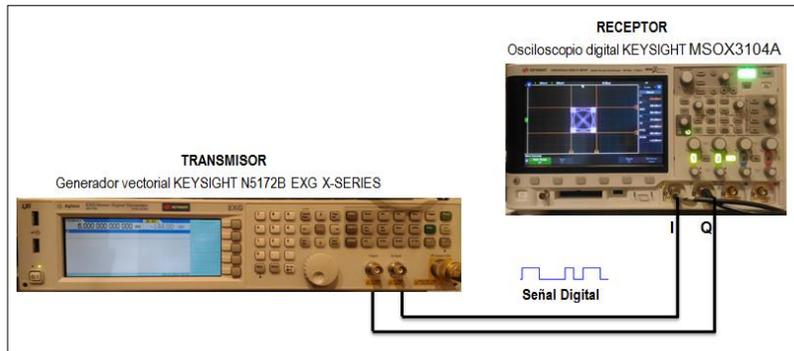
**Figura 4. Modulación en amplitud AM**



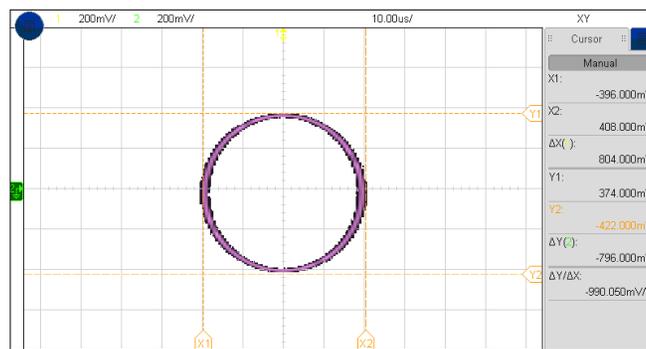
**Figura 5. Modulación en frecuencia FM**

## 2.2 Modulación Digital

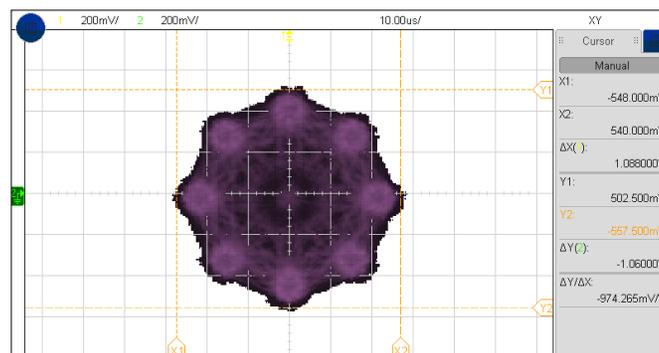
El escenario implementado para las modulaciones digitales establecidas se observa en la Figura . En la recepción se utilizó un osciloscopio digital KEYSIGHT MSOX3104A en modo XY, con el fin de visualizar las constelaciones de las modulaciones. Se implementaron las modulaciones predefinidas por el equipo: MSK, QPSK, 8QPSK Y 16QAM. Las modulaciones se realizaron con una señal portadora de 10MHz y una frecuencia de muestreo de 1 Msps. La Figura 7 muestra la constelación de una señal MSK con amplitud constante y variaciones en fase. La Figura 8 muestra la constelación de señal 8QPSK con sus 8 símbolos manteniendo una misma amplitud variando su fase. La Figura 9 representa la constelación correspondiente a la modulación BPSK caracterizada por sus dos símbolos situados en el eje de coordenadas x. La Figura 10 corresponde a la constelación de una señal modulada 16QAM y se pueden ver los 16 símbolos característicos de esta modulación, con sus respectivos cambios de amplitud y fase.



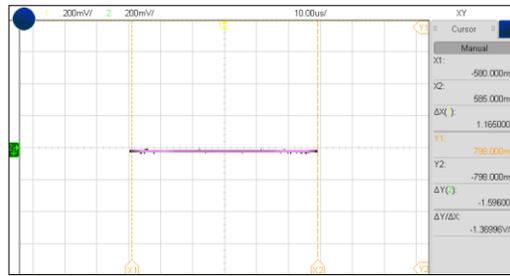
**Figura 6. Escenario implementado Modulación Digital**



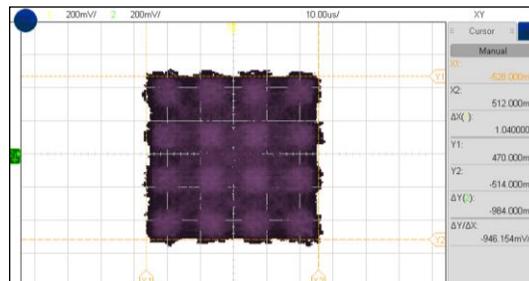
**Figura 7. Constelación modulación MSK.**



**Figura 8. Constelación modulación 8QPSK**



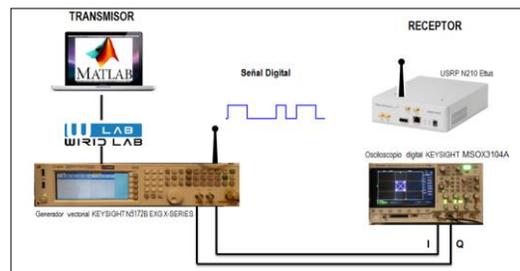
**Figura 9. Constelación modulación BPSK**



**Figura 10. Modulación 16QAM.**

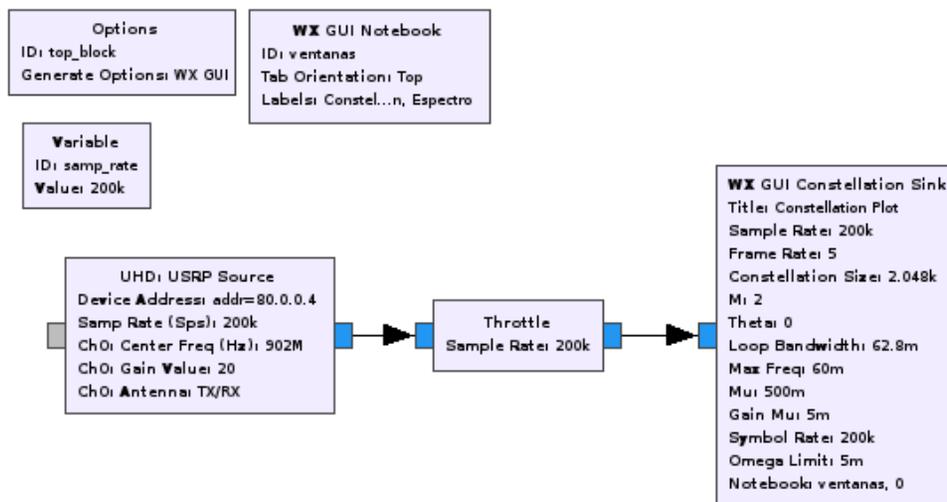
### 2.3. Generación de Señales usando MATLAB

Una vez se validan las modulaciones mediante las pre-configuraciones del generador vectorial, se procede a generar la señal de banda base usando el software MATLAB y posteriormente cargarlas al generador vectorial. Para verificar la transmisión de la señal radiada se usó una USRP. La Figura 11 permite ver el escenario implementado.



**Figura 11. Esquema implementación modulaciones usando MATLAB.**

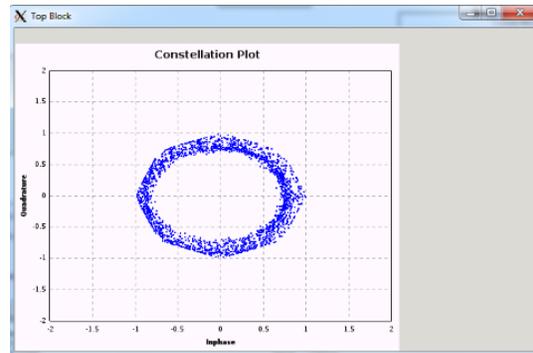
Para estas pruebas se desarrolló un código escrito en MATLAB para cada una de las modulaciones. El control del generador se realiza desde el computador usando el protocolo SCPI en Matlab, a través del comando **“connection= agt\_newconnection ('TCPIP', '80.0.0.10')”** configurando la dirección IP del equipo. Para la recepción de la señal modulada con el equipo USRP se creó en GNU Radio el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 12. El diagrama inicia con el bloque **“USRP Source”** que configura ganancia, muestreo de la señal entrante y sintoniza la frecuencia en la cual se recibirá la señal. Mediante el bloque **“WX GUI Constellation Sink”** se validan las modulaciones visualizando las constelaciones de las señales que se transmitieron ajustando parámetros como: **“Sample Rate”** 200KHz y **“M”** que indica el número de símbolos en una modulación.



**Figura 12. Diagrama de bloques recepción modulación constelaciones.**

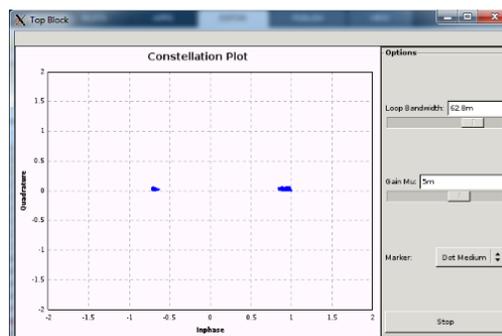
Para la generación de la modulación FM se creó un código en MATLAB. El resultado se evidencia mediante el software GNURadio una vez se recibe por la USRP como se ve en la Figura 13. Es

posible ver la constelación de la modulación con una variación en fase y una amplitud constante característicos de la modulación FM.

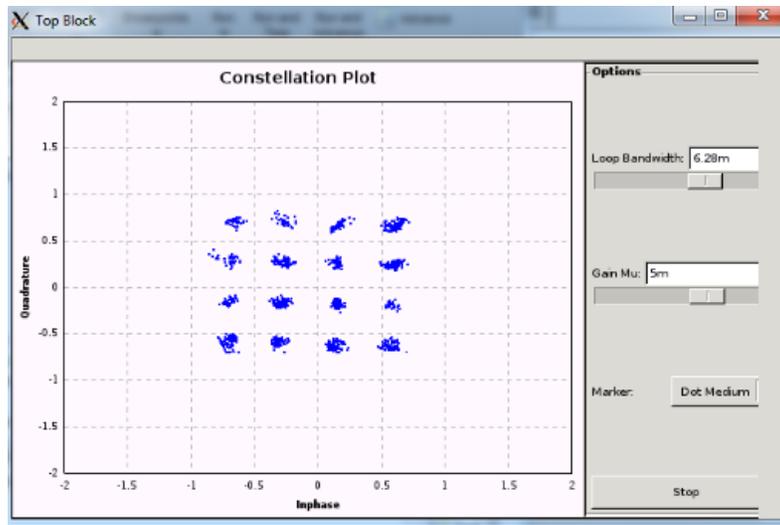


**Figura 13. Constelación modulación FM**

Por otro lado, también fue diseñado código para la generación la señal de modulación BPSK y 16QAM. Una vez ejecutado este código en el escenario implementado para BPSK, los resultados obtenidos se ven en el diagrama de constelaciones de la Figura 14, en él se observa el cambio de fase de  $180^\circ$ . En el eje de las coordenadas X se visualiza el cambio de 1 a -1. Para el caso de QAM, La Figura 14 permite ver el diagrama de constelaciones con sus característicos 16 símbolos con variación en fase y amplitud.



**Figura 14. Constelación modulación BPSK.**



**Figura 15.3 Constelación modulación 16QAM**

### 3. Conclusiones

Una vez se llevaron a cabo las pruebas con el generador vectorial usando MATLAB, se destaca que el equipo tiene la posibilidad de conectarse al software Matlab a través SCPI. La posibilidad de crear diferentes tipos de señales es de gran utilidad para tener una mayor comprensión del funcionamiento de las modulaciones lo que ayudaría a cada estudiante, investigador o docente de la Universidad fortalecer sus conocimientos y puede ser muy útil para asignaturas como comunicaciones análogas, digitales y móviles.

La combinación de equipos de RF como generador vectorial para transmisión y USRP para recepción proporcionan facilidades a la hora de utilizar herramientas para generación, medición y análisis como el caso de Matlab o de uso libre como GNU-Radio. El avance en este tipo de tecnologías es grande en cuanto a desarrollo de sistemas de comunicaciones y es posible aterrizarlo gracias a estos equipos.

Con las pruebas realizadas de análisis de constelaciones se pudo verificar de forma rápida el funcionamiento del generador de RF yendo más allá de las pruebas con analizador de espectro las cuales solo permiten determinar intensidades de potencia y anchos de banda y evitando el uso de equipos demasiado costosos como los VSA (Vector Signal Análisis).

## **Reconocimientos**

Este trabajo fue realizado gracias a la Universidad Militar Nueva Granada, en el grupo de investigación GISSIC semillero MAXWELL.

## **Referencias**

[1] Keysight Technologies, “Keysight X-Series Signal Generators N5171B/72B/73B EXG N5181B/82B/83B MXG User's Guide”, vol. 1, 2016.

[2] P. F. BUITRÓN, “LABORATORIO PARA TELEFONÍA CELULAR UTILIZANDO ELGENERADOR VECTORIAL DE SEÑALES ANRITSU MG3700A”, 2010.

[3] Keysight Technologies, Signal Generator Selection Guide, » Keysight Technologies, 2013 - 2015, USA, 2015.

[4] Keysight technology, Keysight technology Vector Signal generator N5172B EXG X-Series, » 2016. disponible en: <http://www.keysight.com/en/pdx-x201910-pn-N5172B/exg-x-series-rf-vector-signal-generator-9-khz-to-6-ghz?nid=-32490.1150485&cc=CO&lc=eng&pm=ov&state=3>

[5] Keysight Technologies, “Tips on using Keysight GPIB Solutions in National Instrument's LabVIEW Environment”, Keysight, USA, 2014.

- [6] International Business Machines (IBM), disponible en: [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/ssw\\_ibm\\_i\\_72/rzajt/rzajtlan.htm](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/ssw_ibm_i_72/rzajt/rzajtlan.htm)
- [7] National Instruments, “LXI (LAN Extensions for Instrumentation)”, disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/7255/en/>
- [8] Keysight technology, Following the SCPI Learning Process and Using the Tool. disponible en: [http://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/FollowtheSCPILearningProcessandUsingtheTool.pdf](http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/FollowtheSCPILearningProcessandUsingtheTool.pdf)
- [9] Universidad Militar Nueva Granada, “WIRID LAB”, 2016. disponible en <http://wirid-lab.umng.edu.co/about/>
- [10] J. C. Luhe Hong, “The application guide of mixed programming between MATLAB and other programming languages”, Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 the 2nd International Conference, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICCAE.2010.5452058>
- [11] J. E. Morales Ortega, “Desarrollo de guías de laboratorio aplicando radio definido por software para la implementación de un handover con estaciones base de segunda generación y la primera fase de una estación base de cuarta generación”, Bogotá, 2017.
- [12] J. C. Martínez-Quintero, E. P. Estupiñán-Cuesta, V. D. Rodríguez-Ortega, “Raspberry PI 3 RF signal generation system”, *Visión electrónica*, vol. 13, no. 2, pp. 294–299, 2019. <https://doi.org/10.14483/22484728.15160>