

**EVALUACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE SDR PARA LA  
IMPLEMENTACIÓN DE GPR USANDO RADAR DEFINIDO POR SOFTWARE****EVALUATION OF AN SDR PLATFORM FOR THE IMPLEMENTATION OF  
GPR USING SOFTWARE-DEFINED RADAR****Andrés Mauricio Igirio Vargas, Juan Carlos Martínez**

**Universidad Militar Nueva Granada** Facultad de Ingeniería, Ingeniería en  
Telecomunicaciones - Grupo de Investigación GISSIC.  
Carrera 11 # 101-80, Bogotá, Cundinamarca, Colombia.  
Teléfono (57+1) 650 0000.  
E-mail: {u1401189, juan.martinezq}@unimilitar.edu.co.

**Resumen:** La tecnología de radio definido por software (Software Defined Radio - SDR), ha puesto al alcance de investigadores y académicos el insumo necesario para desarrollar y probar tecnologías en comunicaciones inalámbricas nuevas o en uso. Uno de los campos en los que recientemente se ha venido usando SDR es en el desarrollo y aplicación de diferentes técnicas de radar. El radar de penetración de suelos o Ground Penetrating Radar (GPR), tiene diversas aplicaciones en la detección de gran variedad de materiales u objetos que se encuentran bajo tierra. El uso de esta herramienta se destaca en campos como la minería, arqueología, glaciología, aplicaciones militares y últimamente ha cobrado gran importancia al tener gran potencial para el desarrollo de detectores de minas antipersona de bajo costo. El presente artículo evalúa el potencial de la plataforma Nutaq Pico SDR 2x2 para su posible uso en un GPR, analizando su comportamiento en cuanto a respuesta en frecuencia y otras características técnicas. Se evaluaron la versatilidad de la plataforma en cuanto a la configuración de parámetros como cambio de frecuencia y ganancia. Dicha evaluación se realizó aplicando dos tipos distintos de barridos, uno donde se varió solamente la frecuencia y otro donde se variaron las ganancias y la frecuencia. Como resultado de estas dos pruebas se evidenció la factibilidad de calibración del equipo para realizar futuras pruebas en un ancho amplio de frecuencias.

**Palabras clave:** SDR, GPR, PicoSDR, calibración.

**Abstract:** Software Defined Radio (SDR) technology has provided researchers and academics with the necessary input to develop and test new or existing wireless communications technologies. One of the fields in which SDR has recently been used is in the development and application of different radar techniques. Ground Penetrating Radar (GPR) has diverse applications in the detection of a great variety of materials or objects found underground. The use of this tool stands out in fields such as mining, archaeology, glaciology, military applications and lately it has gained great importance as it has great potential for the development of low-cost anti-personnel mine detectors. This article evaluates the potential of the Nutaq Pico SDR 2x2 platform for possible use in a GPR, analyzing its behavior in terms of frequency response and other technical characteristics. The versatility of the platform was evaluated in terms of the configuration of parameters such as frequency change and gain. This evaluation was made applying two different types of sweeps, one where only the frequency was varied and another where the gains and frequency were varied. As a result of these two tests, the feasibility of calibrating the equipment to carry out future tests in a wide range of frequencies was evidenced.

**Keywords:** SDR, GPR, PicoSDR, radio frequencies, calibration.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de radio definido por software (SDR) ha permitido en los últimos años el acceso al desarrollo y prueba de tecnologías inalámbricas que antes estaban restringidas al uso de equipos especializados de único propósito. Desde aplicaciones básicas como recepción de señales de FM comercial hasta la implementación de celdas de telefonía móvil han sido implementadas con éxito en plataformas de SDR. Por otro lado, SDR ha sido también planteada para ser una solución de comunicaciones frente a alguna adversidad en escenarios de emergencia (Parra et al. 2019). Las aplicaciones de radar se han consolidado como una de las áreas de estudio para la implementación de algoritmos ya existentes y prueba de nuevos métodos de detección para diferentes tipos de radar. Con la aparición de plataformas de SDR como las USRP (Universal Software Radio Peripheral) se ha profundizado el estado del arte y se han implementado tecnologías de radar combinando la versatilidad del hardware con el procesamiento digital de señales sobre procesadores de propósito general. En cuanto a esto último, han sido desarrollados programas especializados y de uso libre como GNURadio. Con este programa es posible acceder a gran cantidad de herramientas ya desarrolladas para diferentes tecnologías haciendo más amigable el procesamiento digital de señales de radio frecuencia (RF). Con GNURadio se puede realizar la programación de un radar de bajo costo evaluando diferentes características (Ralston and Hargrave 2012). Las plataformas SDR de más alto desempeño cumplen los requerimientos técnicos necesarios para poder implementar OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) o un stepped-frequency GPR. La técnica stepped-frequency consiste en transmitir una serie de señales senoidales con un incremento lineal de frecuencia, este tipo de onda genera un espectro de frecuencia uniforme y su respuesta permite la implementación de radares de alta resolución en rango. A pesar de que existen algunos componentes necesarios que no están integrados en el SDR, es importante evaluar e investigar cómo se podría llegar a realizar dicha implementación (Jenks and Pennock 2017). Dado que el SDR está diseñado para ser usado normalmente en aplicaciones de comunicaciones, también se puede implementar en sensores de radar. Con las características que esto conlleva, se necesita tomar un ancho de banda instantáneo, comandos RF para la sincronización de muestreo digital y una rutina de sintonización secuencial que hace expandir

el ancho de banda para llegar a cubrir las bandas de 500 a 5000 MHz. a pesar de que los diseños iniciales son algo retadores, estos quedan opacados por sus ventajas potenciales de flexibilidad y versatilidad de hardware. (Samuel C. Carey and Waymond R. Scott, Jr. Georgia 2017).

Con el avance de radar sobre SDR, se popularizó el término SDRadar, el cual como su nombre lo indica es Radar Definido por Software. En algunos desarrollos se ha implementado con UWB (Ultra Wideband), usando una técnica de reconstrucción de ancho de banda para un tipo de stepped-frequency llamado frequency stacking, que consiste en el apilamiento de los pulsos de dichos anchos de banda, para crear una señal de ancho de banda sintético. Este diseño tiene múltiples aplicaciones de bajo costo como el GPR reconfigurable, detección de vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como UAV (Unmanned Aerial Vehicles) y plataformas de radares de apertura sintética, también conocidos como SAR (Synthetic Aperture Radar) (Prager et al. 2018).

Con la ayuda de GNU Radio, al ser un software de uso libre se han implementado diferentes algoritmos para el funcionamiento de un GPR. Los investigadores han desarrollado bloques de procesamiento de señal digital llamados “Cycle Banker”, “Reflection Simulator”, y “QT A-scan Sink” para simular y capturar todos los datos necesarios en un GPR. En este desarrollo basado sobre Linux se pueden observar gráficas en tiempo real de las señales transmitidas y recibidas para el análisis de ellas, siendo así un sistema robusto para posibilitar la detección de objetos debajo del suelo (Pongcol et al. 2019). Existen avances sobre la investigación de detección de minas antipersona con GPR integrado a un dron. El vehículo porta la plataforma SDR y el sistema de procesamiento, detectando minas antipersona con diferentes características dieléctricas, para este propósito se ha desarrollado un sistema de navegación aéreo preciso basado en tecnología de láser óptico, lo cual deja operar el dron a una altitud de 50 cm sobre el suelo, dichos experimentos han dado como resultado el detectar minas de diferentes morfologías, como también de detectar minas ubicadas a más de 20 cm de profundidad en terrenos semi húmedos (de hasta 70 %), también se logra cubrir un área de 60 cm<sup>2</sup> con materiales cubiertos con al menos 30 % de metal, la precisión del GPR está sobre el 80 % en los escenarios probados (Devia et al. 2017). El SDRadar también ha sido desarrollado en el software

LabVIEW, tomando todas las ventajas anteriormente mencionadas del SDR, aplicándolo a la técnica FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave). Sobre el software se desarrolló un programa de procesamiento de señal para analizar la señal recibida y correlacionarla con la señal transmitida para poder detectar el rango. Esta implementación es una alternativa para el desarrollo de GPR en el tema de detección de elementos bajo tierra usando SDR (MacAsero et al. 2019).

Por otro lado, la plataforma Nutaq Pico SDR se ha implementado en diferentes aplicaciones, por ejemplo, el diseño de una red DSA. En este desarrollo, se establece una red en la que la frecuencia puede cambiar autónomamente dependiendo de la interferencia o del jamming que se puede llegar a presentar en algún momento determinado, teniendo en cuenta que la red está organizada en diversos clusters y éstos operan en una sola frecuencia (Watson and Larouche 2017). Otra aplicación es la implementación de modulación adaptativa para sistemas de comunicaciones de aire a tierra usando ZeptoSDR, donde con el uso de la plataforma Nutaq ZeptoSDR se realiza una técnica de implementación de modulación adaptativa para la banda ancha en comunicaciones de aire a tierra (air-to ground) (A/G), donde con una transmisión de video en tiempo real se realiza dicha modulación adaptativa. El sistema autónomamente elige la modulación más adecuada donde se encuentran BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM y 64QAM, la cual se elegirá con el criterio del SNR que exista en el momento, basado en la estimación de la calidad del canal (El Alaoui Ismaili et al. 2015). Otra aplicación en la que se ha podido observar se detalla en el artículo “Transmisor ágil de RF para el desarrollo de prototipos de sistemas de microceldas”, donde, combinando la potencia de procesamiento de señal de la FPGA Xilinx ML605 Virtex-6 con la agilidad de frecuencia del transmisor de la tarjeta Nutaq Radio420X, y sus antenas reconfigurables. Se realizaron pruebas con WARPLab donde se utilizó un OFDM físico sin red y un mecanismo de control de ganancia en tiempo real, donde los resultados arrojaron que en ambos ámbitos se puede obtener confiabilidad ya sea con procesamiento con red o sin red añadido a la agilidad de la frecuencia del transmisor (Nguyen et al. 2016). En temas de navegación también se ha usado el equipo de Nutaq para un Equipo de Medición de Distancia (DME) de operación secuencial de bajo costo. Con la implementación de bajo costo de la plataforma Nutaq ZeptoSDR, se realiza una optimización de la navegación DME, evaluando la precisión de la medición de distancia y posición. Esto puede

aplicarse cuando se presente algún tipo de falla en el servicio de GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite (Jalloul et al. 2014). Se implementó también en un estimador de propagación Doppler de máxima probabilidad. Con la plataforma Simulink, y usando los bloques de Xilinx System Generator, se realiza un prototipo de una manera más rápida, las radiofrecuencias del diseño se implementan utilizando un kit de modelado de Nutaq, se valida y confirma la eficiencia en tiempo real de dichos prototipos (Ati et al. 2015).

El documento está dividido en introducción, donde se realiza la explicación de ciertos avances y antecedentes que ha tenido la aplicación de la tecnología SDR con diversas plataformas, marco conceptual, en el cual se hace un énfasis en las terminologías que se emplean en el artículo y en la investigación realizada, ventajas del SDR, en el cual se hace una contextualización de los beneficios técnicos que ofrece el radar SDR, características técnicas de la plataforma Nutaq Pico SDR 2x2, y por último la experimentación, en donde se explica el procedimiento realizado con la plataforma Nutaq Pico SDR 2x2, incluyendo su barrido de frecuencias y análisis correspondiente.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 Radar de penetración de suelos

Es un radar que permite ubicar elementos que se encuentran bajo tierra, tales como minas, algún tipo de elemento arqueológico o determinar la composición del suelo. Su funcionalidad, radica en enviar o transmitir una onda electromagnética la cual, al encontrar un elemento bajo tierra, va a rebotar y dicha onda va a ser recibida por el radar en cuestión, con ello se logrará determinar la longitud o profundidad a la que se encuentra el elemento detectado. El GPR ofrece la posibilidad y facilidad de observar las detecciones en un modelamiento en 3D, la cual es una de las técnicas más sencillas, pero más efectivas para tener mayor efectividad a la hora de tomar decisiones sobre los objetos que se están detectando bajo tierra, además los campos electromagnéticos generados y detectados por el GPR pueden ser descritos por las ecuaciones de Maxwell. (Oristaglio, Miller, & Haldorsen, 2002)

Características técnicas:

El radar de penetración de suelos tiene 3 diferentes aplicaciones, las cuales son:

**Limpieza:** Consiste en identificar y evitar las diferentes obstrucciones que haya en el sitio donde se esté realizando la medición, esto para disminuir las falsas alarmas a las que haya lugar.

**Verificación:** El GPR detecta objetos metálicos y no metálicos que se encuentren bajo tierra, el hecho de que también detecte elementos no metálicos comprueba que puede ser utilizado para los casos más desafiantes de detección de objetos. Éste tipo de radar no solamente detecta objetos, también perturbaciones del suelo, los cuales pueden ser relacionados directamente con puntos de excavación.

**Mapeo:** Las estructuras desconocidas pueden ser detectadas y marcadas, la excavación puede ser un objetivo para detectar respuestas del GPR ante infraestructura no documentada u obstrucciones de tipo natural.

**Aplicaciones:**

- Detección de hormigón
- Búsqueda forense
- Infraestructura
- Minería
- Geografía
- Arqueología
- Agricultura
- Uso en vías y puentes
- Uso en hielo y nieve
- Soluciones personalizadas

*Tabla 1: Frecuencias de antenas según su aplicación*

Aplicaciones	Frecuencias
Glaciología	12.5, 25 y 50 MHz
Geología	25, 100 y 200 MHz
Utilidades o Geotecnia	100, 200 y 250 MHz
Arqueología	250 y 500 MHz
Forense o búsqueda en nieve o hielo	250 y 500 MHz
Vías, concreto, puentes y minería	1000 MHz

## 2.2 Técnicas de radar:

### 2.2.1. CW

Continuous Wave (Onda Continua), el radar de onda continua consiste en transmitir y recibir ondas al mismo tiempo, el transmisor radia ondas mediante la antena, las cuales generan una oscilación senoidal continua en frecuencia. Con este tipo de radar se

puede realizar modulación de frecuencia o modulación de fase con PSK (Phase Shift Keying).

### 2.2.2. FMCW

Frequency-Modulated Continuous Wave (Onda Continua de Frecuencia Modulada), este tipo de radar radia de igual manera que el CW Radar, con la diferencia que el FMCW puede cambiar su frecuencia de operación durante las mediciones. (Salam, Vuran, and Irmak 2019).

Características técnicas principales:

La medición de la distancia se hace comparando la frecuencia de la señal recibida con la frecuencia de la señal transmitida

La duración de la onda transmitida es más grande que el tiempo requerido para la distancia de la medición del rango.

### 2.2.3. Stepped-Frequency Radar

Esta técnica tiene diferentes ventajas, por ejemplo, cada tono de frecuencia generado por un sintetizador stepped-frequency, es altamente estable y uniformemente espaciado con los demás tonos en un ancho de banda específico. Está bien documentado que el radar stepped-frequency tiene ventajas significativas sobre radares de sistema de impulso en el procesamiento de energía promedio y ancho de banda disponible, estas ventajas son importantes para extender el rendimiento de un GPR en términos de profundidad de penetración y potencia de resolución. Otra característica de este sistema es la reducción de la respuesta hiperbólica que se da cuando las ondas del radar pasan sobre un objeto esférico o cilíndrico (Noon 1996). Actualmente es una de las técnicas de radar más populares, en el momento en que se realiza la transmisión de la señal el transmisor no deja de enviar señales, de hecho va creando una serie de frecuencias una tras otra, donde cada una de estas va disminuyendo su longitud de onda continuamente, es decir, la frecuencia que se envió de primero, va a tener una longitud de onda más grande que las demás, pero también va a tener una frecuencia más baja que el resto, siendo la última frecuencia en transmitirse la que más alto valor tendrá. Mientras esto va ocurriendo el receptor va acaparando las frecuencias en el mismo orden que enviaron en el transmisor. Al momento de ser enviadas las frecuencias anteriormente mencionadas, las cuales son transmitidas mediante una antena de espiral UWB (Ultra Wide Banda) (Ultra Ancho de Banda), se reflejarán en el objeto que se encuentra bajo tierra, para posteriormente

llegar a la antena receptora, para evitar que las señales recibidas se solapen, se emplea el tipo de antena de espiral. Los parámetros principales de este tipo de radar son el rango inequívoco o también conocido como rango no ambiguo y la resolución de rango, los cuales se calculan de la siguiente manera (Nicolaescu et al. 2003):

### 2.3. Rango no ambiguo:

$$R = \frac{v}{2\Delta f}$$

Donde:

v: Velocidad de propagación

$\Delta f$ : Frecuencia de paso

El rango no ambiguo en un radar es la distancia máxima en la que la energía de un radar puede viajar entre pulsos y aun así producir información fiable.

### 2.4. Resolución de rango:

$$\Delta r = \frac{v}{2B}$$

Donde:

B: Ancho de banda

La resolución de rango es la capacidad del radar para poder distinguir entre dos o más objetivos que se encuentran en el mismo trayecto, pero a diferente rango.

### 2.5. SDR:

(Software Defined Radio). Es una combinación de tres partes, las cuales son software, circuitos RF y circuitos digitales especializados. Con la combinación de ellos se puede lograr una comunicación entre una antena de algún dispositivo y un host, como lo puede ser un computador, donde en el software se establecen las características de la señal a enviar como lo son la frecuencia, el ancho de banda, la amplitud y la ganancia. Estas configuraciones pueden ser realizadas en un SDR con software basado en diagramas de bloques, donde en cada uno de ellos se podrán establecer las características que sean necesarias. A su vez, también la información o las señales pueden ser

recibidas por dicho host, y por medio de este se pueden visualizar los diferentes tipos de señales requeridos.

### 2.6 Radio 420 M:

Es una tarjeta que está diseñada para aplicaciones multimodo en SDR, telecomunicaciones avanzadas, como lo son sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output), radio cognitivo, LTE, WiMAX, espacios blancos, Wi-Fi, GSM.

### 2.7 Nutaq Pico SDR 2x2:

Es una plataforma SDR como su nombre lo indica. A esta plataforma se le pueden configurar diversos parámetros técnicos de la comunicación RF. Consta de dos transmisores y dos receptores, cada uno de ellos puede ser configurado de manera autónoma, aunque para un mejor rendimiento es recomendable que ambos receptores y ambos transmisores tengan la misma configuración desde un inicio.

## 3. VENTAJAS DEL RADAR SDR

El radar de penetración de suelos basado en SDR ha demostrado ser una herramienta efectiva para localizar objetos debajo del suelo, gracias a sus diversas configuraciones, flexibilidad y versatilidad. Debido a que su ancho de banda se puede aumentar, se van a ver reducidas las falsas alarmas que se puedan llegar a presentar, ya que un ancho de banda mayor incrementa el rango de resolución de la señal y la medición de las frecuencias cercanas disminuye la ambigüedad de rango que pueda llegar a dar lugar en determinados casos. Cada configuración para realizar en cada una de las mediciones puede llegar a tomar un tiempo, afectando directamente la tasa de medición de un GPR convencional, pero con este nuevo proceso agregando SDR, se incrementa la eficiencia en cada una de las etapas, ya que cada modelo teórico de hardware y canales de señal, son fácilmente reemplazados por el SDR, reduciendo drásticamente el costo y retraso de cada iteración de ciclos. Además de esto, esta implementación hace que también sea fácil compartir los procesos de SDR con otras personas, ya que al tener plataformas similares es fácil adaptar los códigos o desarrollos de software, permitiendo además desarrollos colaborativos. Otro objetivo fundamental del GPR basado en SDR es llegar a reducir costos de infraestructura en las empresas que desarrollen sobre este tipo de sistemas debido a la reconfigurabilidad de la tecnología permitiendo la implementación de algoritmos novedosos a medida que se realizan desarrollos en el tema.

#### 4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PLATAFORMA NUTAQ PICO SDR 2X2

En la gráfica 1 se visualiza la plataforma Nutaq Pico SDR 2X2.



Fig. 1. Nutaq PicoSDR 2x2

En la tabla 2 se muestra una tabla de resumen con las características técnicas de la plataforma. Dentro de las características de destacan el amplio rango de frecuencias en el que se puede sintonizar y el ancho de banda instantáneo de RF.

Tabla 2: Características técnicas de la plataforma Nutaq Pico SDR 2x2

Elementos	Características
Tarjeta Portadora	Perseus 6011, equipada con una FPGA Virtex-6 y un Radio420M operacional
Amplificadores	Ajustables con software para un rango dinámico amplio de hasta 80 dB
Rangos de frecuencia	300 MHz – 3800 MHz (configurable por software)
Ancho de banda	1.5 MHz – 20 MHz (configurable por software)
Filtros	14 filtros pasabanda para disminuir interferencia
Calibración	Calibración automática DC offset

#### 5. EXPERIMENTACIÓN

En el procedimiento realizado se espera determinar la factibilidad de calibración de la plataforma de

acuerdo con su respuesta en frecuencia. Se pretende realizar un barrido de frecuencias y realizar para cada frecuencia una medición de potencia en el receptor. En un principio se dejaron constantes las ganancias, teniendo en cuenta que la plataforma Nutaq Pico SDR 2X2 trabaja entre las frecuencias de 300 MHz y 3.8 GHz, se realizó un barrido haciendo la toma de mediciones cada 50 MHz. De la siguiente manera: 300 MHz, 350MHz, 400 MHz, y así sucesivamente hasta llegar a 3 GHz.

En la gráfica 2 se presenta el escenario de prueba. Se realizó la transmisión y recepción de las señales usando la misma plataforma. Entre la antena transmisora y la receptora hay una distancia de 20cm sin obstáculos.



Fig. 2. Escenario de prueba

El resultado del barrido de frecuencias se muestra en la figura 3.



Fig. 3. Barrido de frecuencias

En la gráfica 3 se puede apreciar que se tiene una variación de la salida de potencia para diferentes frecuencias. Este comportamiento es indeseable en la aplicación que se espera desarrollar.

La calibración del equipo consiste en nivelar los valores de potencia para todo el rango de frecuencias, modificando las ganancias en cada frecuencia específica de acuerdo con el comportamiento en el barrido inicial.

La plataforma Nutaq Pico SDR 2X2 cuenta con diferentes tipos de ganancia tanto en transmisión como en recepción. Los cuales son:

#### Transmisor:

- TX VGA 1 Gain
- TX VGA 2 Gain
- TX Gain 3

#### Receptor:

- RX LNA Gain
- RX VGA Gain
- RX Gain 2
- RX Gain 3

**VGA:** Variable Gain Amplifier, es un amplificador de señal que se puede variar como se requiera, se utiliza en plataformas que requieran un alto rango dinámico, el cual busca abarcar el mayor rango posible.

**LNA:** Low-Noise Amplifier, es el primer amplificador, el cual debe estar con valores bajos de potencia, debido a que el primer amplificador es el que define el ruido de todo el sistema.

Empezando desde los 300 MHz se empieza a realizar el respectivo barrido de frecuencias, las ganancias que se variaron para poder obtener la potencia deseada, fueron los tres tipos de TX Gain que tiene la Nutaq Pico SDR 2x2.

El valor deseado fue tomado a conveniencia, dado que la mayoría de las potencias estaban entre -40 dB y -50 dB, se tomó un rango cercano que fue de -40 dB a -43 dB como los deseados a alcanzar en el barrido de frecuencias.

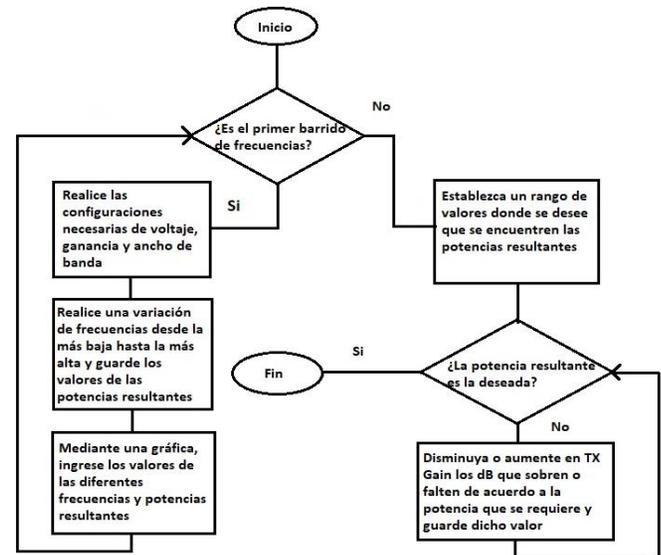


Fig. 4. Diagrama de flujo procedimiento

En la figura 4 se muestra un diagrama con el procedimiento utilizado para calibrar el equipo a un nivel de potencia específico. Para empezar el barrido de frecuencias, lo primero que se debe hacer es realizar las configuraciones técnicas necesarias (montaje), para luego poder proceder como es debido, a continuación, se realiza una variación de frecuencias en el rango establecido midiendo luego las potencias resultantes para cada frecuencia. Después del primer barrido se establece una potencia promedio y se procede a calibrar todas las frecuencias para obtener dicha potencia. Si no se encuentra la potencia deseada para determinada frecuencia, se procede a variar el TX Gain, ya sea disminuyendo o aumentando el valor en decibeles según corresponda. Finalmente se realiza una tabla con las ganancias establecidas para cada frecuencia, con el fin de implementarla en el programa que hace el barrido en el desarrollo del radar. El resultado de la calibración se muestra en la figura 5.

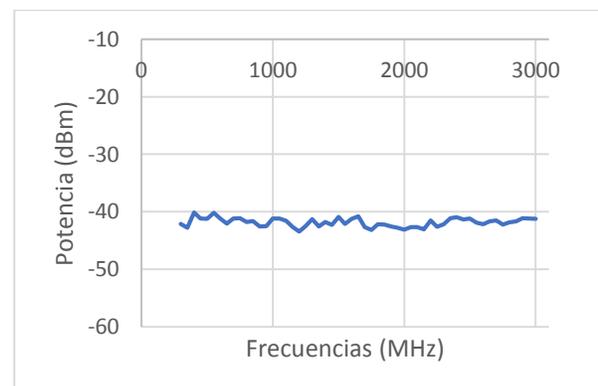


Fig. 5. Barrido de frecuencias calibrado

## 6. CONCLUSIONES

Como se puede observar en las figuras 3 aparece la respuesta sin calibración de la plataforma SDR. En la figura 5 se muestra que la plataforma puede ser calibrada modificando los parámetros de ganancia, demostrando un comportamiento más cercano al lineal para un amplio rango de frecuencias. El procedimiento utilizado puede ser empleado en la fase de operación del radar para entregar potencias similares para un barrido amplio de frecuencias.

A partir del comportamiento de la plataforma Nutaq Pico SDR 2x2, se puede establecer que efectivamente se puede emplear en un radar de penetración de suelos, ya que permite barrido de frecuencias en un amplio ancho de banda y posee un ancho de banda instantáneo que permite implementar diferentes técnicas de radar. Otra característica importante de la plataforma es que tanto el barrido de frecuencias como la variación de ganancias se puede realizar desde la FPGA, permitiendo mayor velocidad de respuesta para la sintonización y transmisión de los pulsos usados en tecnologías de radar.

La plataforma Nutaq Pico SDR 2x2, al tener el sistema de procesamiento integrado, da lugar a poder realizar procesamiento digital de señal a mayor velocidad ampliando el espectro de posibles algoritmos a implementar en temas de radar.

Para un trabajo futuro se implementará un radar stepped-frequency usando los resultados presentados en este artículo.

## 7. RECONOCIMIENTO

Este trabajo fue desarrollado al interior del grupo de investigación GISSIC. Producto derivado del proyecto de investigación INV-ING-2647 financiado por la Agencia Nacional del Espectro y ejecutado por la Universidad Militar Nueva Granada Vigencia 2018.

## 8. REFERENCIAS

El Alaoui Ismaili, Zakaria, Wessam Ajib, Omar A. Yeste-Ojeda, and René Landry. 2015. "Implementation of Adaptive Modulation for A/G Communication System Using

ZeptoSDR." *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings 2C5-1-2C5-10*.

Anon. 2017. "SOFTWARE DEFINED RADIO FOR STEPPED-FREQUENCY, GROUND-PENETRATING RADAR Samuel C. Carey and Waymond R. Scott, Jr. Georgia Institute of Technology School of Electrical and Computer Engineering 777 Atlantic Drive NW, Atlanta, GA 30332-0250." 4825–28.

Ati, Adel, Faouzi Bellili, Haithem Haggui, Abdelaziz Samet, and Sofiene Affes. 2015. "Implementation of a Maximum Likelihood Doppler Spread Estimator on a Model-Based Design Platform." *2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband, ICUWB 2015*.

Devia, C., J. Martinez-Moritz, C. Parra, J. Colorado, L. Neira, I. Mondragon, M. Perez, and D. Mendez. 2017. "An Integrated Aerial System for Landmine Detection: SDR-Based Ground Penetrating Radar Onboard an Autonomous Drone." *Advanced Robotics* 31(15):791–808.

Jalloul, Taher, Wessam Ajib, Omar A. Yeste-Ojeda, Rene Landry, and Claude Thibeault. 2014. "DME/DME Navigation Using a Single Low-Cost SDR and Sequential Operation." *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings 3C21–29*.

Jenks, C. H. J. and S. R. Pennock. 2017. "The Use of a Software Defined Radio as an OFDM GPR." *2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2017 - Proceedings 1–4*.

MacAsero, Jesrey Martin S., Olga Joy L. Gerasta, Daryl P. Pongcol, Vrian Jay V. Ylaya, and Aileen B. Caberos. 2019. "Underground Target Objects Detection Simulation Using FMCW Radar with SDR Platform." *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, HNICEM 2018 1–7*.

Nguyen, Danh H., Mikko Rauhanummi, Harri Saarnisaari, Nagarajan Kandasamy, and Kapil R. Dandekar. 2016. "Leveraging an Agile RF Transceiver for Rapid Prototyping of Small-Cell Systems." *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2015 - Proceedings 1–5*.

Nicolaescu, Ioan, Piet Van Genderen, K. W. Van Dongen, Joost Van Heijenoort, and Paul Hakkaart. 2003. "May, 2003,." 14–16.

Noon, David. 1996. "Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Enhances

- Ground Penetrating Radar.” *Department of Electricla and Computer Engineer PhD*(January).
- Parra, Carla, Edison Tatayo, Alejandro Paccha, Christian Tipantuna, and Jorge Carvajal. 2019. “SDR-Based Portable Open-Source GSM/GPRS Network for Emergency Scenarios.” *2019 Sixth International Conference on EDemocracy & EGovernment (ICEDEG)* 268–73.
- Pongcol, Daryl P., Olga Joy L. Gerasta, Jesrey Martin S. MacAsero, Vrian Jay V. Ylaya, and Aileen B. Caberos. 2019. “GNU-Radio Simulation Application for Impulse Radar Technique on Ground Object Detection.” *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, HNICEM 2018* 1–6.
- Prager, Samuel, Tushar Thrivikraman, Mark Haynes, John Stang, David Hawkins, and Mahta Moghaddam. 2018. “Ultra-Wideband Synthesis for High-Range Resolution Software Defined Radar.” *2018 IEEE Radar Conference, RadarConf 2018* (ii):1089–94.
- Ralston, J. and C. Hargrave. 2012. “Software Defined Radar: An Open Source Platform for Prototype GPR Development.” 172–77.
- Salam, Abdul, Mehmet C. Vuran, and Suat Irmak. 2019. “Di-Sense: In Situ Real-Time Permittivity Estimation and Soil Moisture Sensing Using Wireless Underground Communications.” *Computer Networks* 151:31–41.
- Watson, Susan and Jean Benoit Larouche. 2017. “Design of a Software Defined Radio-Based Tactical DSA Network.” *Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM 2017-Octob*:738–43.