



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**DISEÑO Y SIMULACION DE UN SISTEMA DE RADIO-  
SOBRE-FIBRA INCLUYENDO DEMODULACIÓN BASADA  
EN MACHINE LEARNING**

Autor

Diego Fernando Torres Vahos

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería  
Electrónica y Telecomunicaciones

Medellín, Antioquia

2020



**DISEÑO Y SIMULACION DE UN SISTEMA DE RADIO-SOBRE-FIBRA  
INCLUYENDO DEMODULACIÓN BASADA EN MACHINE LEARNING**

DIEGO FERNANDO TORRES VAHOS

**Informe de trabajo de grado como requisito para optar al título de:  
Ingeniero de Telecomunicaciones.**

Asesor

Jhon James Granada Torres  
Docente  
Universidad de Antioquia

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones  
Medellín, Antioquia  
2020

## Tabla de Contenido

<b>1 Resumen</b> .....	6
<b>2 Introducción</b> .....	7
<b>3 Objetivos</b> .....	9
3.1 Objetivo General .....	9
3.2 Objetivos Específicos .....	9
<b>4 Marco Teórico</b> .....	10
4.1 Espectro Radioeléctrico .....	10
4.2 Radio Sobre Fibra .....	11
4.3 Radio Sobre Fibra Digitalizado .....	12
4.3.1 Radio Definido por Software .....	12
4.3.1.1 Universal Software Radio Peripheral .....	13
4.4 Modulación Digital .....	14
4.4.1 Clasificación de las técnicas de modulación .....	14
4.4.1.1 Modulación por Desplazamiento de Amplitud .....	15
4.4.1.2 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia .....	16
4.4.1.3 Modulación por Desplazamiento de Fase .....	16
4.4.1.4 Modulación de Amplitud en Cuadratura .....	17
4.5 Demodulación Usando Machine Learning .....	17
4.5.1 Máquinas de Soporte Vectorial .....	18
<b>5 Metodología</b> .....	19
5.1 Simulación en el Software VPI .....	19
5.2 Desarrollo en GNU-Radio .....	21
<b>6 Resultados y Análisis</b> .....	23
<b>7 Conclusiones</b> .....	29
<b>8 Referencias Bibliográficas</b> .....	30

## Índice de figuras

<b>Fig. 1</b> Sistema RoF .....	6
<b>Fig. 2</b> Espectro radioeléctrico .....	9
<b>Fig. 3</b> Penalidad en potencia debido a la CD .....	10
<b>Fig. 4</b> Esquema de un sistema RoF .....	11
<b>Fig. 5</b> USRP modelo 29011 .....	12
<b>Fig. 6</b> Señales ASK y OOK .....	15
<b>Fig. 7</b> Señal FSK .....	16
<b>Fig. 8</b> Señal BPSK .....	16
<b>Fig. 9</b> Diagrama de constelación para el formato 16 QAM .....	17
<b>Fig. 10</b> Clasificación de Datos usando SVM .....	18
<b>Fig. 11</b> Kernel de SVM .....	19
<b>Fig. 12</b> Esquema m-QAM de un Sistema RoF .....	19
<b>Fig. 13</b> Diagrama de flujo de los algoritmos .....	21
<b>Fig. 14</b> Logo de GNU Radio .....	21
<b>Fig. 15</b> Diagrama de bloques para una modulación QPSK en GNU Radio .....	22
<b>Fig. 16</b> Configuración del bloque Constellation Rect. Object .....	22
<b>Fig. 17</b> Diagrama de constelación para un formato de modulación QPSK .....	23
<b>Fig. 18</b> Diagrama de constelación 16QAM para diferentes métodos de demodulación .....	24
<b>Fig. 19</b> Diagrama de constelación 64QAM para diferentes métodos de demodulación .....	24
<b>Fig. 20</b> BER vs Distancia para diferentes formatos de demodulación, sin ecualizar (W/O), con ecualizador (LMS), con Machine Learning (SVM) para 16QAM .....	25
<b>Fig. 21</b> BER vs Distancia para diferentes métodos de demodulación, sin ecualizar (W/O), con ecualizador (LMS), con Machine Learning (SVM) para 64QAM .....	26
<b>Fig. 22</b> MER vs BER para QPSK en GNU Radio .....	28

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> descripción de los conectores .....	13
<b>Tabla 2</b> Descripción de los leds .....	14
<b>Tabla 3</b> Técnicas de modulación .....	15
<b>Tabla 4</b> BER para diferentes formatos de modulación a 30 km de longitud con un LW 1 MHz .....	27
<b>Tabla 5</b> BER para los diferentes métodos de demodulación en QPSK .....	27



## 1 Resumen

El enfoque de este trabajo se centra en las redes híbridas con el propósito de aumentar las tasas de transmisión, extender el alcance y reducir la tasa de error de bit (BER); para ello se caracterizó un sistema de red híbrido de Radio Sobre Fibra, operando en las frecuencias, 60, 75 y 82 GHz; siendo la de 60 GHz banda de uso libre y las de 75 y 82 GHz bandas estandarizadas para las redes 5G, de este modo se logró determinar la viabilidad del modelo y su alcance, además se implementó técnicas de Machine Learning que mejoraron el desempeño de la red, en términos de la BER. Esta propuesta se dividió en dos etapas, en la primera etapa se desarrolló un esquema de simulación en el software VPI photonicsDesignSuite en el que se desarrolló un sistema de Radio sobre Fibra, se caracterizaron parámetros del sistema tales como: ancho de línea del láser, frecuencia de operación de la portadora, tasa de transmisión, longitud de la fibra de óptica operando en la banda de ondas milimétricas, lo que determinó el alcance y desempeño del sistema. Por otro lado, se logró evidenciar el comportamiento cíclico debido a la dispersión cromática muy notable en la banda de ondas milimétricas que limitó el alcance y desempeño del sistema, para mitigar sus efectos se implementaron técnicas de ecualización y de Machine Learning los cuales mejoraron el desempeño de la red obteniendo una reducción en la BER de hasta dos órdenes de magnitud para algunos casos.

En la segunda etapa del trabajo se caracterizó la etapa eléctrica de una red de comunicación utilizando un sistema de radio definido por software (SDR), el esquema se desarrolló utilizando el software de simulación GNU Radio en el cual se implementó para la transmisión un formato de modulación en fase conocido como QPSK. Por otro lado, se determinó el desempeño del sistema midiéndolo a través de la BER, además de utilizar algoritmos de ecualización y de Machine Learning que permiten compensar el ruido que está inmerso en un sistema de comunicación.

## 2 Introducción

La demanda de altas tasas de transmisión en los medios de transmisión alámbricos e inalámbricos han ido en aumento en los últimos años. La compañía Cisco Systems pronostica un incremento del tráfico IP alrededor de los 4.8 zettabyte para el año 2022, es decir una cantidad equivalente al tráfico IP cruzado por las redes desde que cobró vida internet en 1984 hasta el año 2016 [1]. Por lo tanto, las redes de próxima generación deben estar en la capacidad de suplir la creciente demanda de tráfico, producto de los nuevos servicios que requieren más ancho de banda como lo son las plataformas de streaming, juegos online, video y entre otras que son en alta definición (HD) o superior, es por ello que se plantea transmitir señales de radiofrecuencia (RF) por fibra óptica, gracias a la poca atenuación de este medio, por lo cual la comunicación entre antenas deja de existir y solo se usan para la conexión con el usuario final, conocida como Radio-sobre-Fibra (RoF) [2]. Una de las ventajas de la tecnología RoF, es que logra concentrar lo más costoso del sistema que es el equipo de RF en una estación central y el resto del equipo es instalado en los nodos o en los usuarios finales (Fig. 1), de esta forma se logra reducir los gastos en potencia y complejidad [3].

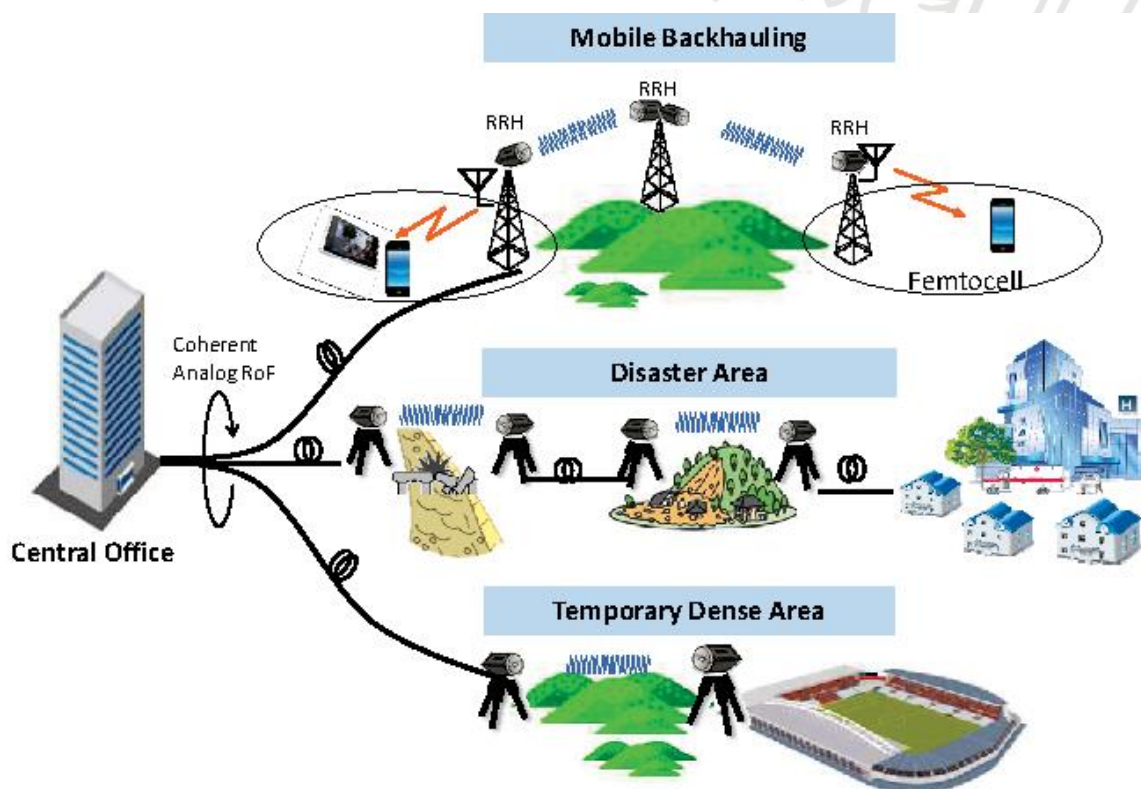


Fig. 1 Sistema RoF tomado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Seamless-convergence-of-radio-over-fiber-and-links-Bekkali-Nishimura/5c8022f3ac0fe9d114d463b451ce99da94e00cf9>

En los últimos años, la tecnología RoF ha sido considerada para soportar las redes móviles de quinta generación (5G), prometiendo transmisiones de alta velocidad de

hasta 10 Gbps [4]. No obstante, los sistemas RoF presentan problemas que afectan la calidad de la señal, así como cualquier sistema de transmisión, algunos de estos efectos son los efectos no lineales de la fibra óptica, dispersiones y variaciones en la potencia, por tal motivo se requieren métodos que logren mitigar estos efectos. Al principio se planteaba la detección óptica coherente, como una alternativa para la demodulación de señales en fase, dado que en un comienzo los sistemas RoF se implementaban con detección directa, los cuales son menos tolerantes al ruido e imperfecciones del sistema [5]. Sin embargo, la detección coherente es muy costosa. Con el paso de los años se buscaron alternativas que permitiesen un mejor desempeño en la transmisión de señales de RF en sistemas ópticos. En el año 2010 se propuso demodular señales usando algoritmos de clustering, para ello se usó el algoritmo k-means para una señal modulada en un formato 8PSK, probando ser efectiva para un sistema RoF con un enlace de 40 km de fibra óptica [6].

Ciertamente los sistemas RoF son una alternativa para escatimar algunos costos, sin embargo, los gastos asociados a los equipos de operación y las licencias requeridas para su funcionamiento los cuales son muy costosos, esto se vuelve una limitante para que una organización esté dispuesta a ofrecer servicios de radiodifusión [7], una alternativa en el cual se está trabajando para reducir costos, es la implementación de sistemas RoF digitalizados, para ello se recurre al uso de radio definido por software (SDR) los cuales son sistemas de comunicación en el que la mayoría de sus funciones (modulación/demodulación, banda de recepción/emisión, etc.) se implementan mediante de software por lo que los costos asociados a la parte de hardware se ven reducidos considerablemente [8]. Se han llevado estudios a cabo sobre el uso de SDR para generar señales multiplexadas, con la cual logran buscar candidatos óptimos en cuanto a tasa de error de bit para las redes 5G [9]. De esta manera el uso de SDR resulta prometedor para la próxima generación 5G en la cuales se buscan que las redes sean robustas en cuanto a ancho de banda y los retardos con relación a la latencia sea inferior a los 1 ms [10].



### 3 Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

- Diseñar y simular un sistema de Radio-sobre-Fibra que incluya una técnica de demodulación basada en Machine Learning que mejore el desempeño de la demodulación convencional en términos de la tasa de error de bit.

#### 3.2 Objetivos Específicos

- Estudiar y comprender los diversos sistemas de Radio-sobre-Fibra, identificando los fenómenos y distorsiones que ocurren en las señales transmitidas.
- Diseñar y simular un sistema de Radio-Sobre-Fibra en el software VPI, incluyendo la caracterización en términos de la tasa de error de bit en función de diferentes parámetros de la red tales como: distancia de transmisión, ancho de línea del láser y relación señal a ruido.
- Diseñar e implementar en una tarjeta USRP un sistema de radio definido por software que permita ser utilizado para la etapa eléctrica de un sistema de Radio sobre Fibra (modulación y demodulación digital).
- Implementar una técnica de Machine Learning en una plataforma de simulación que permita demodular las señales de radio simuladas en VPI y las generadas en la tarjeta USRP
- Validar la técnica de demodulación basada en Machine Learning en términos de la tasa de error de bit, comparándola con la demodulación convencional

## 4 Marco Teórico

### 4.1 Espectro Electromagnético y tendencia

Este espectro es aquel conformado por todo el conjunto de frecuencias a la cuales se produce radiación electromagnética. Hoy en día se utilizan este tipo de radiación para transmitir información, a través de medios guiados (par trenzado, cable coaxial, fibra óptica) o medios no guiados (el aire o el vacío) [11]. Una porción de este espectro usado para la radiocomunicación se conoce como el espectro radioeléctrico (Fig. 2), este espectro es un conjunto de ondas electromagnéticas con la capacidad de propagarse por el espacio sin requerir de un medio y es usado en la prestación de servicios de telecomunicaciones, radiodifusión, televisión, etc. Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), esta franja va desde los 3 KHz hasta los 3000 GHz, debido a que esta franja es limitada el gobierno se encarga de gestionarlo [12].

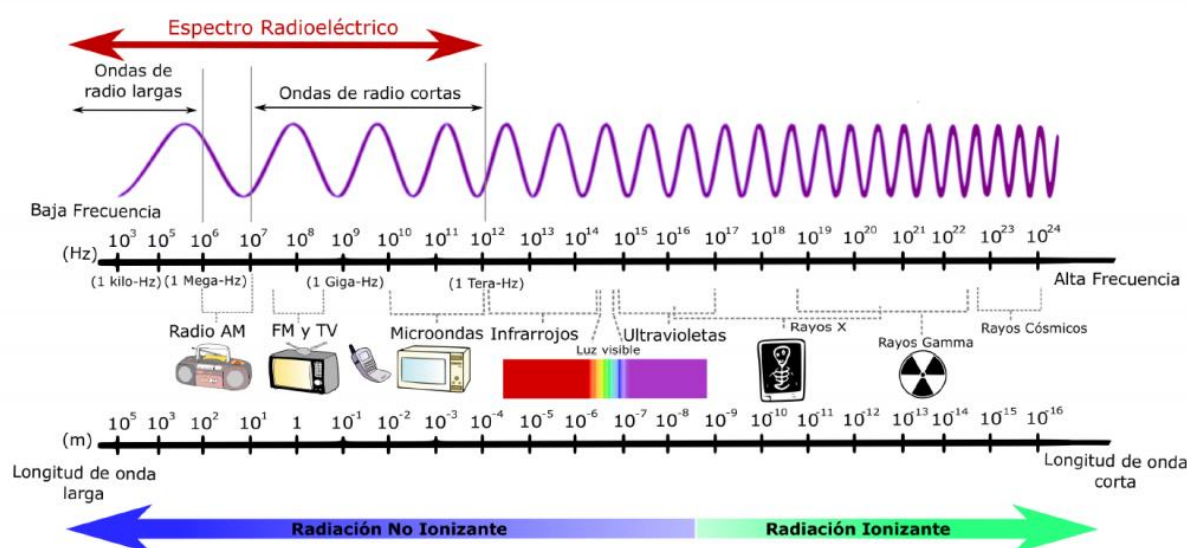


Fig. 2 Espectro Radioeléctrico tomado de <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/eem/>

Actualmente la mayoría de las franjas disponibles de este espectro para servicios de telecomunicaciones se encuentra ocupado e independiente de su eficiencia es necesario más ancho de banda para las nuevas aplicaciones de alto rendimiento [13]. Por tal motivo se han llevado a cabo investigaciones en una región del espectro conocido como banda de ondas milimétricas (MMW), la cual comprende un rango desde los 30 GHz hasta los 300 GHz, sobre todo en la banda de los 60 GHz [14]. El objetivo de operar en la banda MMW se debe básicamente a que las redes de comunicación inalámbricas de próxima generación han de suministrar muy altas velocidades de datos, con baja latencia, un aumento significativo en la calidad del servicio (QoS), en comparación con las redes actuales 4G LTE; para satisfacer la

brecha existente entre la demanda por los usuarios y la capacidad del canal, los equipos de comunicación MMW se han convertido en un fuerte atractivo para la próxima generación 5G [15].

#### 4.2 Radio sobre Fibra

Los sistemas RoF se caracterizan por estar compuestas por dos tipos de tecnologías para la transmisión de información, el espacio libre y la fibra óptica. En esencia, los sistemas RoF transmiten señales por fibra óptica para entregar a la salida la señal de RF a la base de la antena [16]. El propósito de transmitir las señales de RF a través de la fibra óptica, es compensar las altas pérdidas del medio inalámbrico, ya que la fibra es el medio de transmisión por excelencia, pues posee una inmunidad a la interferencia electromagnética y su atenuación es considerablemente baja, alrededor de unos 0.5 dB/km [17]. En los sistemas RoF se busca que las distancias que abarquen la fibra óptica sean lo más grande posible, así se puede evitar una etapa de amplificación de la señal, una alternativa para ello es aumentar la potencia en la transmisión. Sin embargo, no es recomendable, ya que cuando existen altos niveles de potencia, aparecen fenómenos que comprometen la calidad de la señal como la dispersión cromática (CD), la dispersión del modo de polarización (PMD), por mencionar algunas [18]. Por otro lado, los sistemas RoF cuando operan en la banda de ondas milimétricas, la CD describe un comportamiento cíclico (Fig. 3) resultando en pérdidas de potencia [19].

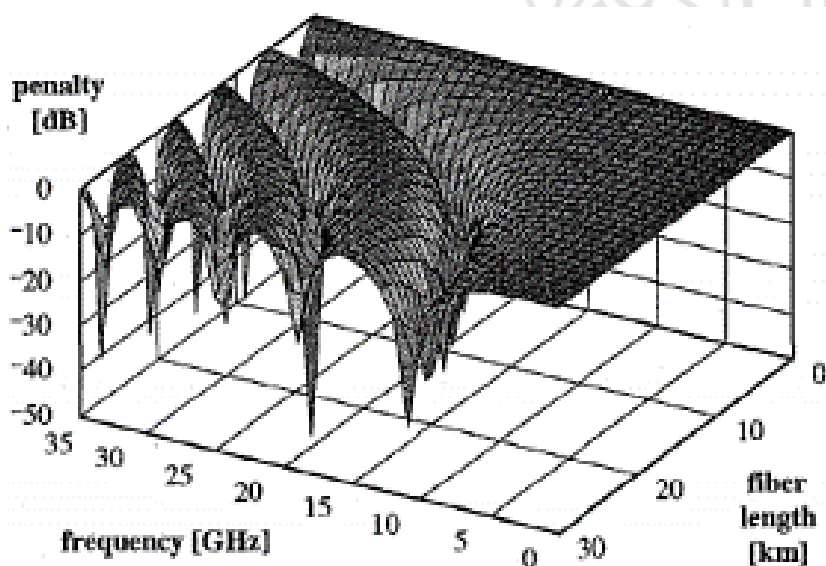


Fig. 3 Penalidad en potencia debido a la CD tomado de <http://bdigital.unal.edu.co/8959/1/jhonjamesgranadatorres.2012.pdf>

En los sistemas de RoF la modulación se presenta en dos etapas, una eléctrica y una óptica. En la primera, la señal eléctrica de RF es modulada en los formatos de

modulación convencional, es decir, en amplitud, frecuencia o fase. En la segunda, una vez la señal de RF ha sido modulada es entregada al láser donde este se encarga de la modulación en intensidad óptica, en un formato de encendido-apagado (On-Off), es común que en el receptor se hagan uso de fotodetectores para la conversión de la señal óptica a eléctrica antes de ser radiada (Fig. 4) [3].

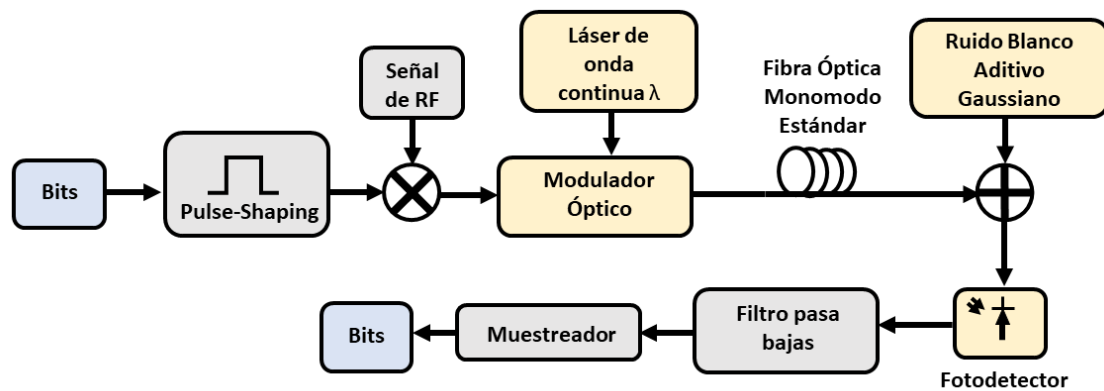


Fig. 4 Esquema de un sistema RoF

### 4.3 Radio Sobre Fibra Digitalizado

Los sistemas RoF digitalizados (DRoF) nacen para compensar las dispersiones, no linealidades y otros efectos que perjudican la calidad de la señal, existen configuraciones para satisfacer estas aberraciones. Sin embargo, estas configuraciones son complejas y costosas. Los sistemas DRoF pueden eliminar dichas dispersiones mediante la transmisión de bits digitales que representan la portadora de RF a través de la fibra óptica con una transmisión libre de errores hasta que la tasa de error de bit (BER) sea intolerable [20].

#### 4.3.1 Radio Definido por Software

Con el incremento de dispositivos que hacen uso del espectro de radio frecuencia y la inserción de más usuarios cada día en un espectro finito, la tecnología se ha elevado en un plano en el cual se requiere sea cada vez más eficiente, dicho crecimiento se espera siga continuando a un ritmo más elevado que las medidas de eficiencia espectral. Por otro lado, la asignación espectral es un proceso lento y costoso, por lo que cualquier tecnología que brinde una flexibilidad en este proceso es de gran valor. Una tecnología clave para solventar los problemas de eficiencia espectral es la Radio definido por Software (SDR), estas SDR permite que un dispositivo de propósito general pueda establecer un sistema de comunicación a través de un software que logra implementar la modulación, codificación y protocolos específicos de un sistema de comunicación inalámbrica convencional [21].

### 4.3.1.1 Universal Software Radio Peripheral

El Universal Software Radio Peripheral (USRP) es un periférico que está diseñado para la implementación de sistemas SDR. Las USRP están compuestas por una tarjeta madre (motherboard) y otras tarjetas denominadas tarjetas hijas (daughter board), puede transmitir frecuencias hasta varios GHz. La USRP de la marca National Instruments modelo 2901 (Fig. 5) funciona como la sección de banda base digital y de frecuencia intermedia en un sistema de radiocomunicaciones [22].



Fig. 5 USRP modelo 2901 tomado de <https://www.ni.com/es-co/support/model.usrp-2901.html>

La descripción de los conectores del panel frontal se detalla en la tabla 1

Conector		Descripción
RF 0	TX1 RX1	Terminal de entrada y salida de la señal de RF. TX1 RX1 usa un conector SMA con una impedancia de 50 Ω.
	RX2	Terminal de entrada para la señal de RF. RX2 usa un conector SMA con una impedancia de 50 Ω.
RF 1	RX2	Terminal de entrada para la señal de RF. RX2 usa un conector SMA con una impedancia de 50 Ω.
	TX1 RX1	Terminal de entrada y salida de la señal de RF. TX1 RX1 usa un conector SMA con una impedancia de 50 Ω.

Tabla 1 descripción de los conectores

Este modelo de USRP describe mediante un código de colores el funcionamiento para la transmisión y recepción de los datos como se describe en la tabla 2

LED		Descripción	Color	Indicación
RF 0	TX1 RX1	Indica el estado de transmisión del dispositivo	Apagado	El dispositivo no está activo.
			Verde	El dispositivo está recibiendo datos.
			Rojo	El dispositivo está transmitiendo datos.
			Naranja	El dispositivo está transmitiendo y recibiendo datos.
	RX2	Indica el estado de recepción del dispositivo	Apagado	El dispositivo no está activo.
			Verde	El dispositivo está recibiendo datos.
RF 1	RX2	Indica el estado de recepción del dispositivo	Apagado	El dispositivo no está activo.
			Verde	El dispositivo está recibiendo datos.
		Indica el estado de transmisión del dispositivo	Apagado	El dispositivo no está activo.
			Verde	El dispositivo está recibiendo datos.
	TX1 RX1	Indica el estado de transmisión del dispositivo	Rojo	El dispositivo está transmitiendo datos.
			Naranja	El dispositivo está transmitiendo y recibiendo datos.

Tabla 2 Descripción de los leds

#### 4.4 Modulación Digital

Una característica fundamental para las comunicaciones en la actualidad es la modulación, ya que este proceso permite imprimir los datos que se transmitirán en una señal portadora. La mayoría de las transmisiones son realizadas de manera digital y dado que el espectro disponible es limitado, los esquemas de modulación toman un papel fundamental, el principal objetivo de la modulación es poder comprimir la mayor cantidad de datos en la menor cantidad de espectro posible, esto es conocido como eficiencia espectral, es por ello que han surgido múltiples técnicas para lograr y mejorar la eficiencia espectral [23].

##### 4.4.1 Clasificación de las técnicas de modulación

La modulación es el proceso de variar algún parámetro de una forma de onda periódica para usar esa señal para transmitir un mensaje, normalmente se utiliza una forma de onda sinusoidal de alta frecuencia como señal portadora. Para este propósito, si la variación en el parámetro de la portadora es continua de acuerdo con la señal analógica de entrada, la técnica de modulación se denomina modulación analógica si la variación es discreta, entonces se denomina Técnica de Modulación Digital [24].

En la tabla 3 se describen algunos de los formatos de modulación analógica, así como también su contraparte en la modulación digital

Técnica de modulación	Tipo	Notación
Análoga	Modulación en Amplitud	A.M
	Modulación en Frecuencia	F.M
	Modulación en Fase	P.M
Digital	Modulación por Desplazamiento de Amplitud	A.S.K
	Modulación por Desplazamiento de Frecuencia	F.S.K
	Modulación por Desplazamiento en Fase	P.S.K

Tabla 3 Técnicas de modulación

#### 4.4.1.1 Modulación por Desplazamiento de Amplitud

Amplitude Shift Keying (ASK) es un tipo de modulación en el cual la información varía según los valores discretos de amplitud de la señal. La versión más simple de la modulación ASK es conocida como On-Off Keying (OOK) este tipo de modulación representa los datos digitales como la presencia o ausencia de una señal portadora (Fig. 6) [25].

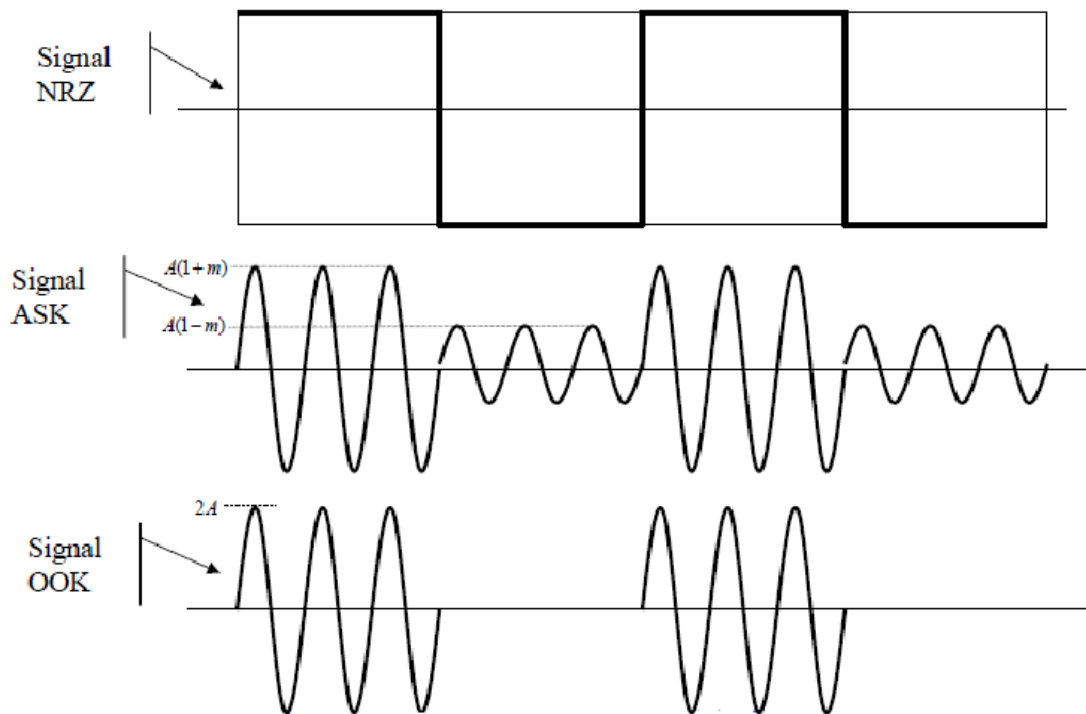


Fig. 6 Señales ASK y OOK tomado de [https://www.researchgate.net/publication/322917143\\_Advanced\\_Digital\\_communication-Simulation\\_using\\_Simulink](https://www.researchgate.net/publication/322917143_Advanced_Digital_communication-Simulation_using_Simulink)

#### 4.4.1.2 Modulación por Desplazamiento de Frecuencia

Frequency Shift Keying (FSK) es la técnica de modulación digital en la cual la frecuencia de la señal portadora varía de acuerdo a los cambios en la señal digital. La señal modulada presenta dos tipos de frecuencia, para los 1 binarios se representan con una de alta de frecuencia mientras que los 0 se representan con una de baja frecuencia (Fig. 7) [25].

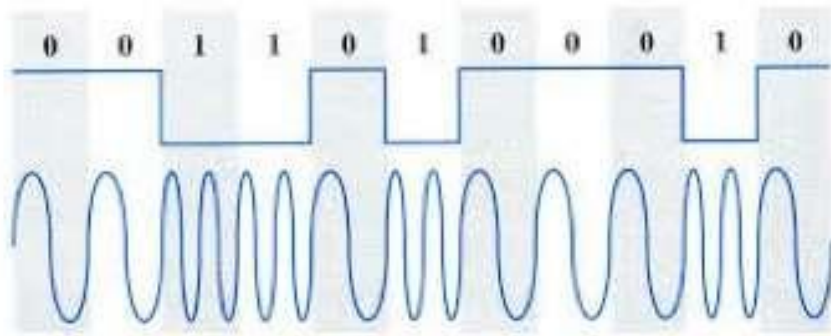


Fig. 7 Señal FSK tomado de <https://www.edn.com/fpga-based-fsk-psk-modulation/>

#### 4.4.1.3 Modulación por Desplazamiento de Fase

Phase Shift Keying (PSK) es una técnica de modulación angular en la cual se hace variar la fase de la señal portadora entre una determinada cantidad de valores discretos. El más sencillo de este tipo de modulación es BPSK (Binary Phase Shift Keying), en este esquema de modulación el desplazamiento se realiza entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  (Fig. 8) [25].

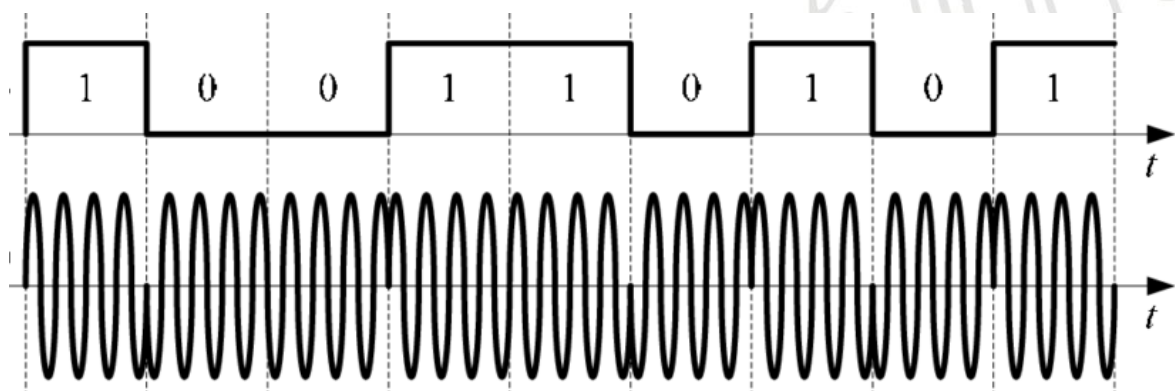


Fig. 8 Señal BPSK tomado de [https://www.researchgate.net/publication/221907745\\_Advanced\\_Modulation\\_Formats\\_and\\_Multiplexing\\_Techniques\\_for\\_Optical\\_Telecommunication\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/221907745_Advanced_Modulation_Formats_and_Multiplexing_Techniques_for_Optical_Telecommunication_Systems)



#### 4.4.1.4 Modulación de Amplitud en Cuadratura

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) es un formato de modulación en el cual combina tanto la modulación en amplitud como la modulación en fase, esto se consigue mediante la modulación de dos señales sinusoidales de la misma frecuencia desfasadas en  $90^\circ$ . El formato QAM representa los símbolos con una determinada cantidad de bits, dependiendo la cantidad de bits se podrán representar más símbolos en el esquema, se utiliza potencia de la base binaria para la cantidad de símbolos, es decir, con 2 bits se pueden representar 4 símbolos, si uso 4 bits se tendrán 16 símbolos y así sucesivamente; para observar la transición realizada entre los símbolos se utiliza el diagrama de constelación el cual permite mapear los símbolos en una cuadrícula del plano complejo (Fig. 9) [25].

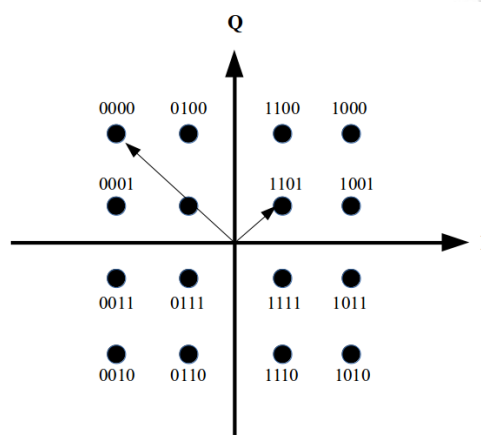


Fig. 9 Diagrama de constelación para el formato 16 QAM tomado de <https://blog.wirelessmoves.com/2016/10/an-introduction-qam-modulation-for-lte.html>

#### 4.5 Demodulación Basada en Machine Learning

El campo de estudio del Machine Learning trae consigo varias ventajas con las técnicas que implementa para predecir un resultado en función de los datos de entrada, de esta manera le permite realizar una clasificación adecuada de datos que han sido contaminados por ruido [26]. Se han llevado a cabo estudios en la aplicación de algoritmos de Machine Learning para la demodulación digital de señales en sistemas de comunicación óptica, esta se emplea con la finalidad de mitigar los efectos que aparecen en el canal que degradan la integridad de la señal, ya que es necesario determinar que símbolo es el que se recibe. Debido a los fenómenos que están presentes en el canal, los símbolos se dispersarán en el diagrama de constelación, dificultándole al receptor que símbolo fue el que llegó, es por ello que se requiere de umbrales adaptativos que permitan compensar estos efectos [27]. Entre los algoritmos que se han usado se encuentra aquellos basados en

redes neuronales [28], KNN [29] y k-means [6]. En los estudios realizados para sistemas RoF en la banda MMW se han llegado a obtener hasta 1.8 dB de ganancia usando un esquema de modulación multinivel para una distancia de hasta 15 km de fibra óptica [30].

#### 4.5.1 Máquinas de Soporte Vectorial

Las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) son una moderna y efectiva técnica de inteligencia artificial, que ha tenido un formidable desarrollo en los últimos años. Una SVM funciona como un clasificador de una sola clase para los distintos puntos de entrada, la descripción dada por los datos de los vectores de soporte es capaz de formar una frontera usando un hiperplano (Fig. 10), con el cual puede tomar una decisión alrededor del dominio de los datos de aprendizaje con muy poco o ningún conocimiento de los datos fuera de esta frontera [31].

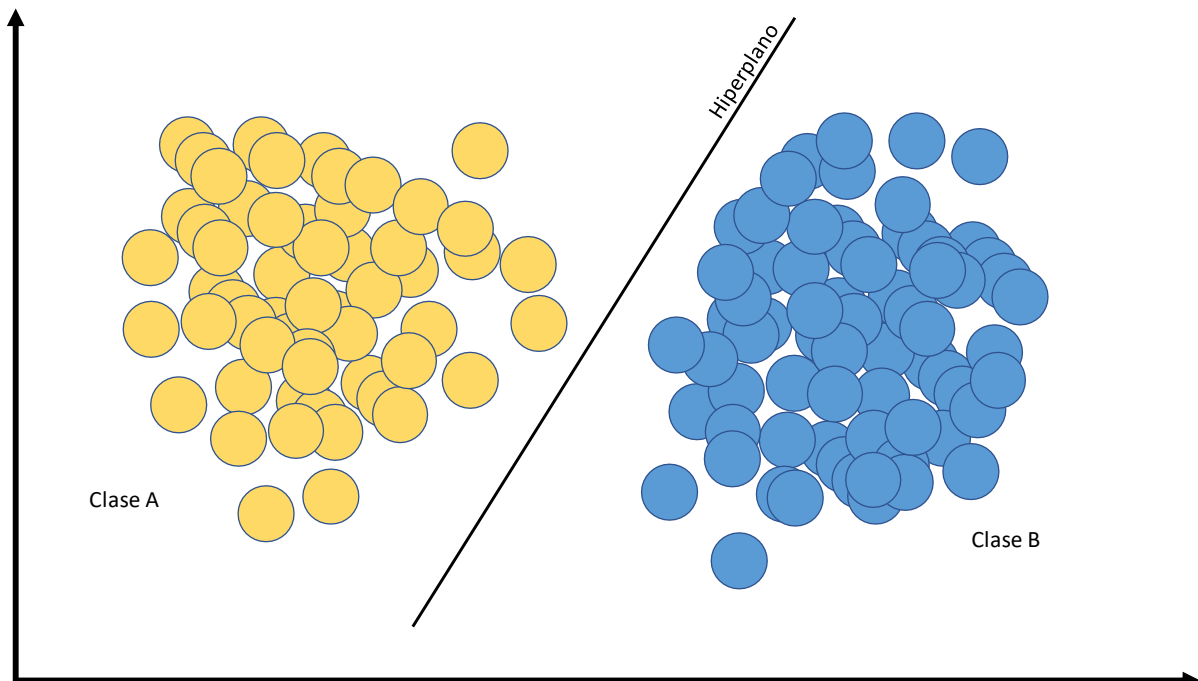


Fig. 10 Clasificación de Datos usando SVM

Los datos son mapeados por medio de funciones matemáticas conocidas como kernel el cual busca la máxima separación entre clases. Sin embargo, en ocasiones la naturaleza de los datos no permite que estos se puedan separar, para solucionar ese tipo de problemas, el kernel mueve los datos a un espacio dimensional mayor que el original (Fig. 11), buscando una separación lineal de los datos en este espacio mayor [32].

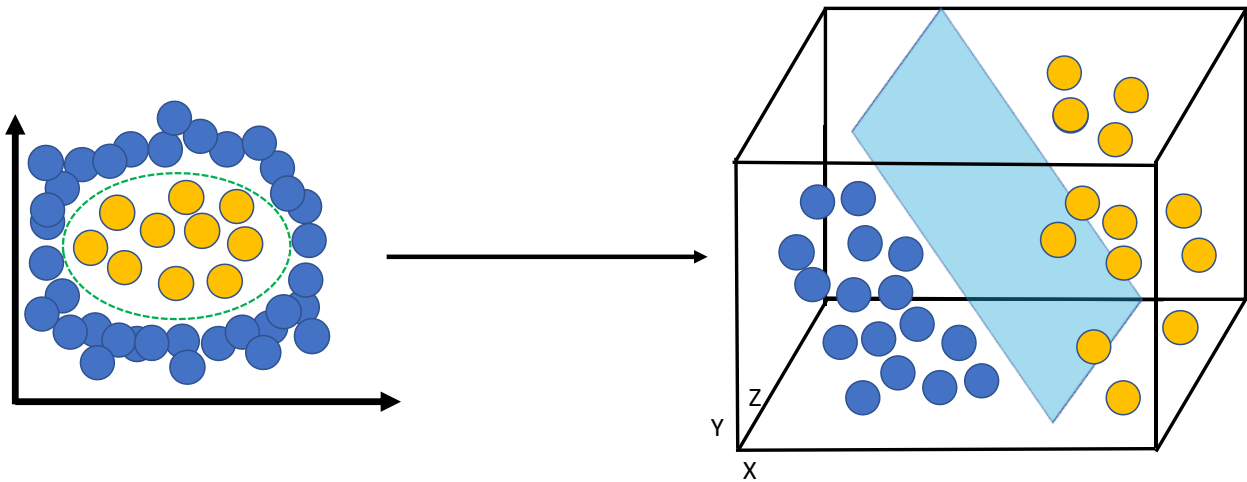


Fig. 11 Kernel de SVM

## 5 Metodología

### 5.1 Simulación en el Software VPI

La propuesta de este trabajo de grado se dividió en dos etapas, en la primera se diseñó un sistema RoF utilizando un software licenciado por la universidad, VPIphotonicsDesignSuite, este esquema (Fig. 12) simuló un sistema RoF en la banda MMW en las frecuencias 60, 75 y 82 GHz, para un formato de modulación 16QAM y 64QAM.

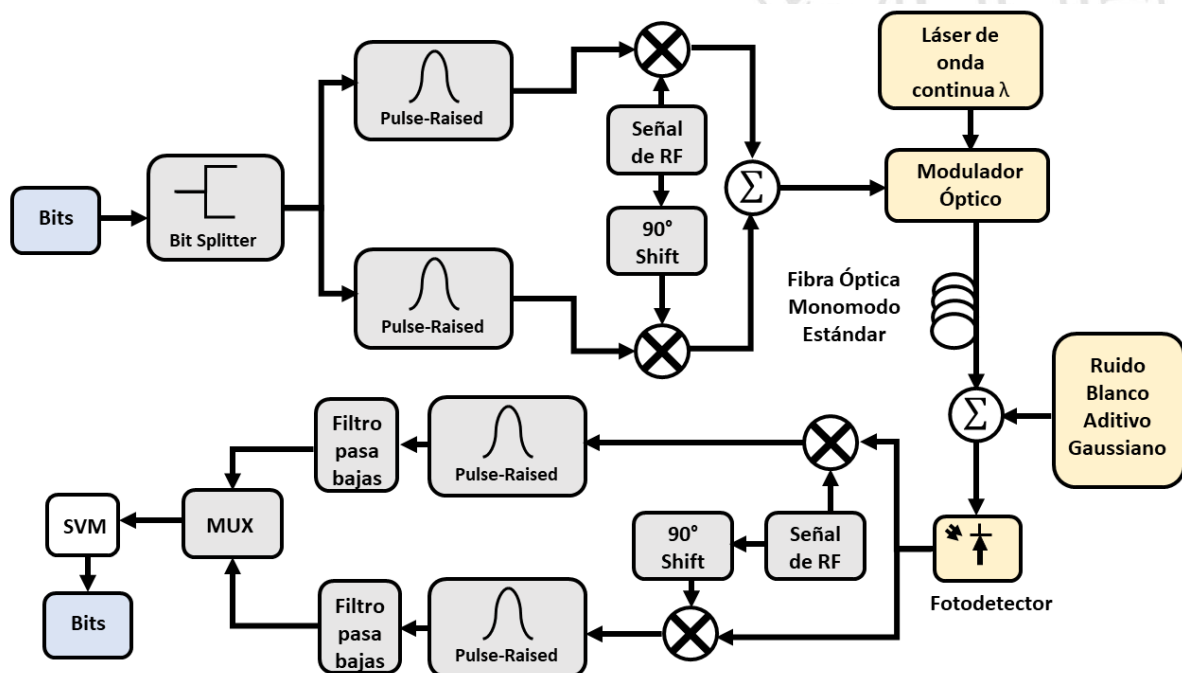


Fig. 12 Esquema m-QAM de un Sistema RoF

En este esquema se transmitieron una secuencia de 45 mil símbolos, diferente para cada formato. La secuencia bits se representaron mediante pulsos coseno alzado, buscando que el diseño planteado fuese más acorde a un ambiente de trabajo real, los pulsos se modularon en el formato m-QAM eléctrico convencional, seguidamente la señal eléctrica fue modulada en amplitud en la sección óptica, se utilizó un modulador Mach-Zehnder (MZM) de parámetros ideales, el MZM modula un láser de onda de continua centrado a 1550 nm, en el diseño del sistema RoF se hicieron variaciones tanto del ancho de haz del láser así como la tasa de transmisión a la que se enviaban los símbolos. Una vez la señal era modulada ópticamente, esta es transmitida por una fibra óptica monomodo estándar, con parámetros comerciales (Dispersión de 16 ps/nm-km y atenuación de 0.2 dB/km), se hicieron transmisiones hasta los 30 km, los cuales son distancias un poco mayores a los 20 km que es el estándar de las redes GPON.

Para la detección, la conversión del dominio óptico al eléctrico es realizado por un fotodetector PIN, seguidamente la señal en el dominio eléctrico se demoduló de la forma convencional para un formato de modulación m-QAM, así recuperando los símbolos que llegan al receptor. La métrica que se decidió para medir el desempeño del sistema es la tasa de error de bit (BER) por sus siglas en inglés, además se implementaron métodos de demodulación asimétrica utilizando ecualización Least Mean Square (LMS) y demodulación utilizando máquinas de soporte vectorial (SVM), un algoritmo de Machine Learning, esto con el fin de determinar cuánto mejora el desempeño del sistema en términos de la BER comparados con el método de demodulación tradicional sin ecualizar.

Para la aplicación de los algoritmos LMS y SVM en el proceso de la demodulación de la señal se llevó a cabo tomando un dataset de símbolos que fueron tomados del software VPI, dicho dataset está compuesto con las diferentes variaciones y combinaciones realizadas (Longitud de la fibra óptica, Ancho del Haz del Láser, Frecuencia de la portadora). Posteriormente el dataset se cargó al software Matlab, cada paquete del dataset tiene una cantidad 45 mil símbolos, en donde se entrenó con alrededor del 4.4% al 5%, siendo 2000 símbolos para el algoritmo LMS y con 2250 para el algoritmo SVM; para LMS se establecieron ciertos parámetros iniciales del ecualizador para su entrenamiento, si con dichos parámetros el filtro del ecualizador no alcanza una convergencia en los datos, actualizaría un vector de pesos para hacer un balance de los parámetros previamente establecidos para así alcanzar la convergencia. En el caso del algoritmo SVM la porción utilizada para el entrenamiento, obtienen una etiqueta (label) de esta forma el algoritmo establece una asociación con el símbolo y su label, a partir de allí empieza a realizar una predicción de los datos futuros mediante una clasificación binaria (es o no es), mientras los separa a través de unos hiperplanos para realizar una distinción de los símbolos (Fig. 13).

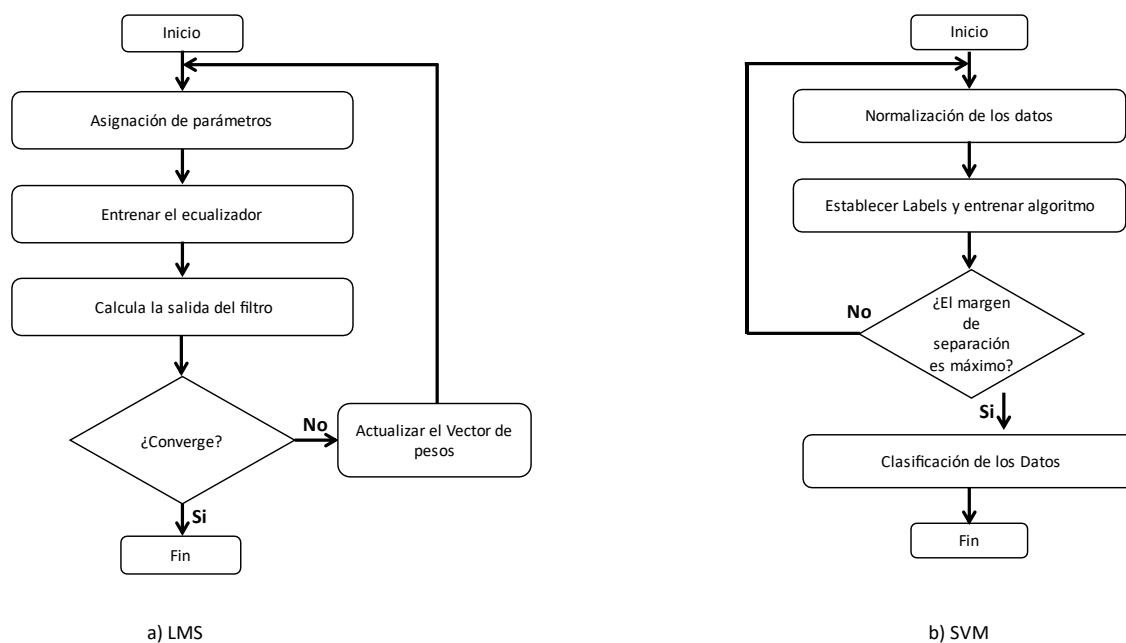


Fig. 13 Diagrama de flujo de los algoritmos

## 5.2 Desarrollo en GNU-Radio

La segunda etapa del trabajo grado se realizó en el software GNU Radio, el cual es un entorno de desarrollo libre y de código abierto, compuesto por archivos y aplicaciones agrupadas en librerías desarrollados en el lenguaje Python y C++. Puede ser usado junto con hardware de RF externo para crear radio definida por software y sin hardware es útil en entornos de simulación. Además, GNU es una herramienta que permite la investigación y desarrollo de sistemas de radio [33]. La aplicación GNU Radio funciona de manera similar a Simulink para la interconexión entre los bloques, también es posible crear bloques a partir de las librerías predeterminadas, esta aplicación está diseñada para correr en sistemas operativos Linux, aunque es posible su instalación en Windows y MAC.



Fig. 14 Logo de GNU Radio tomado de <https://www.gnuradio.org/>

En esta etapa se diseñó la etapa eléctrica de un sistema RoF utilizando un formato de modulación en fase QPSK (Fig. 15) y al igual que en la primera etapa de este trabajo, se recopiló un dataset para demodular utilizando los algoritmos LMS y SVM

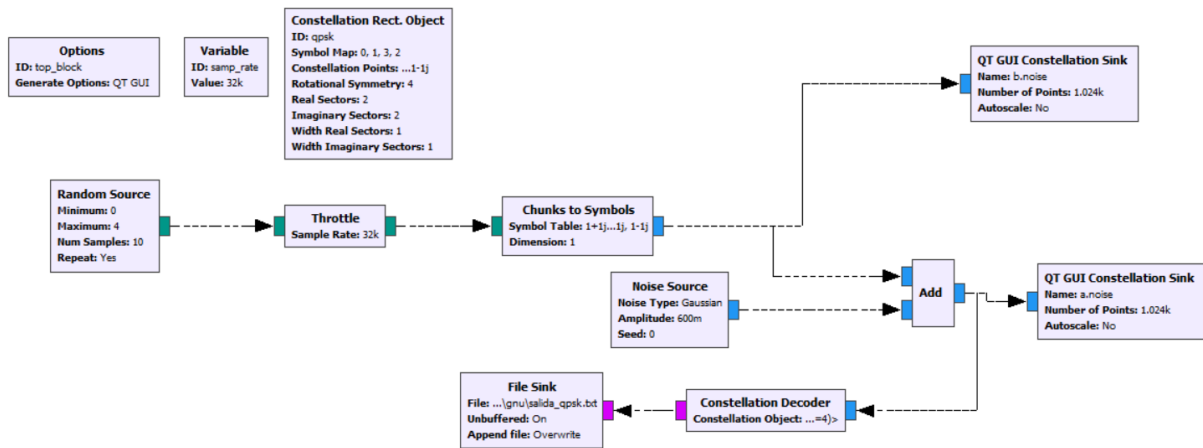


Fig. 15 Diagrama de bloques para una modulación QPSK en GNU Radio

En el esquema propuesto se utilizó el bloque *Constellation Rect. Object* el cual cuenta una gran flexibilidad para elegir el formato de modulación que se requiere y la forma como se desea mapear los símbolos en el diagrama de constelación. El formato de modulación empleado QPSK maneja 4 símbolos por lo que requiere de 2 bits para representar cada uno de ellos, utilizando el mismo bloque con el que se eligió el formato, se estableció una relación uno a uno para las coordenadas y el símbolo (Fig. 16)

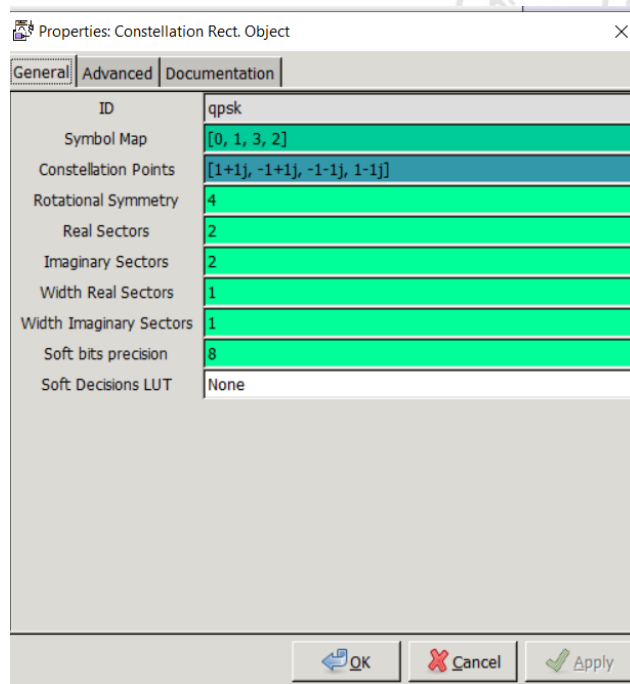


Fig. 16 Configuración del bloque Constellation Rect. Object

El Bloque *Throttle* se encarga de limitar la velocidad con la que se generan los símbolos de esta forma no habrá pérdida en las muestras. Para la modulación y demodulación de los símbolos se utilizaron los bloques *Chunks to Symbol* y *Constellation Decoder* respectivamente, el bloque *Chunks to Symbol* emplea una

tabla en la cual mapea las muestras que van llegando, el mapeo se establece usando como referencia la posición de los símbolos establecidas por el bloque *Constellation Rect. Object*.

Para simular uno de los efectos presentes en los sistemas de comunicación se usó el bloque *Noise Source* el cuál se encarga de agregar ruido del tipo Gaussiano, el parámetro que agrega la distorsión a los símbolos en este bloque es la Amplitud, de acuerdo a un valor realiza una desviación aleatoria de la parte real e imaginaria de la muestra; con el bloque *QT GUI Constellation Sink* se logra ver el diagrama de constelación de los símbolos que se transmiten y como se percibe visualmente cuando se le agrega ruido (Fig. 17)

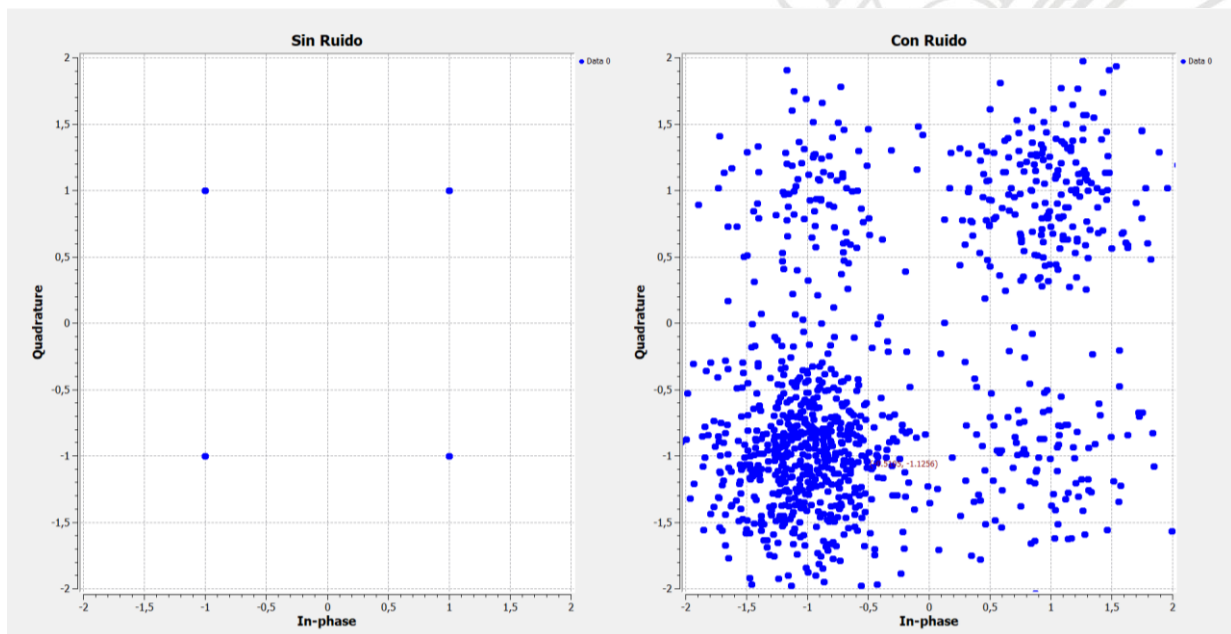


Fig. 17 Diagrama de constelación para un formato de modulación QPSK

## 6 Resultados y análisis

En la figura 18 se muestra un análisis geométrico entre los diferentes formatos de demodulación empleados. En la demodulación tradicional, es decir, sin ecualizar; se determina el símbolo recibido en el sistema, de acuerdo a la posición con la que este se haya en la cuadrícula, una de 4x4 para 16QAM y 8x8 para 64QAM figura 19. Sin embargo, la posición en la cual se ubica el símbolo no es un indicador para determinar que el símbolo se haya clasificado de la manera correcta, en los sistemas de comunicación la información viaja sobre un medio dispersivo, razón por el cual los símbolos que llegan no siempre están ubicados en el mismo lugar del que se transmiten y en presencia ruido (ruido gaussiano, ruido de fase, ruido térmico, etc.) el símbolo puede terminar en una región diferente del cual se transmite, es por ello que

al momento de la demodular este será clasificado de manera errónea como se logra ver en la secciones marcada en las figuras 18.a y 19.a.

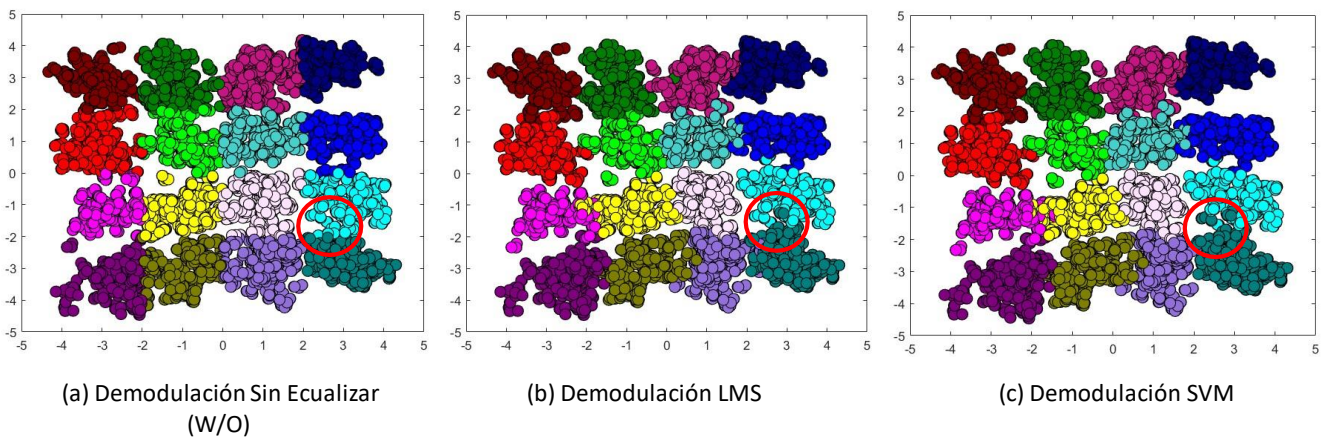


Fig. 18 Diagrama de constelación 16QAM para diferentes métodos de demodulación

Para solucionar este problema de clasificación errónea debido a la presencia de ruido, es necesario utilizar métodos de demodulación asimétrica, para ello se emplearon los métodos de demodulación utilizando ecualizador LMS (Fig. 18.b, Fig. 19.b) y demodulación con Machine Learning usando SVM (Fig. 18.c, Fig. 19.c), como se logra observar varios de los símbolos que fueron mal clasificados por la demodulación sin ecualizar, estos logran tener una clasificación adecuada, mejorando así el desempeño de la red en términos de la BER.

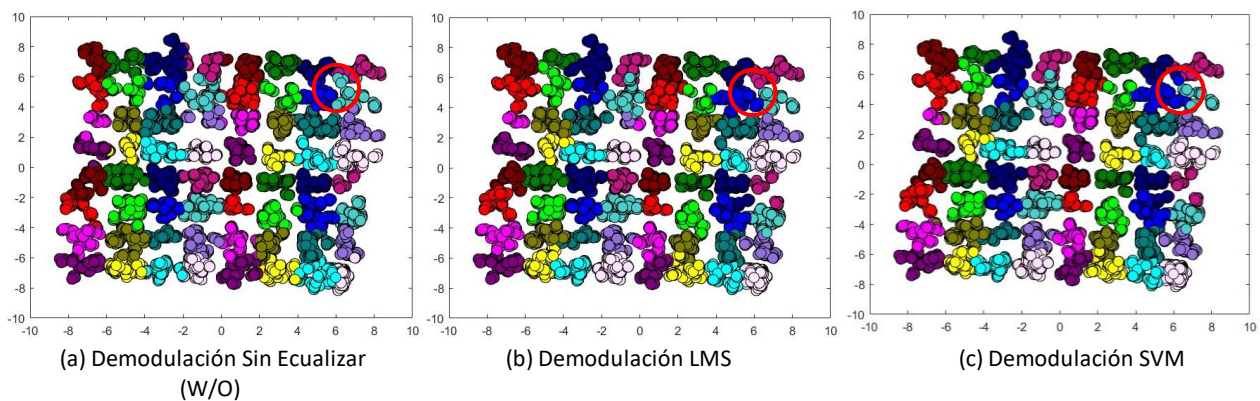


Fig. 19 Diagrama de constelación 64QAM para diferentes métodos de demodulación

En la figura 20 se muestra como varía la BER a medida que aumenta la longitud de la fibra óptica en un sistema RoF transmitiendo a una tasa de 1 Gbps y usando señales de RF de 60 GHz (Fig. 20.a, 20.d), 75 GHz (Fig. 20.b, 20.e), y 82 GHz (Fig. 0.c, 20.f) para un formato de modulación 16QAM. En la misma imagen se realiza una comparación



entre la demodulación sin ecualizar (W/O), y la realizada por demodulación implementando LMS y demodulación implementando el algoritmo SVM; también se presenta un símil en la transmisión realizada por un láser con un ancho de línea (LW) de 1KHz, el cual posee mejores características que un láser comercial buscando evitar el ruido de fase en la caracterización del sistema, por uno que posee un LW de 1MHz, mostrando así que para un láser comercial de mayor acceso se pueden obtener casi los mismos resultados empleando los métodos de demodulación asimétrica, LMS o SVM.

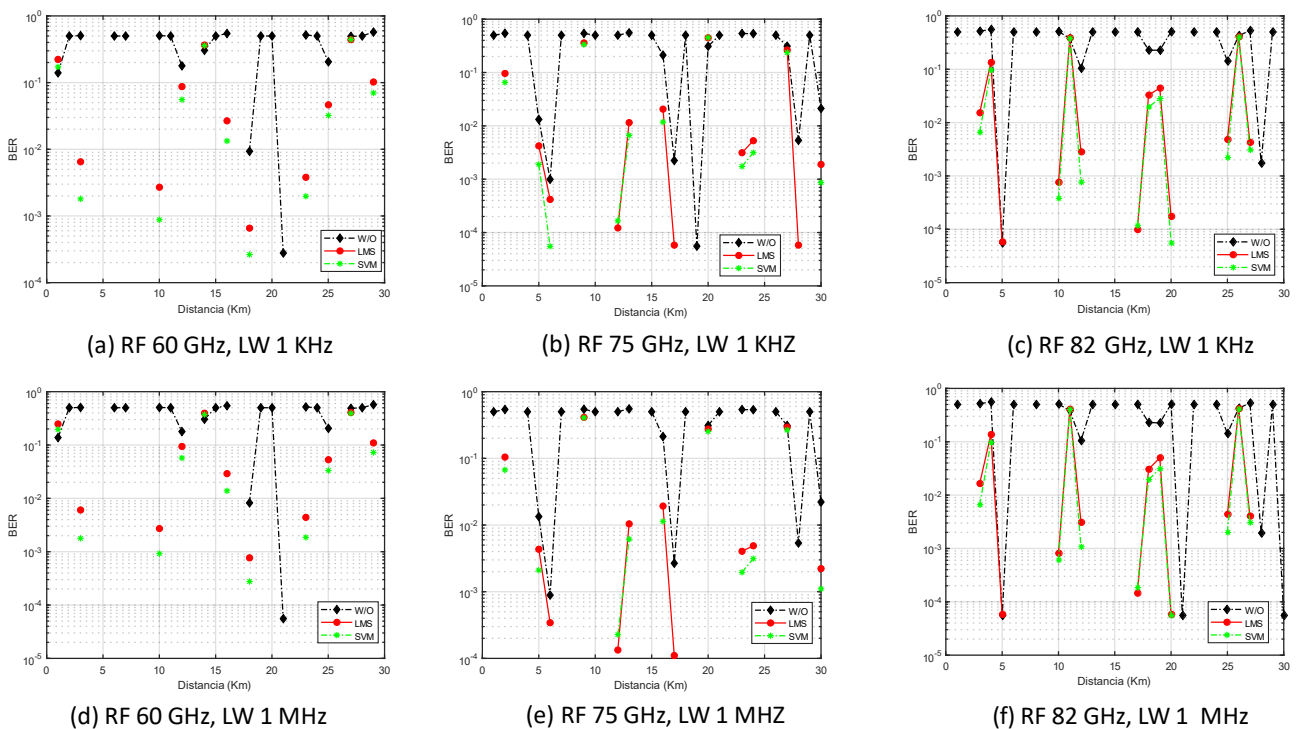


Fig. 20 BER vs Distancia para diferentes formatos de demodulación, sin ecualizar (W/O), con ecualizador (LMS), con Machine Learning (SVM) para 16QAM

En la figura 20.f se muestra que para una distancia de transmisión de 30 km usando una portadora de RF de 82 GHz, empleando la demodulación convencional se logra un BER de  $\sim 10^{-4}$ , pero usando tanto LMS o SVM se logra una transmisión libre de errores. También se puede observar que utilizando cualquiera de los dos algoritmos mejora el BER en todas las distancias, unas más que en otras, esto debido a la distorsión de los símbolos, ya que dependiendo de ello los algoritmos logran mitigar o corregir estas distorsiones. De forma similar se realizaron los mismos análisis para un formato 64QAM, la figura 21 muestra un patrón semejante al formato de 16QAM, ya que en ambos casos la demodulación empleando el algoritmo SVM presenta en general los mejores resultados en cuanto a BER se refiere si se comparan con la demodulación convencional. Sin embargo, para este último formato la demodulación con SVM es ligeramente peor comparado con la demodulación

empleando LMS, con un valor de  $3 \times 10^{-4}$  para SVM y  $2 \times 10^{-4}$  para LMS; también se logra observar que en el formato de 64QAM empleando cualquiera de los dos algoritmos se puede garantizar que la comunicación sea libre de errores a ciertas distancias independiente de la portadora de RF.

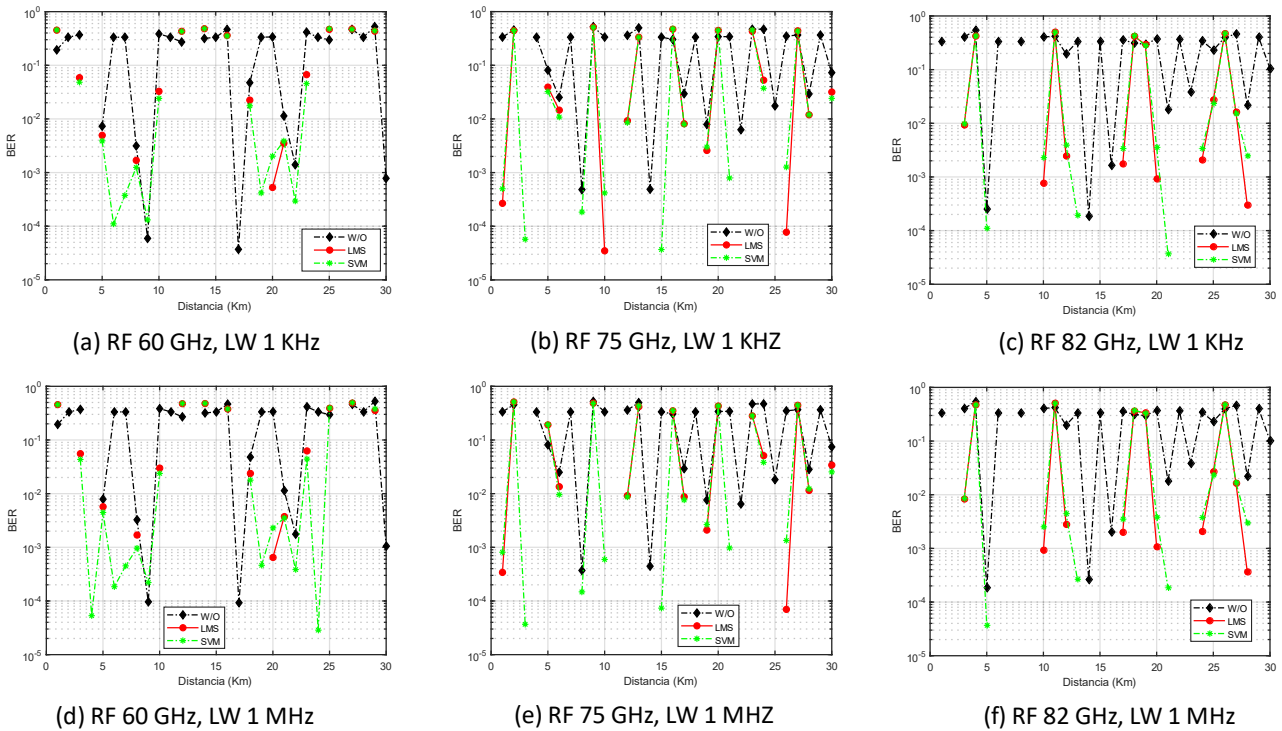


Fig. 21 BER vs Distancia para diferentes métodos de demodulación, sin ecualizar (W/O), con ecualizador (LMS), con Machine Learning (SVM) para 64QAM

Si bien es cierto que con un formato de 64QAM podemos transmitir más información hay que considerar que la señal se vuelve más susceptible a las distorsiones, es por ello que se recurren en estos casos a transmitir la señal con más potencia, lo cual no es muy factible cuando se transmite en un medio como la fibra óptica ya que podrían generarse fenómenos no lineales, para compensar esa necesidad es necesario recurrir a otros medios, en la tabla 4 se logra observar que para un LW de 1MHz a 30 km de distancia de transmisión, empleando 64QAM se puede transmitir información libre de errores si se usa el algoritmo LMS o SVM con una portadora de RF de 60 GHz o de 82 GHz.

Formato	16QAM/60GHz	16QAM/75GHz	16QAM/82GHz	64QAM/60GHz	64QAM/75GHz	64QAM/82GHz
Sin ecualizar	0	$2,216*10^{-2}$	$5,556*10^{-6}$	$1,052*10^{-3}$	$7,433*10^{-2}$	$1,011*10^{-1}$
LMS	0	$2,221*10^{-3}$	0	0	$3,412*10^{-2}$	0
SVM	0	$1,104*10^{-3}$	0	0	$2,535*10^{-2}$	0

Tabla 4 BER para diferentes formatos de modulación a 30 km de longitud con un LW 1 MHz

En el escenario de QPSK empleado en el software GNU Radio se aplicaron las mismas técnicas para la demodulación, mostrando una mejoría comparados con la demodulación convencional, así como se describe en la tabla 5. Igualmente, como sucedió en el esquema m-QAM de VPI los algoritmos LMS y SVM presentaron mejores resultados que la demodulación convencional en cuanto a la BER.

	400m	500m	600m	700m	800m
Sin ecualizar	2,347e-4	2,187e-3	9,024e-3	2,149e-2	3,875e-2
LMS	2,4883e-4	1,573e-3	7,953e-3	1,99e-2	3,188e-2
SVM	2,3963e-4	1,6215e-3	7,776e-3	1,94e-2	2,34e-2

Tabla 5 BER para los diferentes métodos de demodulación en QPSK

Cabe resaltar que, aunque los algoritmos presentaron mejoras, estas no son tan significativas si se comparadas con el escenario m-QAM, esto se debe a que el formato de modulación QPSK empleado para el escenario de GNU Radio es más tolerante al ruido por lo que si el símbolo se ubica en el cuadrante que le corresponde su posición será irrelevante, por lo tanto, las correcciones que pueden ofrecer estos algoritmos para mejorar su desempeño no son muy notables. Por otro lado, la capacidad del sistema para transmitir información al tiempo se ve limitada, ya que solo es posible tener 4 símbolos para este formato.

El ruido que está presente en este sistema está dado por el parámetro amplitud del bloque *NoiseSource*, dicho valor no tiene relación con las unidades típicas del ruido, es decir mW o dBm, simplemente es un valor numérico mayor a 0, es por ello que para

verificar cuanto se distorsionaron los símbolos, tomando como referencia 1 mW como potencia en la transmisión, se realizó el cálculo de la tasa de error de modulación (MER) (Fig. 22).

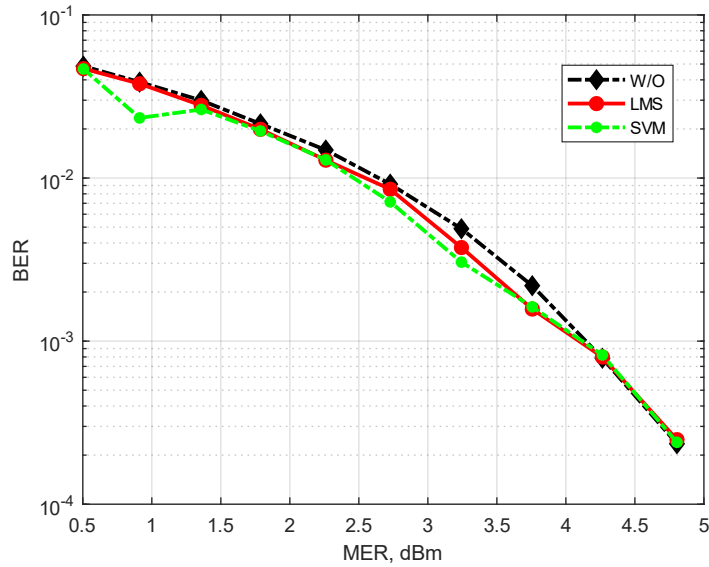


Fig. 22 MER vs BER para QPSK en GNU Radio

En la figura 22 se muestra que la razón de la relación señal/ruido en el esquema de GNU Radio es muy pequeño, dado que las medidas del MER son relativamente bajas indican que el nivel de potencia del ruido es casi idéntico al nivel potencia de la señal.

## 7 Conclusiones

Las técnicas de demodulación propuestas en el escenario m-QAM del esquema VPI empleando los algoritmos LMS y SVM presentan siempre una mejoría comparado con la demodulación convencional sin importar la frecuencia de la portadora utilizada ni el ancho del haz del láser, en el caso de 16QAM se lograron reducciones en el BER de hasta 2 órdenes de magnitud. Por otro lado, el formato m-QAM trabajando en la banda MMW se puede tener una transmisión libre de errores para una distancia de 30 km utilizando una portadora en 60 GHz o en 82 GHz y si se requiere transmitir más información al tiempo a la misma distancia es necesario el formato 64QAM; sin embargo, requiere emplear los algoritmos LMS o SVM para garantizar una transmisión libre de errores. Los resultados muestran que utilizando los algoritmos para demodular en un láser con un ancho línea más grande, presentan resultados muy similares a uno cuyo ancho de línea es muy pequeño, lo cual indica que se pueden tener muy buenos resultados utilizando equipos más accesibles. Dada la peculiar característica cíclica en pérdidas de potencia por la CD en la banda MMW, es necesario realizar análisis para determinar que frecuencia es más factible si se desea transmitir información a altas tasas. Para el escenario en GNU Radio con el formato de modulación QPSK, aunque si hubo mejoras en cuanto a la BER no fueron tan grandes como las empleadas en el escenario m-QAM esto debido a la libertad del formato para aceptar errores. Para un trabajo futuro se tendrá como objetivo aplicar un formato de modulación m-aria en el software GNU Radio para la transmisión y recepción usando las tarjetas USRP. Una de las limitaciones que se podrían presentar con SDR funcionando en conjunto con RoF es la tasa de transmisión, dado que la frecuencia con la que pueden operar las antenas del SDR es hasta un máximo de 6 GHz. Sin embargo, dicha integración entre SDR y RoF puede ser muy útil para explotar la mayoría de los servicios comerciales que se encuentran disponibles en las cuales el SDR puede operar correctamente.

## 8 Referencias Bibliográficas

- [1] Cisco, V. N. I. (2018). Cisco visual networking index: Forecast and trends, 2017–2022. *White Paper*, 1, 1.
- [2] N. Kathpal and A. K. Garg, "Analysis of radio over fiber system for mitigating four-wave mixing effect," *Digital Communications and Networks*, 2019.
- [3] Granada Torres, J. J., Imbett, S., Milena, C., Varón Durán, G. M., & Guerrero González, N. (2011). Toward Next Generation Broadband Radio-over-Fiber Systems: Technological Challenges in the Millimeters-Wave Band. *Ingeniería y Desarrollo*, 29(2), 242-265.
- [4] S. Chaudhary, D. Thakur, and A. Sharma, "10 gbps-60 ghz rof transmission system for 5 g applications," *Journal of Optical Communications*, 2017.
- [5] Torres, J. J. G., Durán, G. M. V., & González, N. G. (2012, May). Chromatic dispersion effects in a radio over fiber system with PSK modulation and coherent detection. In *2012 IEEE Colombian Communications Conference (COLCOM)* (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Gonzalez, N. G., Zibar, D., Yu, X., & Monroy, I. T. (2010, March). Optical phase-modulated radio-over-fiber links with k-means algorithm for digital demodulation of 8PSK subcarrier multiplexed signals. In *Optical Fiber Communication Conference* (p. OML3). Optical Society of America.
- [7] Chamorro, L., & Pietrosemoli, E. (2008). *Redes inalámbricas para el desarrollo en América Latina y el Caribe*
- [8] Sánchez, A. (2015). *La Radio Definida por Software: Diseño de un receptor de banda aeronáutica VHF*.
- [9] Rico-Martínez, M., Vasquez, C. C. C., Rodríguez, S. I., Duran, G. M. V., & Monroy, I. T. (2018, October). Comparison of performance between OFDM and GFDM in a 3.5 GHz band 5G hybrid Fiber-Wireless link using SDR. In *2018 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)* (pp. 1-4). IEEE.
- [10] Rico-Martínez, M., Morales, A., Mehmeri, V., Puerta, R., Varón, M., & Monroy, I. T. (2017). Procedure to measure real time latency using software defined radio in a W-band fiber-wireless link. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(12), 3147-3151.
- [11] Ordóñez, J. L. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Manual formativo de ACTA*, (62), 17-31.
- [12] Muñoz, E. C., Blanco, H. J. E., & Calderón, J. A. F. (2015). Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia. *Tecnura*, 19(45), 159-173.

- [13] González, R. A. (2018). Diseño y Simulación de Arreglos de Antena en la Frecuencia de 72 GHz (Banda-E) para empleo en Redes Móviles 5G Javier E. Arévalo P. *DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA*, 255.
- [14] Leyva Bravo, J., & Beltrán Casanova, D. (2016). La comunicación inalámbrica a través de la banda de los 60GHZ. *Revista Universidad y Sociedad [seriada en línea]*, 8 (2). pp. 89-96.
- [15] Patiño Carrillo, A. Diseño de un sistema de radio sobre fibra óptica para ondas milimétricas en redes móviles 5G.
- [16] Hernández, G. E. C., & Alfaro, G. P. S. (2006). Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica. *Umbral Científico*, (9), 76-84.
- [17] Mitchell, J. E. (2009, September). Radio over fiber networks: Advances and challenges. In 2009 35th European Conference on Optical Communication (pp. 1-4). IEEE.
- [18] Revelo, G. D. V., Arroyave, J. R. O., Vallejo, D. P. T., & Gómez, N. G. (2013). Descripción y análisis de desempeño de sistemas de radio sobre fibra con enlaces de 900mhz con modulaciones en fase y en cuadratura. *Revista Politécnica*, 9(16), 51-62.
- [19] J. J. Granada Torres, A. M. Cárdenas Soto, and N. Guerrero González, "A novel dispersion monitoring technique in w-band radio-over-fiber signals using clustering on asynchronous histograms," 2014.
- [20] Li, W., Chen, A., Li, T., Penty, R. V., White, I. H., & Wang, X. (2020). Novel Digital Radio Over Fiber (DRoF) System With Data Compression for Neutral-Host Fronthaul Applications. *IEEE Access*, 8, 40680-40691.
- [21] Ettus, M., & Braun, M. (2015). The universal software radio peripheral (usrp) family of low-cost sdrs. *Opportunistic spectrum sharing and white space access: The practical reality*, 3-23.
- [22] Arevalo, N. E. Transmisión y recepción de imagen con modulación QPSK usando radio definido por software.
- [23] Frenzel, L. (2012). Understanding modern digital modulation techniques. *Electron. Des. Technol. Commun.*
- [24] Sharma, D. K., Mishra, A., & Saxena, R. (2010). Analog & Digital Modulation Techniques: An Overview. *International Journal of Computing Science and Communication Technologies*, 3(1), 2007.

- [25] Sklar, B. (2001). *Digital communications: fundamentals and applications*.
- [26] Thrane, J., Wass, J., Piels, M., Diniz, J. C., Jones, R., & Zibar, D. (2016). Machine learning techniques for optical performance monitoring from directly detected PDM-QAM signals. *Journal of Lightwave Technology*, 35(4), 868-875.
- [27] López, J. D. D. S., Hipólito, J. I. N., Briseño, M. V., & Velázquez, V. R. Umbral adaptivo para sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas por medio de algoritmos de agrupamiento. *Avances en Tecnologías de Información*, 117.
- [28] Amini, M., & Balarastaghi, E. (2011). Universal neural network demodulator for software defined radio. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 1(3), 305
- [29] Huang, Y., Chen, Y., & Yu, J. (2017, November). Nonlinearity Mitigation of RoF Signal Using Machine Learning Based Classifier. In *2017 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)* (pp. 1-3). IEEE
- [30] Cui, Y., Zhang, M., Wang, D., Liu, S., Li, Z., & Chang, G. K. (2017). Bit-based support vector machine nonlinear detector for millimeter-wave radio-over-fiber mobile fronthaul systems. *Optics express*, 25(21), 26186-26197.
- [31] BETANCOURT, G. (2005). LAS MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL (SVMs). *Scientia Et Technica*, 1(27).
- [32] RESENDIZ, J. A. Las Máquinas de Soporte Vectorial para identificación en Línea. Maestría, Control Automático. Instituto Politecnico Nacional, 2006.
- [33] The GNU Radio Foundation. GNU Foundation. 2017. url: <https://gnuradio.org/about/> (visitado 13-01-2021)