



*"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"*

# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

---

**DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA  
Ingeniería en Tecnología Electrónica**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA  
MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN DIGITAL  
ASK: ASPECTO ÓPTICO CONTRA EL  
ELÉCTRICO**

TESIS QUE PRESENTA:

**MIGUEL ANTONIO ROMERO RAMIREZ**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA**

DIRECTOR DE TESIS

**DR. ALEJANDRO GARCÍA JUÁREZ**



Hermosillo, Sonora

Marzo 2016

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme fuerzas y salud a lo largo de mi carrera, por acompañarme en todo momento y por permitirme realizar este trabajo de tesis. Sin ti nada sería posible, gracias por la ayuda que me brindas para seguir adelante.

A mis padres, por su apoyo a lo largo de mi carrera, por sus consejos que me han ayudado a salir adelante y por los valores que me han inculcado a lo largo de mi vida.

Agradezco a mi hermana Ibis y a Mario, por su compañía y por brindarme apoyo en todo momento.

Al Dr. Alejandro García Juárez, por la oportunidad que me ofreció de desarrollar este trabajo de tesis bajo su dirección, por su tiempo dedicado a brindarme apoyo en el desarrollo de este trabajo y por la motivación brindada para seguir estudiando.

A la Universidad de Sonora, por la oportunidad que me dio de realizar mis estudios, los cuales realicé con dedicación y esfuerzo, y por el apoyo económico mediante beca para desarrollar este trabajo.

## DEDICATORIA

*A Dios, por su amor y protección brindada y por la oportunidad que me dio de culminar mis estudios de licenciatura. Eres mi principal motivación en la vida, gracias por las fuerzas que me das para seguir adelante.*

*A mis padres, Juan Antonio y Esthela, por su abundante apoyo y compañía siempre.*

# INDICE

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>2</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>3</b>
<b>Introducción, hipótesis, objetivos y metodología .....</b>	<b>7</b>
1.1 Introducción general.....	7
El proceso de evolución de los sistemas de comunicaciones está resumido en la Figura 1.1, donde se muestra el incremento de la capacidad de los sistemas de comunicación en los últimos 170 años. La capacidad está definida en bits transmitidos por segundo (bits/s) y kilómetros (Km) [1]. .....	7
1.2 Hipótesis .....	8
1.3 Objetivos .....	9
1.3.1 Objetivo general.....	9
1.3.2 Objetivos específicos .....	9
1.4 Metodología .....	9
Referencias.....	10
<b>Fundamentos de las técnicas de modulación digital ASK, FSK y PSK .....</b>	<b>11</b>
2.1 Sistema de comunicaciones electrónicas .....	11
2.2 Sistema de modulación digital de amplitud.....	12
2.2.1 Transmisor (Modulador) ASK (OOK).....	13
2.2.2 Receptor (Demodulador) ASK (OOK) .....	15
2.3 Sistema de modulación por desplazamiento de frecuencia .....	18
2.4 Sistema de modulación por desplazamiento de fase.....	19
Referencias.....	20
<b>Dispositivos de radiofrecuencia, opto-electrónicos y equipo de medición .....</b>	<b>21</b>
3.1 Dispositivos de radiofrecuencia .....	21
3.1.1 Oscilador controlado por voltaje.....	21
3.1.2 Generador de señal .....	23

3.1.3 Mezclador de frecuencia .....	25
3.1.4 Filtro pasa-bajas y pasa-banda .....	28
3.1.5 Amplificador de potencia .....	32
3.1.6 Fuente de voltaje .....	33
3.1.7 Divisor de potencia de RF .....	35
3.2 Dispositivos opto-electrónicos .....	35
3.2.1 Láser DFB.....	35
3.2.2 Aislador de fibra óptica.....	36
3.2.3 Control de polarización .....	37
3.2.4 Modulador electro-óptico.....	38
3.2.5 Foto-detector .....	39
3.2.6 Conectores de fibra óptica .....	39
3.3 Equipo de medición .....	40
3.3.1 Osciloscopio de alta velocidad .....	40
3.3.2 Analizador de espectros eléctricos.....	41
3.3.3 Analizador de espectros ópticos .....	42
Referencias.....	43
<b>Modulación de intensidad electroóptica y detección coherente.....</b>	<b>45</b>
4.1 Modulación directa y externa.....	45
4.2 Modulador electro-óptico .....	47
4.3 Modulador de intensidad Mach-Zehnder .....	48
4.4 Funcionamiento del modulador de intensidad tipo Mach-Zehnder .....	49
4.5 Detección coherente .....	51
Referencias.....	53
<b>Resultados del trabajo experimental.....</b>	<b>54</b>
5.1 Estudio espectral de la modulación ASK .....	54
5.2 Modulación y demodulación digital ASK usando un esquema eléctrico.....	57
5.2.1 Sistema de modulación digital ASK.....	57
5.2.2 Simulación del sistema de modulación digital ASK utilizando MATLAB .....	60
5.2.3 Estudio en el dominio del tiempo y la frecuencia de las pruebas obtenidas experimentalmente de la modulación digital ASK .....	66
5.2.4 Sistema de demodulación digital ASK.....	79

5.2.5 Estudio en el dominio del tiempo y la frecuencia de las pruebas obtenidas experimentalmente de la demodulación digital ASK .....	80
5.2.6 Estudio de los diagramas de ojo .....	85
5.3 Modulación y demodulación digital ASK usando un esquema óptico.....	91
5.3.1 Sistema de demodulación digital ASK.....	92
5.3.2 Estudio en el dominio del tiempo y la frecuencia de las pruebas obtenidas experimentalmente de la demodulación digital ASK .....	93
5.3.3 Estudio de los diagramas de ojo .....	100
5.4 Análisis comparativo de los dos esquemas de modulación y demodulación digital ASK.....	106
Referencias.....	108
<b>Comentarios, conclusión y trabajos a futuro .....</b>	<b>109</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>111</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>114</b>

# Introducción, hipótesis, objetivos y metodología

## 1.1 Introducción general

El proceso de evolución de los sistemas de comunicaciones está resumido en la Figura 1.1, donde se muestra el incremento de la capacidad de los sistemas de comunicación en los últimos 170 años. La capacidad está definida en bits transmitidos por segundo (bits/s) y kilómetros (Km) [1].

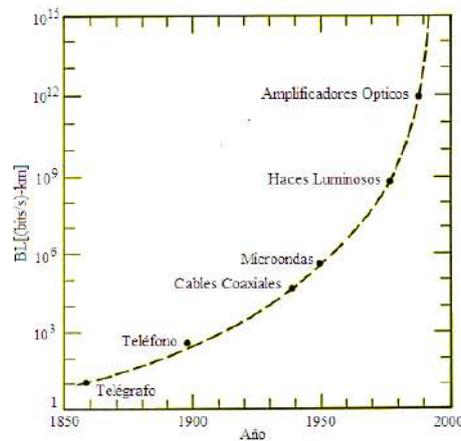


Figura 1.1.- Evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación.

En la actualidad existe una creciente demanda de servicio de calidad para los usuarios de telefonía, internet y televisión de paga. Los sistemas eléctricos que actualmente brindan este tipo de servicio se encuentran limitados tanto en ancho de banda como en capacidad de transmitir información a altas velocidades. Una óptima solución frente a este problema es implementar sistemas ópticos que brinden un servicio más eficiente. Los sistemas ópticos se componen de un transmisor, un medio de transmisión, en este caso la fibra óptica, y un receptor.

Hoy en día, por diversas razones y ventajas técnicas, el medio de transmisión de mayor uso es la fibra óptica. Este medio ofrece un mayor ancho de banda que el cobre, que va más allá de los 10Gbps, lo cual significa mayor densidad de información; como la información se transporta en luz, la atenuación de la señal se reduce permitiendo mayor velocidad y alcance; el envío de información es más seguro porque la luz no produce campos electromagnéticos, eliminando la posibilidad de intervención ajena; es un medio extremadamente seguro para la transmisión de datos por su inmunidad a las condiciones ambientales y electromagnéticas; la fibra óptica es mucho más ligera que el cobre, lo que facilita su manejo y ocupa menos volumen, además su similitud con el cable facilita la migración de cobre a fibra, ya que se puede

utilizar la infraestructura existente. Estas ventajas, sumado a su creciente utilización ha reducido su costos haciéndola más competitiva que el cobre [2].

Con el presente trabajo se busca demostrar las ventajas de transmitir información por fibra óptica en lugar de cable coaxial utilizando la técnica ASK (Amplitude Shift Keyed), que consiste en la modulación en forma digital de una señal seno de una frecuencia de 2.4GHz, la cual es transmitida a través de dos esquemas experimentales, uno eléctrico y uno electroóptico, para obtener características comparativas sobre atenuación, velocidad de transmisión, relación señal a ruido (SNR) de ambos medios.

El esquema eléctrico se realiza empleando componentes de radiofrecuencia y cables eléctricos, mientras que el esquema electroóptico se realiza utilizando componentes de radiofrecuencia, cables eléctricos, componentes ópticos y fibra óptica, debido a que se utilizan componentes eléctricos y ópticos, se le puede llamar sistema híbrido de transmisión de datos digitales. La frecuencia elegida de la señal portadora de información es 2.4GHz, esta banda de frecuencia pertenece a la banda UHF (Ultra High Frequency), en español, frecuencia ultra alta.

## **1.2 Hipótesis**

Transmitir información digital mediante un esquema de modulación y demodulación digital ASK, se puede realizar utilizando fibra óptica ó cable coaxial como medio de transmisión. Estos medios de transmisión presentan ventajas y desventajas dependiendo de las necesidades del sistema de comunicación. Utilizando fibra óptica se espera una menor atenuación de potencia en la señal de información digital para un enlace de comunicación de larga distancia que utilizando cable coaxial. Con el esquema de modulación y demodulación digital ASK se hace la suposición de que con la fibra óptica se tiene una mayor tasa de velocidad de transmisión en lugar de cable coaxial, esto debido a las características que presenta la fibra óptica de tener capacidad de transmisión arriba de 10GHz, y el cable coaxial soporta alrededor de 1GHz. Para afirmar estas suposiciones, se encontrarán resultados mediante el esquema de modulación y demodulación digital ASK, utilizando la fibra óptica y el cable coaxial como medio de transmisión.

## **1.3 Objetivos**

Se presenta el objetivo general, y los objetivos específicos a cumplir en el desarrollo de esta tesis.

### **1.3.1 Objetivo general**

Estudiar en forma experimental la transmisión y distribución de señales de microondas en un esquema de modulación/demodulación digital totalmente eléctrico y de modulación/demodulación electroóptica.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Generar señales de modulación digital ASK con portadoras de información en la banda de las microondas y con diferentes señales de información digital.
2. Transmitir información digital en la banda de 2.4GHz mediante un esquema de comunicaciones de radiofrecuencia y de fibra óptica.
3. Estudiar la calidad de la señal digital recuperada mediante el diagrama de ojo.
4. Analizar y comparar el sistema eléctrico y el sistema electroóptico.

## **1.4 Metodología**

Básicamente, el esquema a estudiar es el mostrado en la Figura 1.2, que consta de un sistema de transmisión de señales digitales. El medio de transmisión es el que se cambiará, para el sistema eléctrico se usará cable eléctrico y para el sistema óptico se usará fibra óptica.

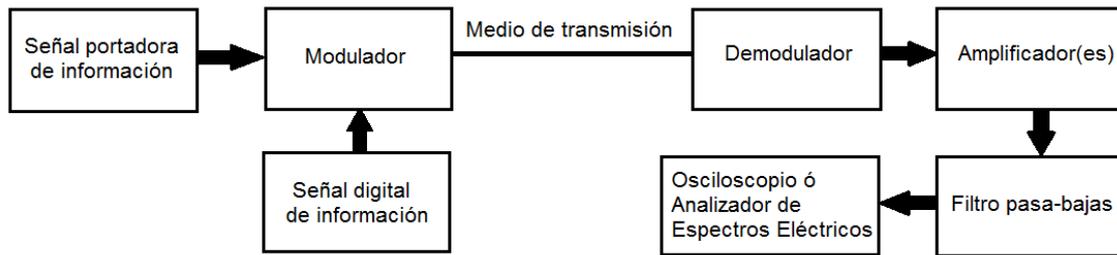


Figura 1.2.- Sistema de transmisión de señales digitales.

## Referencias

[1] Alejandro García Juárez, *Análisis comparativo entre las características de los diferentes sistemas de comunicaciones ópticas*, Departamento de investigación en física, Universidad de Sonora.

[2] Damico, M. (2015). 8 advantages of choosing fiber over copper cable. Black box technology blog. Disponible en: <http://blog.blackbox.com/technology/2015/04/8-advantages-to-choosing-fiber-over-copper-cable/>.

# Fundamentos de las técnicas de modulación digital ASK, FSK y PSK

## 2.1 Sistema de comunicaciones electrónicas

Los sistemas de comunicaciones electrónicas permiten la transmisión, recepción y procesamiento de información usando circuitos electrónicos. Se define a la información como el conocimiento o las señales inteligentes comunicados o recibidos. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de bloques simplificado de un sistema de comunicaciones electrónicas, el cual está conformado por tres secciones principales: una fuente, un destino y un medio de transmisión.

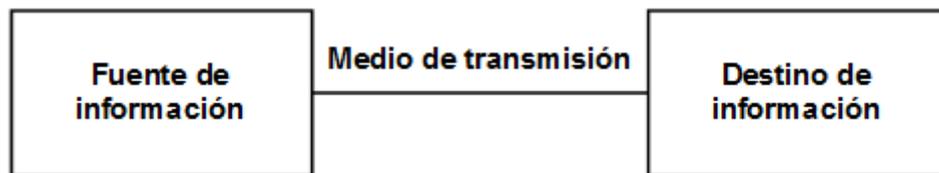


Figura 2.1.- Diagrama de bloques simplificado de un sistema de comunicaciones electrónicas.

La información se propaga a través de un sistema de comunicaciones en forma de símbolos que pueden ser analógicos, como la voz humana, la información de las imágenes de video, o la música; o bien pueden ser digitales, como los números codificados en sistema binario, los códigos alfanuméricos, los símbolos gráficos, los códigos de operación de microprocesadores o la información de base de datos.

Frecuentemente, la información de la fuente no es adecuada para transmitirse en su forma original y se debe convertir a una forma más adecuada antes de transmitirla.

Si se está trabajando con un sistema digital, la información analógica se debe convertir en digital antes de ser transmitida, y en el caso de trabajar con sistemas analógicos, la información digital se debe convertir en analógica antes de ser transmitida.

Los sistemas de comunicaciones analógicos actualmente están siendo sustituidos por sistemas digitales que tiene notables ventajas como mayor facilidad de procesamiento, mayor facilidad de multiplexado y son tolerantes al ruido [1].

Los sistemas digitales de comunicaciones son aquellos en donde se usa una señal portadora de información, generalmente una onda seno de alta frecuencia, y una señal moduladora digital de frecuencia menor que la señal portadora de información.

Los sistemas digitales de transmisión requieren una instalación física entre el transmisor y el receptor, como un par de hilos metálicos, un cable coaxial o un cable de fibra óptica [1].

## 2.2 Sistema de modulación digital de amplitud

La técnica de modulación digital más sencilla es la modulación digital de amplitud, que no es más que modulación de amplitud con portadora completa y doble banda lateral. La ecuación que describe la modulación digital de amplitud mediante una señal binaria es:

$$V_{am}(t) = [1 + V_m(t)] \left[ \left( \frac{A}{2} \right) (\cos(w_c t)) \right] \quad (2.1)$$

En la que  $V_{am}(t)$  es el voltaje de la onda de amplitud modulada,  $\frac{A}{2}$  es la amplitud de la portadora no modulada (volts),  $V_m(t)$  es señal binaria moduladora (volts) y  $w_c$  es la frecuencia de la portadora en radianes por segundo.

En la ecuación (2.1) la señal moduladora  $[V_m(t)]$  es una forma de onda binaria normalizada, en la que  $+1V = 1$  lógico, y  $-1V = 0$  lógico.

Para una entrada de 1 lógico,  $V_m(t) = +1$  y la ecuación (2.1) se reduce a:

$$V_{am}(t) = [1 + 1] \left[ \left( \frac{A}{2} \right) (\cos(w_c t)) \right] = A(\cos(w_c t)) \quad (2.2)$$

Y para una entrada de 0 lógico,  $V_m(t) = -1$  y la ecuación (2.1) se reduce a:

$$V_{am}(t) = [1 - 1] \left[ \left( \frac{A}{2} \right) (\cos(w_c t)) \right] = 0 \quad (2.3)$$

Así, para 100% de modulación,  $V_{am}(t)$  es  $A(\cos(w_c t))$  ó 0. Por consiguiente la portadora está “encendida” o está “apagada”, y es la causa de que la modulación digital de amplitud se le suele llamar “manipulación encendido-apagado”, o “todo o nada” (OOK de on-off keying) o “modulación por corrimiento de amplitud” (ASK amplitud shift key) [2].

La Figura 2.2 muestra las formas de onda de la señal portadora, la señal moduladora y la señal modulada para ASK.

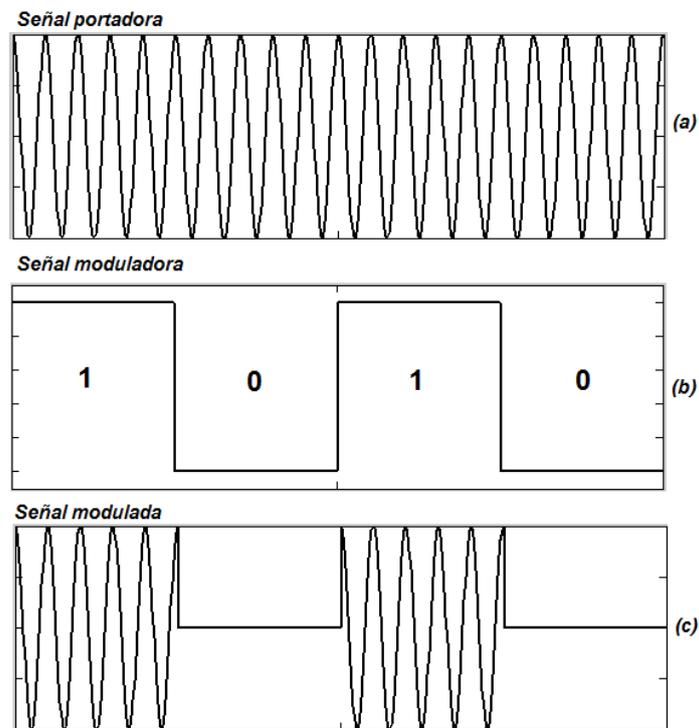


Figura 2.2.- Modulación digital de amplitud: (a) señal portadora, (b) señal moduladora, (c) señal modulada.

### 2.2.1 Transmisor (Modulador) ASK (OOK)

Se explicará en que consiste un transmisor de modulación ASK. El transmisor ASK consiste básicamente de cuatro subsistemas.

1. Filtro de pre modulación
2. Modulador
3. Amplificador lineal de potencia
4. Filtro de salida

En la Figura 2.3 se muestra el esquema de un transmisor ASK.

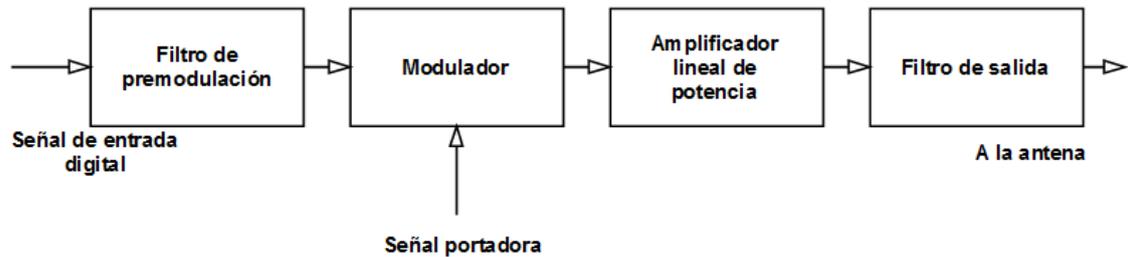


Figura 2.3.- Esquema de bloques del transmisor de ASK.

Analicemos el transmisor, bloque por bloque.

- a) El filtro de pre modulación se usa como conformador de los pulsos aplicados al modulador, éste se elegirá dependiendo de los requisitos de la señal de salida y en el caso más sencillo de ASK, éste filtro no se usa [3].
- b) Existe un gran número de moduladores ASK, uno de estos posibles moduladores se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4.- Modulador ASK.

Un modulador balanceado es similar a un multiplicador analógico. En él, la señal analógica de salida es el producto de las dos señales de entrada. Como se puede observar, a la salida del modulador aparece el producto de la señal digital  $f(t)$  y la señal portadora  $\cos w_c t$ , que corresponde con la señal modulada ASK de la Figura 2.2 [4].

El modulador convierte la secuencia digital en una señal de RF cuya amplitud depende de dicha secuencia.

Como se observa en la Figura 2.4, es un simple conmutador de señal de RF comandado por la señal digital. Este tipo de modulador, en el caso más general, deberá ser lineal, para poder preservar la forma de onda de los pulsos.

- c) En modulaciones ASK se usan exclusivamente amplificadores lineales de potencia, ya que es una modulación de AM. Estos amplificadores operan en

clase A y por lo tanto desperdician mucha potencia. La potencia de salida se debe cuidar mucho, ya que no debe dejarse que el amplificador se salga de su zona lineal.

- d) El filtro de RF se encarga de eliminar los posibles armónicos que se hayan generado en el proceso, o que el propio oscilador de RF pueda tener, de ésta forma se preserva el espectro de posible ruido que puedan interferir en otros servicios [5].

### 2.2.2 Receptor (Demodulador) ASK (OOK)

Una forma de onda OOK se puede demodular en forma coherente o no coherente con poca diferencia en funcionamiento.

Puesto que la modulación ASK no es más que un caso particular de la modulación AM, los demoduladores de AM son también válidos para la detección de señales ASK.

De esta manera, van a existir esencialmente dos métodos comunes de demodulación: **detección síncrona** y **detección de envolvente**.

#### 2.2.2.1 Demodulación detección síncrona

Consiste en multiplicar analógicamente la señal ASK que llega al demodulador, por la señal portadora que se genera localmente en el receptor. A continuación, la señal multiplicada resultante se hace pasar por un filtro pasa bajas con frecuencia de corte menor que  $2w_c$ , como se muestra en la Figura 2.5.

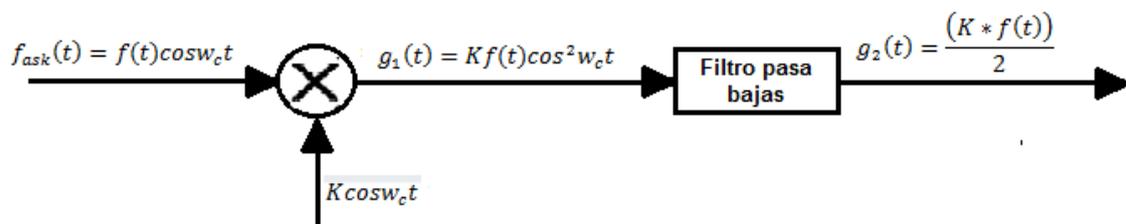


Figura 2.5.- Demodulador ASK detección síncrona.

La validez de éste método se puede demostrar

$$g_1(t) = Kf(t)\cos^2 w_c t = Kf(t) * \frac{1+\cos 2w_c t}{2} \quad (2.4)$$

$$= \frac{Kf(t)}{2} + \frac{Kf(t)\cos 2w_c t}{2}$$



*Desaparece en el filtrado*

Entonces

$$g_2(t) = \frac{Kf(t)}{2} \quad (2.5)$$

Colocando a la salida del filtro un adaptador de niveles, o simplemente haciendo  $K = 2$ , recuperamos  $f(t)$ .

La detección síncrona parece ser un método sencillo, pero por el contrario presenta una serie de inconvenientes. En el desarrollo expuesto anteriormente, se ha supuesto que la portadora local del receptor ( $\cos w_c t$ ) está exactamente a la misma frecuencia que el término  $\cos w_c t$  de la señal modulada ASK, y que además se encuentra sincronizada en fase con ella. Si la señal seno generada localmente fuera de frecuencia  $\cos(w_c + \Delta w)t$ , obtendríamos:

$$g_1(t) = Kf(t)\cos w_c t * \cos(w_c + \Delta w) t \quad (2.6)$$

$$= \frac{Kf(t)}{2} [\cos(2w_c + \Delta w) t + \cos \Delta w t]$$

Entonces la salida del filtro pasa bajas sería:

$$g_2(t) = \frac{Kf(t)}{2} \cos \Delta w t \quad (2.7)$$

Si  $\Delta w$  estuviera en la banda de paso del filtro.

Por consiguiente, esta señal filtrada no corresponde con la deseada. Una solución para evitar este tipo de problemas, consistiría en transmitir la señal portadora junto con la señal modulada (ASK), y recuperarla posteriormente en el receptor. Esta portadora puede ser transmitida de dos formas diferentes:

1. Enviada simplemente junto con la señal  $f_{ask}(t)$  como se puede observar en la Figura 2.6 (a), donde la nueva señal transmitida es  $f_T(t) = \cos w_c t + f_{ask}(t)$ .

Para recuperar la señal portadora sería necesario hacer un filtrado paso banda muy estrecho, que dejaría pasar solamente a la portadora, aspecto tecnológico bastante difícil de conseguir.

- Mandarla desplazada en frecuencia respecto a la señal modulada como se observa en la Figura 2.6 (b). De esta manera la recuperación de filtrado paso de banda es mucho más sencillo y ocasiona menos problemas. Por el contrario presenta el inconveniente de que, al estar desplazada la señal portadora en el espectro de frecuencia, ocupa un mayor ancho de banda.

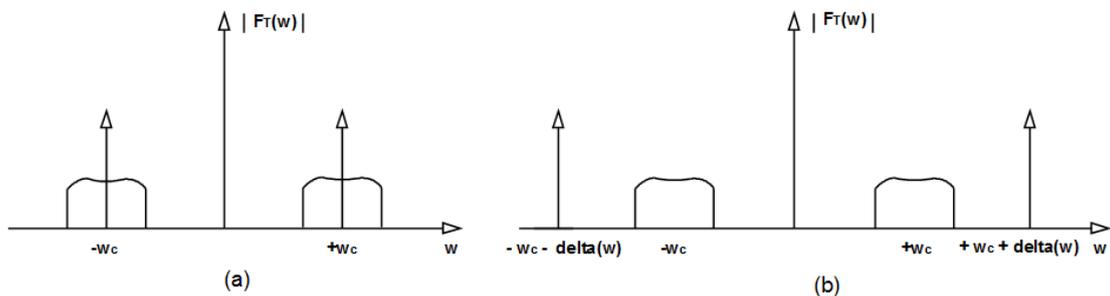


Figura 2.6.- Posibles formas de transmitir la señal portadora junto con una señal modulada.

### 2.2.2.2 Demodulación detección de envolvente

Con este otro método de demodulación, se evitan los problemas de frecuencia y de fase que aparecen en la detección síncrona. En este caso, la señal  $f_{ask}(t)$  de alta frecuencia que llega al receptor, se hace pasar a través de un dispositivo no lineal (diodo) y de un filtro pasa-bajas como se muestra en la Figura 2.7.

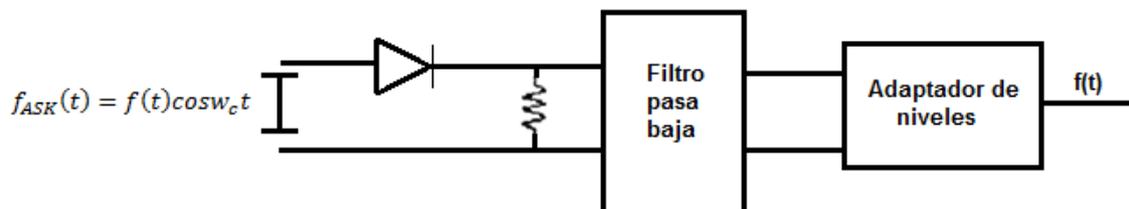


Figura 2.7.- Demodulación ASK detección de envolvente.

En el detector de envolvente, el diodo rechaza la parte negativa de la señal ASK, y el filtro paso de bajas no puede seguir las variaciones rápidas de la señal, por lo que solamente se queda con la envolvente de la señal que dejó pasar el diodo. El

adaptador de niveles aparece para corregir la diferencia de escala a la salida del demodulador.

Conviene señalar que la detección de envolvente de las señales ASK es algo inferior en calidad comparada con la detección síncrona. Por el contrario tiene la ventaja de ser más barata [6].

### 2.3 Sistema de modulación por desplazamiento de frecuencia

**Frequency Shift Keying (FSK)** o también llamada **Binary Frequency Shift Keying**, es otra técnica de modulación digital en la que la información, como su propio nombre indica, se encuentra modulada en frecuencia. FSK es simplemente un caso particular de modulación FM.

Para conseguir una modulación FSK se debe usar una señal digital binaria de información  $f(t)$  con niveles de tensión de 0 a 1 volt (para simplificar) y anchura de bit  $T_b$ . A diferencia de la modulación ASK, se usan dos señales portadoras de alta frecuencia, ambas de amplitud  $A$  volts pero con frecuencias diferentes  $A\cos\omega_1 t$  y  $A\cos\omega_0 t$ .

De esta manera, la función de la señal FSK va a ser:

$$f_{fsk}(t) = \begin{cases} A\cos\omega_1 t & \text{Si } f(t) = 1V. (1 \text{ lógico}) \\ A\cos\omega_0 t & \text{Si } f(t) = 0V. (0 \text{ lógico}) \end{cases} \quad (2.8)$$

La Figura 2.8 muestra la señal binaria de información y la señal modulada FSK.

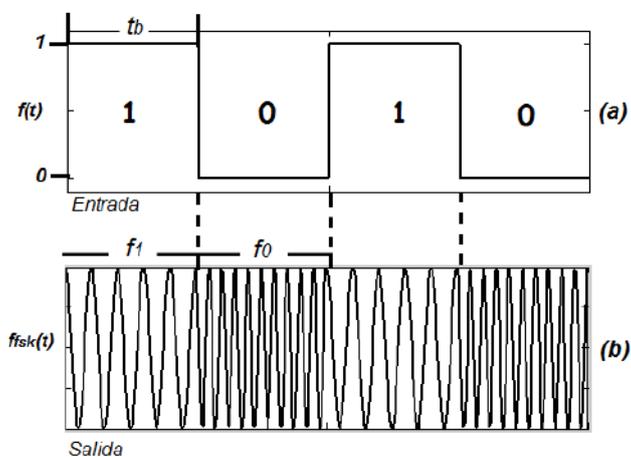


Figura 2.8.- Formas de onda de entrada y salida binaria FSK.

Conviene decir que  $f_1$  y  $f_0$  (las frecuencias de las señales portadoras), no tienen por qué estar sincronizadas en fase, es decir, que no sean múltiplos de una misma frecuencia base. Si esto ocurriera, la señal modulada FSK tendría una forma de onda no continua, que ocasionaría que aparecieran marcadas discontinuidades de fase en la señal analógica de salida FSK, haciendo que el demodulador tuviera problemas en el seguimiento de la frecuencia de la señal transmitida, y por consiguiente se podría producir un error en la recepción.

Para evitar que se produjera un error, es necesario que  $f_1$  y  $f_0$  estén sincronizadas en fase. Esta sincronización se consigue haciendo que ambas sean múltiplos de una frecuencia base  $f_{BASE} = \frac{1}{T}$  ( $f_1 = m * f_{BASE}$ ;  $f_0 = n * f_{BASE}$ ) donde  $m$  y  $n$  son números enteros. Así pues, la forma de onda de esta nueva señal modulada FSK no presenta discontinuidades de fase (cada transición ocurre en el cruce de 0V). Este tipo de modulación FSK recibe el nombre de **Minimum Shift Keying** (MSK), y presenta un mejor comportamiento que la FSK convencional frente a posibles errores en los bits.

La única desventaja de MSK frente a FSK es que requiere circuitos de sincronización y por consiguiente el costo de su implementación se incrementa [7].

## 2.4 Sistema de modulación por desplazamiento de fase

**Phase Shift Keying** (PSK) o también llamada **Binary Phase Shift Keying** (BPSK), es una técnica de modulación digital en la que la información se va a modular en fase, es decir, dependiendo de los valores de la entrada digital, la señal analógica modulada va a tener una u otra fase de salida.

Consideraremos una señal binaria que contiene la información a transmitir, con unos niveles de tensión de  $\pm 1V$  (para simplificar), y de anchura de bit  $T_b$  como se muestra en la Figura 2.9 (a). También consideramos una señal portadora de alta frecuencia  $\cos w_c t$ . La función de la señal modulada PSK la definimos como:

$$f_{PSK}(t) = f(t)\cos w_c t = \begin{cases} +\cos w_c t & \text{Si } f(t) = +1V \text{ (1 lógico)} \\ -\cos w_c t & \text{Si } f(t) = -1V \text{ (0 lógico)} \end{cases} \quad (2.9)$$

Tal como se muestra en la Figura 2.9 (b).

El modulador trabaja de la siguiente forma:

Cuando la entrada corresponde con un 0 lógico, la fase absoluta de la señal PSK es  $180^\circ$ . Si la entrada es un 1 lógico entonces la fase de salida va a ser  $0^\circ$  [8].

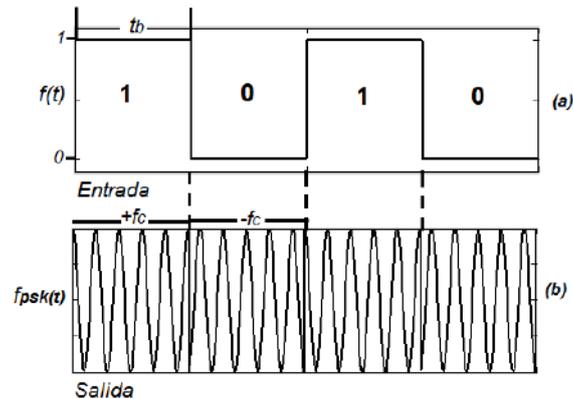


Figura 2.9.- Señales de la modulación PSK: (a) Señal binaria de información; (b) Señal modulada PSK.

## Referencias

- [1] Waye Tomasi, 2003, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, Naucalpan de Juárez, Edo. De México, Pearson Educación de México, S.A de C.V, pp. 467-468.
- [2] Waye Tomasi, 2003, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, Naucalpan de Juárez, Edo. De México, Pearson Educación de México, S.A de C.V, pp. 470-471.
- [3] Manuel Sierra Pérez, 1994, *Electrónica de comunicaciones*, pp. 299-300.
- [4]<http://personal.us.es/jluque/Libros%20y%20apuntes/1995%20Modulacion%20digital.pdf>, pp. 8.
- [5] Manuel Sierra Pérez, 1994, *Electrónica de comunicaciones*, pp. 300.
- [6]<http://personal.us.es/jluque/Libros%20y%20apuntes/1995%20Modulacion%20digital.pdf>, pp. 9-12.
- [7]<http://personal.us.es/jluque/Libros%20y%20apuntes/1995%20Modulacion%20digital.pdf>, pp. 17-19.
- [8]<http://personal.us.es/jluque/Libros%20y%20apuntes/1995%20Modulacion%20digital.pdf>, pp. 30-31.

# Dispositivos de radiofrecuencia, opto-electrónicos y equipo de medición

## 3.1 Dispositivos de radiofrecuencia

Se presentan los dispositivos de radiofrecuencia utilizados en el esquema de modulación/demodulación digital ASK eléctrico, los cuales son: oscilador controlado por voltaje, generador de señal, mezclador de frecuencia, filtro pasa-bajas y pasa-banda, amplificador de potencia de RF, fuente de voltaje, divisor de potencia de RF. El generador de señal, la fuente de voltaje, y el amplificador de potencia de RF también se utilizan en el esquema óptico.

### 3.1.1 Oscilador controlado por voltaje

Un oscilador controlado por voltaje (OCV), es un oscilador con una frecuencia estable de oscilación, que depende de un voltaje de polarización externo. La salida de un OCV es una frecuencia, y su entrada es una señal de polarización o de control, que puede ser un voltaje de corriente directa CD o de corriente alterna (CA). Cuando se aplica un voltaje de CD o de CA de variación lenta a la entrada del OCV, la frecuencia de salida cambia, o se desvía, en forma proporcional.

La Figura 3.1 muestra una curva de transferencia (frecuencia de salida en función de las características del voltaje de polarización en la entrada) de un OCV característico. La frecuencia de salida ( $f_0$ ) con voltaje de polarización de 0V en la entrada es la frecuencia natural del OCV,  $f_n$ , que está determinada por una red externa RC, y el cambio en la frecuencia de salida causado por un cambio de voltaje de entrada se llama desviación de frecuencia,  $\Delta f$ . En consecuencia,  $f_0 = f_n + \Delta f$ , siendo  $f_0 =$  la frecuencia de salida del OCV. Para que haya una  $\Delta f$  simétrica, la frecuencia natural del OCV debe estar centrada en la parte lineal de la curva de entrada-salida.

La función de transferencia de un OCV es [1]:

$$K_0 = \frac{\Delta f}{\Delta V} \quad (3.1)$$

Donde  $K_0$  es la función de transferencia de entrada-salida en Hz/volt,  $\Delta f$  es el cambio de voltaje de control en la entrada en volts y finalmente  $\Delta V$  es el cambio en la frecuencia de salida en Hertz.

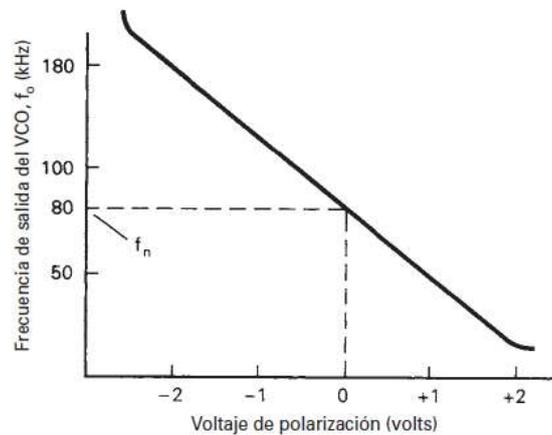


Figura 3.1.- Característica de la salida de frecuencia de un oscilador controlado por voltaje, en función del voltaje de polarización.

Para la construcción de un OCV suelen utilizarse dispositivos tales como el diodo varicap y los cristales de cuarzo. El diodo varicap es un diodo semiconductor capaz de variar su capacidad asociada (capacidad de la unión) cuando está polarizado en sentido inverso, es decir, de manera que el diodo no conduce. La variación de capacidad se controla mediante la magnitud de la tensión inversa a la que se somete el diodo; a mayor tensión inversa, menor capacidad asociada.

El efecto de la capacidad con la polarización inversa es un fenómeno intrínseco de cualquier diodo semiconductor. El diodo varicap se ha diseñado especialmente para que dicho efecto sea mucho más visible que en el resto de diodos de otras aplicaciones, en las cuales no interesa presente capacidad en la unión [2].

En este trabajo se utilizó el OCV **ZX95-2700A-S+**, el cual tiene un ancho de banda de 1400 MHz. A la salida de este OCV se obtiene una señal senoidal de alta frecuencia, la cual varía dependiendo del voltaje de entrada. Las características de este OCV son como se muestra en la Tabla 3.1:

Frecuencia (MHz)		Potencia de salida (dBm)	Rango de voltaje de sintonización (Volts)		Rango de operación DC		Impedancia de salida (ohm)
Min.	Máx.		Min.	Máx.	V <sub>cc</sub> (Volts)	Corriente (mA)	
1300	2700	+3.3	0.15	25	5	35	50

Tabla 3.1.- Características eléctricas del OCV.



Figura 3.2.- VCO serie ZX95-2700A-S+.

La Figura 3.2 muestra el OCV utilizado en este trabajo. Tiene tres terminales de entrada, las cuales se observan en la parte izquierda, el  $V_{CC}$  que es el voltaje de operación ó alimentación, el GND que es la referencia y el  $V_{TUNE}$  que es el voltaje de sintonización, para posicionarse en una frecuencia específica. La salida de este OCV es una salida de radiofrecuencia (RF) que se observa en la parte derecha [3].

### 3.1.2 Generador de señal

Se denomina generador de señal a toda fuente de señal electrónica cuyas características (forma de onda, frecuencia, tensión, etc.) se puede establecer a valores fijos o se pueden controlar dentro de unos límites especificados. Un generador no mide ninguna magnitud, aunque pueda indicar algunos de los parámetros de la señal entregada a su salida [4].

Fundamentalmente, los generadores de señal se elaboran, a partir de un circuito oscilador que tiene la propiedad de producir una determinada forma de onda, cuya frecuencia se regula mediante un mando situado en su panel de control. Los generadores de señal también incorporan un dispositivo de medición de la frecuencia, de tal forma, que al manipular el mando de selección, se puede saber la frecuencia de la señal obtenida en la salida.

Los tipos de onda que puede proporcionar un generador de señal pueden ser de varios tipos: senoidal, triangular, cuadrada y de impulsos, etc. Al aparato que es capaz de generar tanto las señales senoidales como las triangulares y cuadrada se lo conoce como generador de funciones. La operación del generador de funciones es muy simple. Primero se selecciona la forma de onda y la banda de frecuencias, seguidamente se ajusta la frecuencia de salida que deseemos aplicar a la señal de salida y por último la amplitud [5].

El generador de señales utilizado en este trabajo es el **Agilent 81133A**, es un generador de patrones de pulsos a 3.35 GHz. Proporciona pulsos periódicos programables desde 15 MHz (66.6ns) hasta 3.35 GHz (398.5ps) en todos sus canales. Las características claves de este generador de patrones de pulso son las siguientes:

- ❖ Pulsos, patrones de datos y PRBS, señal cuadrada de 15 MHz a 3.35 GHz
- ❖ Formato de datos RZ, NRZ y R1
- ❖ Bajo jitter, alta precisión
- ❖ Tiempos de transición rápidos
- ❖ Generación de PRBS de  $2^5 - 1$  ...  $2^{31} - 1$
- ❖ 50mV a 2Vpp de amplitud de salida

Tipos de canales:

**Cuadrada:** genera una onda cuadrada de ancho fijo (50% de ciclo de trabajo).

**Pulsos:** genera pulsos con anchura o ciclo de trabajo seleccionable.

**Datos:** genera datos en cualquier formato, RZ, NRZ o R1. En RZ y R1 el ancho del pulso o el ciclo de trabajo pueden ser seleccionables.

**PRBS:** emite una PRBS (secuencia binaria pseudo aleatoria) en cualquier formato, RZ, NRZ o R1. En RZ y R1 el ancho del pulso o el ciclo de trabajo pueden ser seleccionables.

Formato de los pulsos:

**RZ:** en inglés (Return to Zero pulse format), es un regreso al nivel cero del pulso. En patrones de 0 bit, la señal regresa al nivel bajo. En patrones de 1 bit, la señal va al nivel alto y regresa al nivel bajo después del tiempo especificado por el ancho del pulso o el ciclo de trabajo especificado.

**NRZ:** en inglés (Non-return to zero pulse format), es un no retorno al nivel cero del formato del pulso. La señal permanece en el nivel cero o en el nivel alto de acuerdo al nivel del bit del patrón en el periodo completo.

**R1:** en inglés (Return to one pulse format), es un regreso al nivel alto. En patrones de 1 bit, la señal permanece en el nivel alto. En patrones de 0 bit, la señal va al nivel bajo y regresa al nivel alto después del tiempo especificado por el ancho del pulso o el ciclo de trabajo especificado.

La siguiente figura ilustra los formatos NRZ, RZ y R1 aplicados a una secuencia binaria:

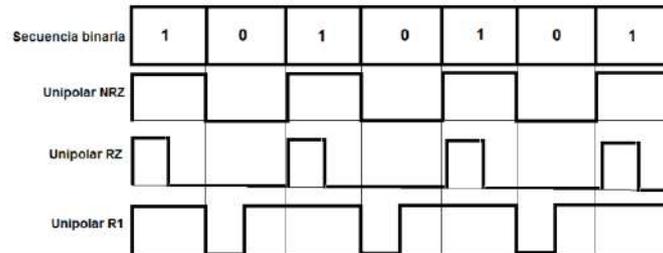


Figura 3.3.- Formatos NRZ, RZ y R1 aplicados en una secuencia binaria.

La Figura 3.4 ilustra el generador de patrones de pulsos utilizado en este trabajo [6].



Figura 3.4.- Generador de patrones de pulso Agilent 81133A.

### 3.1.3 Mezclador de frecuencia

El mezclador es un elemento primordial en los sistemas de comunicación, siendo empleado como convertor de frecuencias.

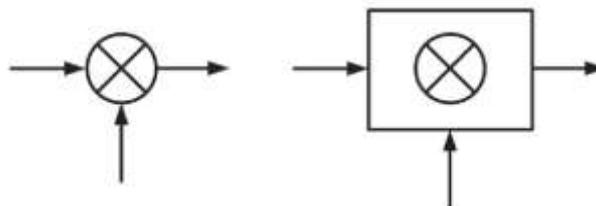


Figura 3.5.- Símbolos del mezclador.

Los mezcladores son utilizados tanto en los transmisores como en los receptores de radiofrecuencia con objeto de trasladar las señales en banda base a una banda de paso, mediante el proceso de modulación (caso de los transmisores), o para trasladar las señales en una banda de paso a banda base, mediante el proceso de conversión

que se lleva a cabo en los receptores a la hora de demodular la señal procedente de la antena.

Así, por ejemplo, en un receptor heterodino la señal RF se traslada a una frecuencia inferior predeterminada, que se denomina frecuencia intermedia (FI); esto se consigue mezclando la frecuencia de la señal RF con la frecuencia de un oscilador (con un mezclador) tal y como se muestra en la Figura 3.6.

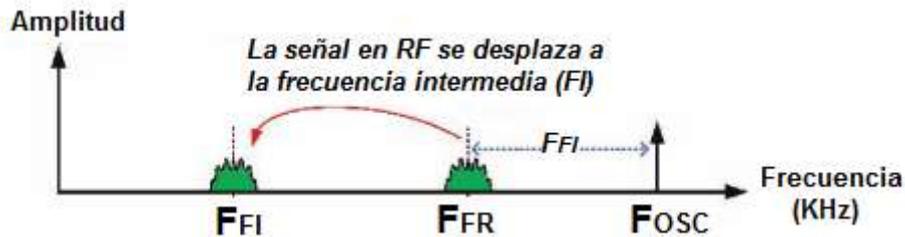


Figura 3.6.- Traslación de frecuencia en un receptor superheterodino.

Los mezcladores son empleados para trasladar las componentes de frecuencia de una señal en el espectro, manteniendo su amplitud relativa. En los transmisores los mezcladores trasladan la señal a frecuencias mayores, con objeto de obtener una señal en la banda de emisión de RF, y en los receptores se utilizan para demodular la señal recibida por la antena en RF y llevarla a frecuencia intermedia y banda base.

Un mezclador ideal es un dispositivo que dispone de dos puertos de entrada y uno de salida y que tiene un comportamiento no lineal. Genera a su salida una señal proporcional al producto de sus entradas, es decir, puede ser modelado como un multiplicador, como se muestra en la Figura 3.7.

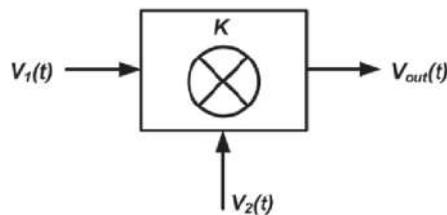


Figura 3.7.- Esquema del mezclador ideal.

La salida del mezclador  $V_{out}(t)$ , será proporcional al producto de las entradas:

$$V_{out} = K * V_1(t) * V_2(t) \quad (3.2)$$

Donde  $K$  es la constante de proporcionalidad,  $V_1(t)$  es el voltaje de la señal de entrada del puerto uno,  $V_2(t)$  es el voltaje de la señal de entrada del puerto dos y  $V_{out}$  es el voltaje de salida del mezclador de frecuencias.

En el caso de disponer a la entrada dos señales sinusoidales:

$$V_1(t) = A_1 * \cos(w_1 t) \quad (3.3)$$

$$V_2(t) = A_2 * \cos(w_2 t) \quad (3.4)$$

Donde  $A_1$  es la amplitud del voltaje de la señal de entrada del puerto uno,  $A_2$  es la amplitud del voltaje de la señal de entrada del puerto dos,  $w_1$  es la frecuencia angular de la señal del puerto uno,  $w_2$  es la frecuencia angular de la señal del puerto dos y  $t$  es el tiempo.

Resulta que la salida adquiere la expresión siguiente:

$$V_{out} = K * A_1 * \cos(w_1 t) * A_2 * \cos(w_2 t) \quad (3.5)$$

$$V_{out} = \frac{KA_1 A_2}{2} (\cos((w_1 + w_2)t) + \cos((w_1 - w_2)t)) \quad (3.6)$$

En los sistemas de comunicaciones de RF una de las principales funciones de los mezcladores es bajar la frecuencia de las señales RF que llegan a los receptores superheterodinos a una frecuencia intermedia a partir de la mezcla entre las señales RF que procede de la antena y la señal regenerada por el oscilador local [7].

El mezclador de frecuencias utilizado como modulador es el **ZX06-U432H-S+**. Este dispositivo es el mostrado en la Figura 3.8.



Figura 3.8.- Mezclador de frecuencia (modulador) ZX05-U432H-S+.

Consta de dos entradas y una terminal de conexión coaxial. Las entradas son IF y LO, y la salida es RF. La potencia máxima en IF es de 100mW. El rango de frecuencia de operación es de 0.1 a 3900 MHz. La Tabla 3.2 indica el rango de frecuencias de cada entrada y terminal [8].

Frecuencia (MHz)		
IF (Entrada)	LO	RF (Salida)
0.1 – 800	1100 - 4250	1100 - 3900

Tabla 3.2.- Rango de frecuencias de operación del mezclador (modulador) de RF.

El mezclador de frecuencias utilizado como demodulador es el **ZX05-C42-S+**. Este dispositivo es el mostrado en la Figura 3.9.



Figura 3.9.- Mezclador de frecuencia (demodulador) ZX05-C42-S+.

Consta de dos entradas que son LO y RF, y de una salida que es IF, la cual es la salida para la señal demodulada. Este dispositivo tiene un rango de frecuencia de 1000 a 4200 MHz. La potencia máxima RF es 50mW, y la corriente máxima IF es de 40mA. El rango de frecuencia de operación de las entradas y la salida es el mostrado en la siguiente Tabla 3.3 [9].

Frecuencia (MHz)	
LO/RF	IF
1000 – 4200	DC – 1500

Tabla 3.3.- Rango de frecuencias del mezclador en la etapa de demodulación.

### 3.1.4 Filtro pasa-bajas y pasa-banda

Cualquier combinación de elementos pasivos (R, L y C) y/o activos (transistores, amplificadores operacionales), diseñados para seleccionar o rechazar una banda de frecuencias se denomina filtro. En sistemas de comunicación, los filtros se utilizan para dejar pasar aquellas frecuencias que contengan la información deseada y rechazar las restantes. Los filtros se utilizan para filtrar cualquier frecuencia no deseada, comúnmente denominada ruido, debido a las características no lineales de algunos dispositivos electrónicos o a señales captadas del medio ambiente. En general, existen dos clasificaciones de filtros:

- ❖ Filtros pasivos: son los componentes compuestos de combinaciones en serie o en paralelo de elementos R, L y C.
- ❖ Filtros activos: son los que utilizan dispositivos activos tales como transistores y amplificadores operacionales en combinación con elementos R, C y L.

En general, todos los filtros pertenecen a las cuatro amplias categorías de **pasa-bajas**, **pasa-altas**, **pasa-banda** y **rechaza-banda** como se ilustra en la Figura 3.10.

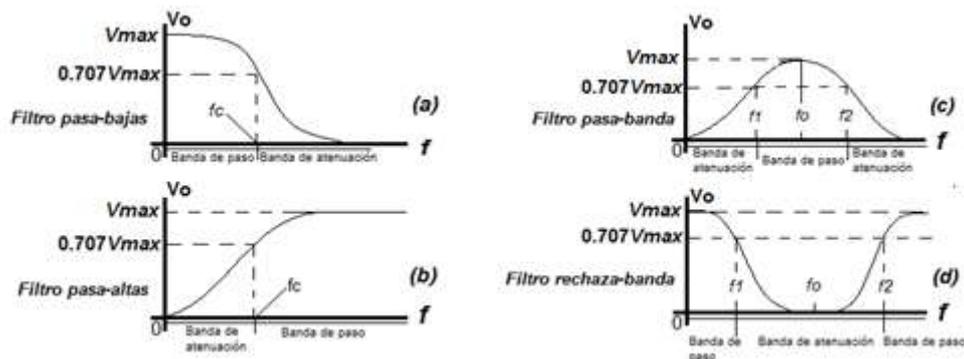


Figura 3.10.- Definición de las cuatro categorías comunes de filtros.

Para cada tipo, existen frecuencias críticas que definen las regiones de bandas de paso y bandas de atenuación (a menudo llamadas bandas de rechazo). Cualquier frecuencia dentro de la banda de paso cruzará a la siguiente etapa con al menos el 70.7% del voltaje de salida máximo [10].

### Filtro pasa-bajas pasivo

Un filtro RC pasa-baja es un circuito formado por una resistencia y un capacitor conectados en serie. Estos filtros RC no son perfectos por lo que se hacen dos análisis. Un análisis en el caso ideal y otro en el caso real.

El filtro pasa-bajas ideal permite sólo el paso de frecuencias por debajo de una frecuencia en particular llamada frecuencia de corte ( $F_c$ ) y elimina las frecuencias por encima de esta frecuencia.

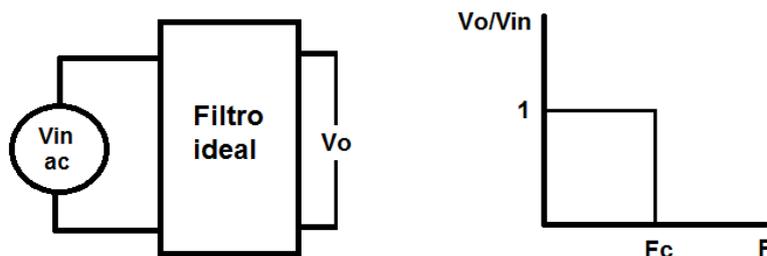


Figura 3.11.- Filtro pasa-bajas ideal.

En el filtro pasa-bajas real la reactancia capacitiva ( $X_c$ ) cambia con la frecuencia. Para altas frecuencias  $X_c$  es baja logrando con esto que las señales de estas frecuencias sean atenuadas. En cambio a bajas frecuencias (por debajo de la frecuencia de corte), la reactancia capacitiva es grande, lo que causa que estas frecuencias no sean atenuadas.

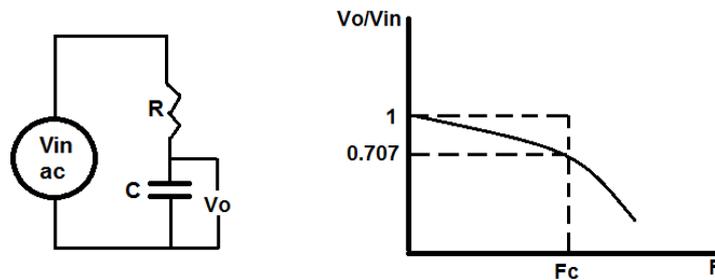


Figura 3.12.- Filtro pasa-bajas real.

Con la ley de ohm:

$$V_{in} = I * Z = I * \sqrt{R^2 + X_c^2} \quad (7)$$

Donde  $V_{in}$  es el voltaje de entrada,  $I$  es la intensidad,  $Z$  es la impedancia,  $R$  es la resistencia y  $X_c =$  Reactancia capacitiva.

$$V_o = I * X_c = \frac{V_{in}}{\sqrt{1+(2\pi RC)^2}} \quad (3.8)$$

Donde  $V_o$  es el voltaje de salida y  $C$  es la capacitancia.

La frecuencia de corte es aquella donde la amplitud de la señal entrante cae hasta un 70.7% de su valor máximo. Y esto ocurre cuando  $X_c=R$  (la reactancia capacitiva es igual a la resistencia). Si  $X_c=R$ , la frecuencia de corte será [11]:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.9)$$

Donde  $F_c$  es la frecuencia central.

El filtro pasa-bajas pasivo utilizado en este trabajo es el **SLP-150+**, este filtro tiene una frecuencia de corte de 140 MHz, y la potencia máxima de entrada es de 0.5W. Este filtro se ilustra en la Figura 3.13 [12].



Figura 3.13.- Filtro pasa bajas SLP-150+.

### Filtro pasa-banda pasivo

El circuito que se muestra a continuación es un filtro pasa-banda (filtro pasa-bajas + filtro pasa-altas), y sólo deja pasar un rango de frecuencias delimitada por dos frecuencias de corte:

- ❖  $F_{c1}$ : frecuencia de corte del filtro pasa-altas, (frecuencia de corte inferior)
- ❖  $F_{c2}$ : frecuencia de corte del filtro pasa-bajas, (frecuencia de corte superior)

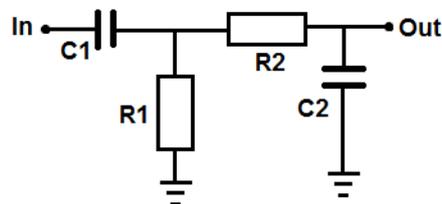


Figura 3.14.- Circuito del filtro pasa-banda.

Si se modifican estas frecuencias de corte, el rango de frecuencias cambia, ampliando o disminuyendo las frecuencias que puedan pasar por él. En este caso la primera parte del circuito con el capacitor C1 y la resistencia R1 forman el filtro pasa-altas, y la segunda parte, formada por el capacitor C2 y la resistencia R2, forman el filtro pasa bajas.

Como se puede ver en el gráfico de la figura 15, el primer filtro (pasa alto con R1 y C1) permite el paso de las frecuencias superiores a la frecuencia de corte de este. Las ondas que lograron pasar por el primer filtro ahora avanzan hasta el segundo filtro donde se eliminan las frecuencias que son superiores a la frecuencia de corte del segundo filtro (pasa-bajas con R2 y C2).

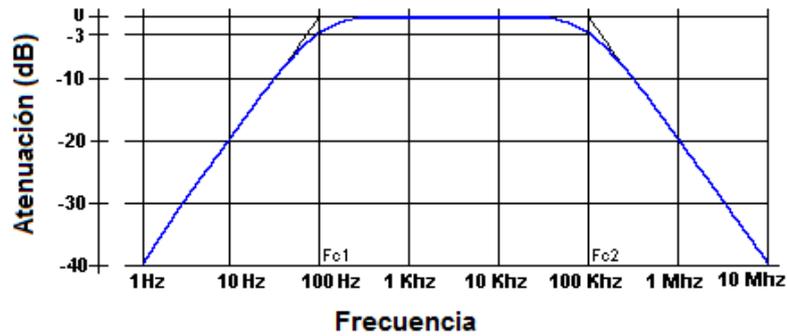


Figura 3.15.- Respuesta de un filtro pasa-banda.

Un caso especial sería cuando las dos frecuencias de corte sean iguales y entonces sólo habría una frecuencia que pasaría por este filtro (la frecuencia de corte). Como se puede ver la banda pasante es de 3 (de 100 a 1 KHz, de 1Khz a 10 KHz y de 10 KHz a 100 KHz) [13].

El filtro pasa-banda pasivo utilizado en este trabajo es el **VBFZ-2000-S+**, la siguiente Tabla 3.4 presenta las características de este filtro [14].

Frecuencia central (MHz) Fc	Bandas de paso (MHz) F1 – F2	Máxima potencia de entrada (W)
2000	1730 - 2270	7

Tabla 3.4.- Características eléctricas del filtro pasa-banda.



Figura 3.16.- Filtro pasa-banda VBFZ-2000-S+

### 3.1.5 Amplificador de potencia

En los amplificadores de potencia se persigue como objetivo fundamental transferir la mayor potencia posible; esto no implica que no se cuide su comportamiento lineal, pero si quiere decir que se permiten mayores tolerancias en relación a las no linealidades que se introducen, admitiendo una distorsión significativa en algunos casos. Algunos ejemplos de este tipo de dispositivos los encontramos en la amplificación de tonos puros o señales moduladas en frecuencia, donde se prioriza la potencia y el rendimiento frente a la linealidad.

Existen muchas aplicaciones donde se utilizan los amplificadores lineales de pequeña señal, especialmente en los receptores RF.

Amplificador de radiofrecuencia (ARF): es un amplificador de banda estrecha y sintonía variable, por lo general, que trabaja con niveles de señal muy pequeños (gran linealidad) y que dispone de un factor de ruido muy bajo y amplia ganancia, consiguiendo que la contribución del ruido del resto de bloques del sistema sea despreciable [15].

El amplificador de radiofrecuencia empleado en este trabajo es el **ZX60-14012L-S+**, las características de este dispositivo se observan en la Tabla 3.5:

Frecuencia (MHz)		Ganancia (dB)		Voltaje de alimentación DC (V)
Fmin	Fmax	Min.	Max.	
0.3	14000	9	12	12

Tabla 3.5.- Características eléctricas del ARF.

Este dispositivo se muestra en la Figura 3.17 [16]:



Figura 3.17.- Amplificador de RF ZX60-14012L-S+.

### 3.1.6 Fuente de voltaje

Para que los circuitos, equipos y sistemas electrónicos funcionen correctamente hay que suministrarles energía eléctrica de tensión, o de corriente, y frecuencias específicas, y potencia suficiente. Los equipos que obtienen la alimentación adecuada a partir de la fuente de energía eléctrica disponible se denominan fuentes de alimentación estabilizadas. Estas fuentes proporcionan la energía de las señales de salida de los circuitos cuya amplitud está controlada por la respectiva señal de entrada [17].

Para este trabajo se emplearon dos fuentes de voltaje regulable, una es la **BK Precision 1761**, y la otra es la **Keysight E3630A**.

La fuente de alimentación **BK Precision 1761** consta de tres salidas independientes de alimentación, dos de ellas son de voltaje regulable de 0 a 30V y corriente regulable de 0 a 3A y otra de 2 a 6.5V y 5A. Las fuentes de 0 a 30V contienen perillas para ajustar el voltaje y la corriente entregada y una perilla para ajustar el voltaje con más exactitud. Esta fuente de voltaje se muestra a continuación [18]:



Figura 3.18.- Fuente de voltaje BK Precision 1761.

La fuente de alimentación **Keysight E3630A** consta de tres salidas de fuente de alimentación, la primera salida es de voltaje continuo regulable de 0 a 6V y corriente continua regulable de 0 a 2.5A. La segunda salida es de voltaje continuo regulable de 0 a +20V y corriente continua regulable de 0 a 0.5A. La tercera salida es de voltaje continuo regulable de 0 a -20V y corriente continua regulable de 0 a 0.5A. La potencia máxima de esta fuente de alimentación es de 35W. Esta fuente de alimentación se muestra a continuación [19]:



Figura 3.19.- Fuente de alimentación Keysight E3630A.

### 3.1.7 Divisor de potencia de RF

Un divisor de RF tiene la función de dividir la señal de RF en dos partes iguales, la señal de entrada permanece con la misma forma a la salida del divisor de RF, pero la potencia de la señal cambia, es por esta razón que se le llama divisor de potencia de RF [20].

El divisor de potencia de RF utilizado es el **ZX10R-14-S+**, el cual tiene un ancho de banda de 10GHz, este dispositivo consta de una entrada que es donde se conecta la señal de RF de entrada, y dos salidas, las cuales contienen la forma de onda de la señal de entrada pero la potencia de cada salida es la mitad de la potencia de entrada.

Este dispositivo se muestra en la siguiente Figura [21]:



Figura 3.20.- Divisor de potencia de RF ZX10R-14-S+.

## 3.2 Dispositivos opto-electrónicos

Se presentan los dispositivos utilizados en el esquema de modulación/demodulación digital ASK óptico, los cuales son: láser DFB, aislador de fibra óptica, control de polarización, modulador electro-óptico, foto-detector y conectores de fibra óptica.

### 3.2.1 Láser DFB

El diodo láser es un diodo de semiconductor que emite luz láser coherente. Esencialmente, no es más que un bloque de material semiconductor que contiene una unión p-n, con las regiones p y n muy densamente dopadas y con una estructura interna más o menos compleja que se hace funcionar a modo de diodo para producir

un efecto láser. En estos materiales, el efecto láser no ocurre por transiciones entre niveles de energía atómicos o de sistemas moleculares sino que, por el contrario, se ha de considerar una estructura de bandas de energía del cristal como un todo [22].

Un láser de retroalimentación distribuida DFB por sus siglas en inglés (Distributed Feedback Laser), es un tipo de diodo láser, donde la región activa del dispositivo es periódicamente estructurada como una rejilla de difracción. La estructura se construye con una rejilla de interferencia unidimensional y ésta genera retroalimentación óptica para el láser [23].

El láser utilizado es el **ADFB-1550-10**, éste es una laser de retroalimentación distribuida, opera a 1550nm, tiene una potencia de salida de 10mW, su modo de operación es en onda continua. La potencia de salida se puede ajustar mediante la perilla del panel frontal. Éste laser se muestra a continuación [24]:



Figura 3.21.- Laser de retroalimentación distribuida ADFB-1550-10.

### 3.2.2 Aislador de fibra óptica

Un aislador dentro de un enlace de fibra óptica permite la propagación de la luz en solo un camino (de izquierda a derecha) como se muestra en la Figura 3.22, con pérdidas mínimas, evitando que luz se refleje en sentido inverso. Dependiendo del diseño, la señal óptica reflejada presenta una atenuación de 40 a 70 dB.

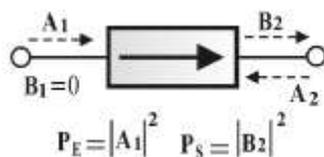


Figura 3.22.- Esquema y flujo de señales en un aislador de fibra óptica.

Este dispositivo se caracteriza por dos parámetros: pérdidas de inserción (L), y la relación de aislamiento, ambas expresadas en dB. Estos parámetros están relacionados con la potencia óptica en la entrada y salida del dispositivo:

$$L = 10\text{Log}\left(\frac{P_E}{P_S}\right) \quad (3.10)$$

Donde L es la pérdida de inserción,  $P_E$  es la potencia de entrada y  $P_S$  es la potencia de salida.

$$I = \frac{10\text{Log}(|A_2|^2)}{|B_1|^2} \quad (3.11)$$

Donde I es la relación de aislamiento,  $A_2$  es el campo óptico incidente (puerto uno) de polarización y  $B_1$  es cuando ningún campo óptico medido en el puerto uno.

Un aislador óptico ideal, las pérdidas de inserción son  $L = 0$  dB, y la relación de aislamiento es  $I = \infty$  [25].

En este trabajo, la función del aislador óptico es colocarlo a la salida de la fuente óptica para evitar reflexiones de luz que puedan regresar de nuevo a la fuente evitando así inestabilidades y posibles daños a la fuente óptica.

### 3.2.3 Control de polarización

Un control de polarización cambia el estado de polarización de la luz. En los sistemas actuales, los controles de polarización se pueden colocar en los brazos de una señal óptica o en los brazos de una señal de un oscilador local óptico con el fin de mantener el estado de polarización de ambas señales. La Figura 3.23 muestra el esquema de un control de polarización. Básicamente, se compone de una fibra monomodo que cruza tres platos. La fibra óptica (de izquierda a derecha) es enrollada de forma circular una vez en el plato uno, dos veces en el segundo plato, y finalmente una vez en el tercer plato [26].

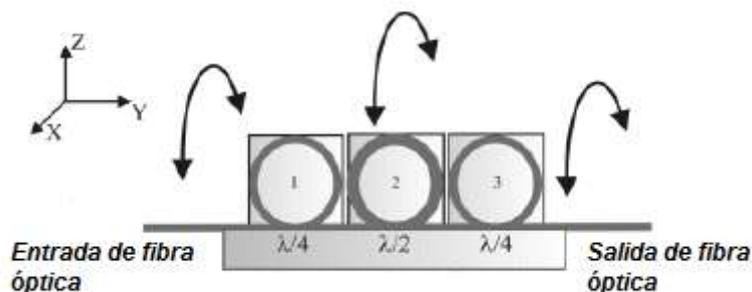


Figura 3.23.- Control de polarización.

### 3.2.4 Modulador electro-óptico

El efecto electro-óptico es uno de los varios medios para transmitir información o modular una onda portadora de luz. Los dispositivos electro-ópticos se han desarrollado para aplicaciones como comunicaciones, procesamiento de señales analógicas y digitales, procesamiento de información, sensado, etc.

La idea básica detrás de los dispositivos electro-ópticos es alterar las propiedades ópticas de un material con un voltaje aplicado de forma controlada. Los cambios en las propiedades ópticas, se reflejan en la modificación de algún parámetro de la onda portadora de luz, como la fase, la amplitud, la frecuencia, la polarización, conforme ésta se propague a través del dispositivo.

Un modulador electro-óptico es un dispositivo que opera basándose en un cambio eléctricamente inducido en el índice de refracción, o un cambio en birrefringencia natural. Dependiendo de la configuración del dispositivo, las siguientes propiedades de la onda de luz pueden cambiar: fase, polarización, amplitud, frecuencia o dirección de propagación. El dispositivo se diseña con un rendimiento óptimo para trabajar en la banda C de las comunicaciones ópticas [27].

El modulador electro-óptico utilizado es el **IM-1550-20**, este modulador es un modulador de intensidad con un ancho de banda de 20GHz que opera en un rango de 1530nm a 1600nm (Banda C), la potencia óptica de entrada máxima es de 100mW. Consta de una entrada óptica, una entrada de RF, una entrada DC Bias y una salida. Este dispositivo se muestra a continuación [28]:



Figura 3.24.- Modulador de intensidad electro-óptico IM-1550-20.

### 3.2.5 Foto-detector

El receptor de un sistema de comunicaciones consiste de un foto-detector, un amplificador y algunos circuitos adicionales de procesamiento de señal.

El foto-detector es responsable de convertir la potencia óptica recibida en una señal eléctrica, generalmente de corriente, que después es amplificada y transformada en un nivel de tensión.

Puesto que el foto-detector constituye el primer elemento del receptor, sus propiedades repercutirán de manera decisiva sobre la calidad de todo el subsistema. En la actualidad los dispositivos foto-detectores más ampliamente empleados son los basados en semiconductores y, en particular, los fotodiodos [29].

El foto-detector utilizado es el **LR-15-A-M** es un módulo receptor compuesto por un fotodiodo PIN amplificado, con un ancho de banda de 15GHz, diseñado para aplicaciones de transmisión de señales de RF, también para RF sobre fibra. Opera en un rango de longitud de onda de 1250 a 1650nm, el nivel de entrada óptica es máximo 3dBm. Este dispositivo se muestra a continuación [30]:



Figura 3.25.- Foto-detector LR-15-A-M.

### 3.2.6 Conectores de fibra óptica

Los conectores ópticos constituyen uno de los elementos más importantes dentro de la gama de dispositivos pasivos necesarios para establecer un enlace óptico, siendo su principal tarea, junto con el adaptador, la de permitir el alineamiento y unión temporal y repetitivo, de dos o más fibras ópticas entre sí.

El adaptador es un dispositivo mecánico que hace posible el correcto acoplamiento de dos conectores de idéntico o distinto tipo [31].

### 3.3 Equipo de medición

Se presenta el equipo de medición utilizado para los esquemas de modulación/demodulación digital ASK eléctrico y óptico. Estos son: osciloscopio de alta velocidad, analizador de espectros eléctricos y analizador de espectros ópticos.

#### 3.3.1 Osciloscopio de alta velocidad

El osciloscopio es el instrumento habitual para visualizar, medir, analizar y registrar, mediante un trazo no permanente, tensiones variables en el tiempo.

La función básica de los osciloscopios es capturar y representar visualmente una señal para permitir su análisis en el dominio del tiempo. Pueden ser analógicos o digitales.

Los osciloscopios digitales toman muestras de la señal que se desea estudiar, cuantifican su valor y almacenan el resultado numérico en una memoria digital hasta tener un número de puntos suficientes para representar la señal de una forma coherente. La pantalla está recubierta internamente de fósforo, que es una sustancia que convierte la energía de los electrones en luz [32].

El osciloscopio utilizado en este trabajo es un osciloscopio digital de fósforo de alta velocidad de serie Tektronix **DPO 7254**, las características de este osciloscopio son las siguientes [33]:

- Ancho de banda de 2.5 GHz.
- Tasa de muestro de 40 GS/s.
- Software especificado para mediciones de jitter, diagrama de ojo, sincronización, potencia.
- Cuatro canales para medir simultáneamente.
- Panel frontal para manipulación de eje vertical y horizontal.
- Filtros internos y ajuste de acople de impedancia.

Este osciloscopio digital de alta velocidad se muestra en la Figura 3.26 [34]:



Figura 3.26.- Osciloscopio digital de fósforo DPO 7254 Tektronix.

### 3.3.2 Analizador de espectros eléctricos

El analizador de espectros eléctricos es una herramienta capaz de representar las componentes espectrales de una determinada señal a partir de su transformada de Fourier. Esta representación en el dominio de la frecuencia permite visualizar parámetros de la señal que difícilmente podrían ser descubiertos trabajando en el dominio del tiempo mediante el uso de un osciloscopio [35].

El analizador de espectros eléctricos utilizado es el **Agilent E4407B**, el cual tiene un rango de frecuencias de 9 KHz a 26.5 GHz, las características de este equipo son:

- Impedancia de entrada de 50 ohm.
- Frecuencia central ajustable.
- Atenuación y valor de referencia de amplitud ajustable.
- Captura de datos mediante disco flexible.
- Buscador automático de pico de frecuencia de amplitud máxima.
- Ajuste del ancho de banda.

Este equipo se muestra en la Figura 3.27 [36]:



Figura 3.27.- Analizador de espectros eléctricos Agilent E4407B.

### 3.3.3 Analizador de espectros ópticos

El analizador de espectros óptico se utiliza para realizar medidas de potencia óptica en función de la longitud de onda. Sus aplicaciones incluyen la caracterización de fuentes de luz (diodos de emisión de luz, LED, y láser, LD) en cuanto a su distribución de potencia y pureza espectral (anchura espectral), así como la medida de la característica de transmisión de componentes ópticos pasivos [37].

El analizar de espectros ópticos utilizado es el **Anritsu MS9710C**, el cual tiene las siguientes características:

- Aplicaciones como: caracterización de Leds, láseres DFB y Fabry-Perot, y características de transmisión de componentes ópticos pasivos como filtros y aisladores.
- Rango de longitud de onda de medición de 600 a 1750nm con resolución máxima de 0.07nm.
- El rango de medición es de -90 a 10dBm.
- Las medidas y formas de onda se pueden guardar mediante un disco flexible.

Este equipo se muestra en la Figura 3.28 [38]:



Figura 3.28.- Analizador de espectros ópticos Anritsu MS9710C.

## Referencias

- [1] Wayne Tomasi, 2003, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, Naucalpan de Juárez, Edo. De México, Pearson Educación de México, S.A de C.V, pp. 74-75.
- [2] <http://www2.ual.es/te/icons/cqvco1.pdf>
- [3] <http://www.minicircuits.com/pdfs/ZX95-2700A+.pdf>
- [4] Ramón Pallás Areny, 2006, *Instrumentos electrónicos básicos*, Gran Via de les Corts Catalanes, Barcelona, España, Marcombo, S.A, pp. 139.
- [5] Pablo Alcalde San Miguel, 2010, *Electrónica general, equipos electrónicos de consumo*, Av. Filipinas, 50 Bajo A / 28003, Madrid, España, Paraninfo, S.A, pp. 146.
- [6] [https://d3fdwrtpsindh7j.cloudfront.net/Docs/datasheet/Agilent\\_81134A.pdf](https://d3fdwrtpsindh7j.cloudfront.net/Docs/datasheet/Agilent_81134A.pdf)
- [7] Sergio Gallardo Vázquez, 2015, *Elementos de sistemas de comunicaciones*, C/ Velázquez, 31, 3.º Dcha. / 28001, Madrid, España, Paraninfo, S.A, pp. 45-46.
- [8] <http://www.minicircuits.com/pdfs/ZX05-U432H+.pdf>
- [9] <http://www.minicircuits.com/pdfs/ZX05-C42.pdf>
- [10] Robert L. Boylestad, 2004, *Introducción al análisis de circuitos*, Naucalpan de Juárez, Edo. De México, Pearson Educación de México, S.A de C.V, pp. 1026 - 1028.
- [11] <http://unicrom.com/filtro-rc-paso-bajo/>
- [12] <https://www.minicircuits.com/pdfs/SLP-150+.pdf>
- [13] <http://unicrom.com/filtro-rc-pasa-banda/>
- [14] <http://www.minicircuits.com/pdfs/VBFZ-2000+.pdf>
- [15] Sergio Gallardo Vázquez, 2015, *Elementos de sistemas de comunicaciones*, C/ Velázquez, 31, 3.º Dcha. / 28001, Madrid, España, Paraninfo, S.A, pp. 40.
- [16] <http://www.minicircuits.com/pdfs/ZX60-14012L.pdf>
- [17] Ramón Pallás Areny, 2006, *Instrumentos electrónicos básicos*, Gran Via de les Corts Catalanes, Barcelona, España, Marcombo, S.A, pp. 53.
- [18] <http://www.bkprecision.com/products/power-supplies/1761-4-digit-triple-output-dc-power-supply-20-35v-0-3a-12-65v-5a.html>
- [19] <http://www.keysight.com/en/pd-836823-pn-E3630A/35-w-triple-output-6v-25a-20v-05a?cc=US&lc=eng>
- [20] <http://www.telecomhall.com/ES/que-es-splitter-y-combinador.aspx>
- [21] <http://194.75.38.69/pdfs/ZX10R-14+.pdf>

- [22] José Benito Ruiz Carbajal, *diodo laser*, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- [23] [https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed\\_feedback\\_laser](https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_feedback_laser)
- [24] <http://www.findlight.net/lasers/fiber-lasers/cw-fiber-lasers/amonics-distributed-feedback-laser-adfb-1550-10>
- [25] Alejandro García Juárez, Ignacio Enrique Zaldívar Huerta, Jorge Rodríguez Asomoza y María del Rocío Gómez Colín, *Photonic Components for Analog Fiber Links*, pp. 149 – 150.
- [26] Alejandro García Juárez, Ignacio Enrique Zaldívar Huerta, Jorge Rodríguez Asomoza y María del Rocío Gómez Colín, *Photonic Components for Analog Fiber Links*, pp.151.
- [27] Theresa A. Maldonado, *Electro optic Modulators chapter 13*, pp. 3, 15.
- [28] <http://www.optilab.com/images/datasheets/IM-1550.pdf>
- [29] María Carmen España Boquera, *Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios*, Juan Bravo, 3-A. 28006 Madrid, España, S. A., pp. 137 – 138.
- [30] <https://www.oquest.com/getDdatasheet/id/4605-324d78f114bf5f8.pdf>
- [31] <http://fibremex.com/fibraoptica/index.php?mod=contenido&id=3&t=3&st=11> ,  
<http://www.fibraopticahoy.com/blog/conectores-de-fibra-optica/>
- [32] Ramón Pallás Areny, 2006, *Instrumentos electrónicos básicos*, Gran Via de les Corts Catalanes, Barcelona, España, Marcombo, S.A, pp. 161 – 163.
- [33] <http://www.tek.com/datasheet/dpo7000-series>
- [34] <http://www.tek.com/oscilloscope/dpo7000-digital-phosphor-oscilloscope>
- [35] [http://www.electronicam.es/analizador\\_espectros.html](http://www.electronicam.es/analizador_espectros.html)
- [36] <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-9815EN.pdf?id=1548393>
- [37] [http://www.tfo.upm.es/docencia/2006-07/LIBRO\\_LCOP/Desarrollo\\_PE1.pdf](http://www.tfo.upm.es/docencia/2006-07/LIBRO_LCOP/Desarrollo_PE1.pdf)
- [38] [http://dl.cdn-anritsu.com/en-au/test-measurement/files/Manuals/Operation-Manual/MS9710C\\_W1579AE\\_opm\\_e\\_11\\_0.pdf](http://dl.cdn-anritsu.com/en-au/test-measurement/files/Manuals/Operation-Manual/MS9710C_W1579AE_opm_e_11_0.pdf)

# Modulación de intensidad electroóptica y detección coherente

## 4.1 Modulación directa y externa

La modulación en un sistema de comunicación óptico es el proceso de imprimir información sobre una portadora. Se puede modular la intensidad, la fase y la polarización de un haz de luz. El formato de la modulación puede ser analógico o digital dependiendo de las características del sistema, de las fuentes y de los detectores, así como del medio de transmisión. Las dos razones principales por las cuales es necesario modular son: adecuar las señales al medio de transmisión y aprovechar el gran ancho de banda.

Para que un sistema óptico pueda utilizarse para transportar información de un punto a otro es necesario modular la intensidad de la luz que proviene de la fuente óptica, esto se puede lograr mediante: modulación directa y/o modulación externa.

### Modulación directa

La Figura 4.1 (a) muestra un esquema de modulación directa, donde una señal de RF es utilizada para controlar de manera directa la corriente aplicada a una fuente óptica. La Figura 4.1 (b) muestra el circuito básico de modulación directa, el cual consiste simplemente en polarizar la fuente luminosa para que emita luz en función de la señal de información o señal modulante. Para que la luz sea modulada, el controlador convierte proporcionalmente el voltaje de la señal de RF en un flujo de corriente que se aplica a la fuente óptica, obteniéndose de esta manera un haz luminoso modulado en intensidad. Las ventajas de este esquema son su fácil implementación y bajo costo, mientras que su desventaja es la modulación a velocidades por debajo de los 10Gbps [2].

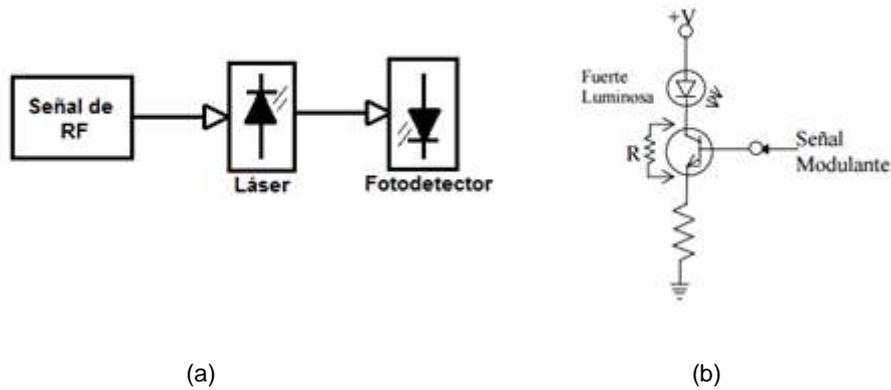


Figura 4.1.- (a) Esquema de modulación directa, (b) Circuito eléctrico de modulación directa.

### Modulación externa

La Figura 4.2 corresponde a un sistema básico de comunicación óptica el cual hace uso de la técnica de modulación externa. Esta técnica emplea moduladores electro – ópticos de óptica integrada. Bajo este esquema, la fuente óptica es polarizada con una corriente de CD y el haz de luz generado se inyecta al modulador electro-óptico (MEO) con el propósito de ser modulado por una señal de RF. La principal característica de los MEOs es su alta velocidad de operación. Si bien es cierto que el costo de ésta técnica se incrementa con respecto a la modulación directa; se obtienen beneficios tales como incremento en la velocidad de modulación (mayor a los 10Gbps) y enlaces con mayor distancia de transmisión [2].

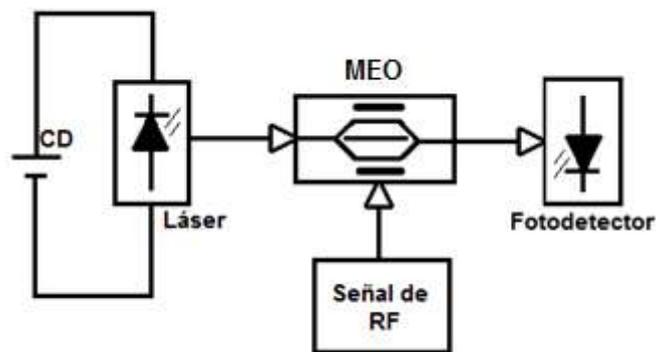


Figura 4.2.- Esquema de modulación externa.

## 4.2 Modulador electro-óptico

La modulación electro óptica, es un proceso en el cual una señal óptica se modifica en cualquiera de sus parámetros, tales como intensidad, fase o polarización, para ser transmitida en un sistema de comunicación óptico. Para esto existen dos técnicas de modulación, mencionadas anteriormente, que son: modulación directa y modulación externa. En este trabajo se empleó la modulación externa.

La modulación electro-óptica se compone de los elementos que se muestran en la Figura 4.3:

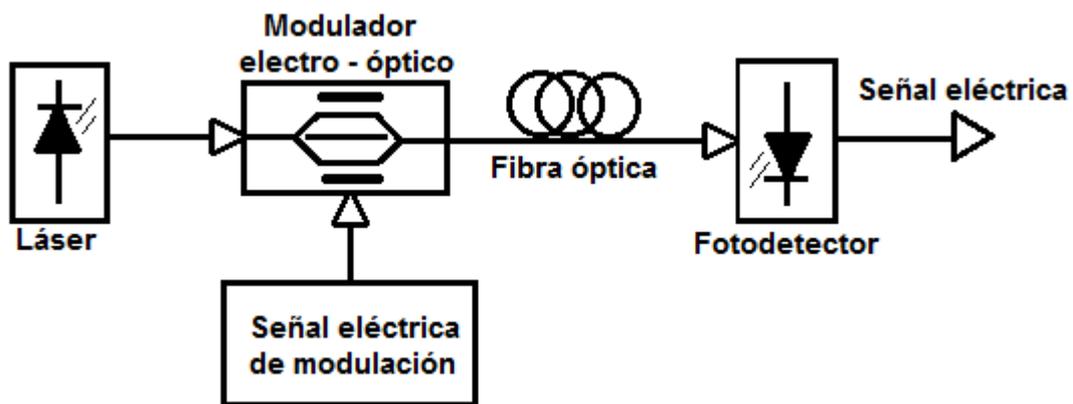


Figura 4.3.- Diagrama de sistema electro-óptico.

Para realizar la modulación externa, existen dispositivos fabricados con técnicas de óptica integrada, donde su funcionamiento es basado en el efecto electro-óptico [3].

A continuación se tiene la Figura 4.4, donde se observa como está compuesto un modulador electro-óptico.

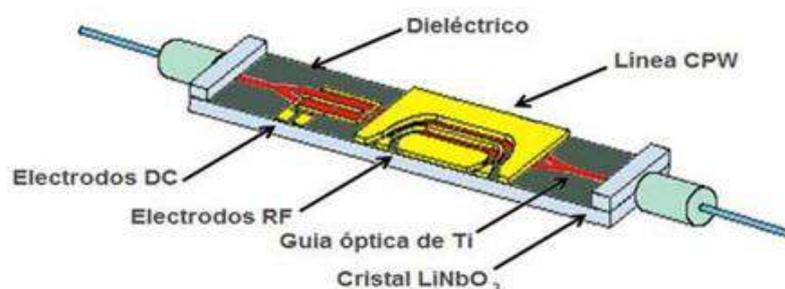


Figura 4.4.- Esquema de fabricación de un modulador electro-óptico.

El efecto electro-óptico es un cambio en las propiedades ópticas de un material en respuesta a un campo eléctrico que varía lentamente en comparación con la frecuencia de la luz [4].

La Figura 4.5 (a) y 4.5 (b) ilustran las estructuras fundamentales de los primeros MEOs, los cuales son conocidos como moduladores de volumen o de óptica masiva. Estos MEOs poseen anchos de banda de aproximadamente 200 MHz. La Figura 4.5 (a) corresponde al caso donde la modulación de la luz se realiza mediante la aplicación de un campo eléctrico de manera longitudinal, es decir, la luz se propaga en forma paralela en dirección al campo eléctrico aplicado. La Figura 4.5 (b) corresponde al caso en el cual la modulación es orientada de manera perpendicular al campo eléctrico aplicado. Finalmente la Figura 4.5 (c) corresponde a un MEO de óptica integrada, el cual mejora sustancialmente su ancho de banda, alcanzando valores de 100 GHz. En todos los casos, el material utilizado para su fabricación es birrefringente, como el niobato de litio  $\text{LiNbO}_3$  o tantalio de litio  $\text{LiTaO}_3$  [5].

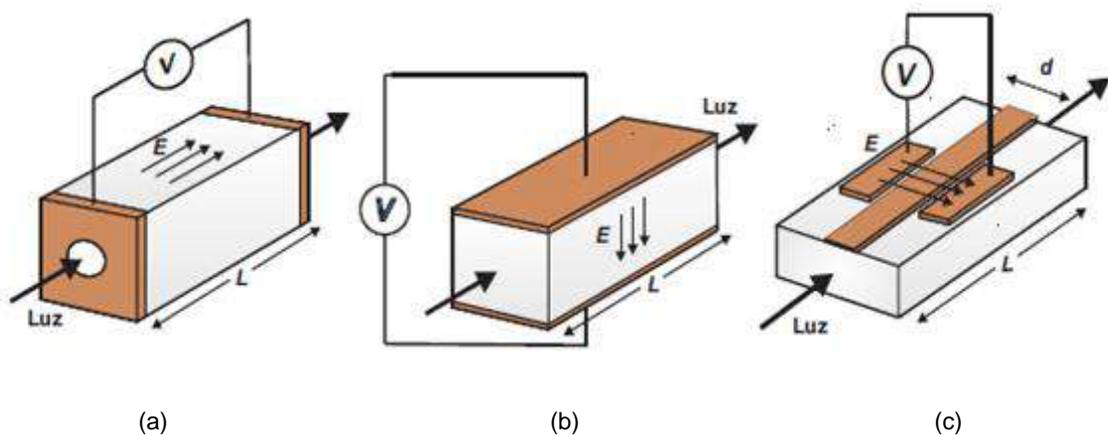


Figura 4.5.- (a) MEO orientado longitudinalmente, (b) MEO orientado transversalmente, (c) Modulador de tipo transversal en óptica integrada.

### 4.3 Modulador de intensidad Mach-Zehnder

La Figura 4.6 muestra que un Modulador de Intensidad Mach-Zehnder (MIMZ) de intensidad contiene guías de onda en forma de dos Y encontradas. La primera bifurcación divide el haz luminoso en dos ondas con potencias ópticas idénticas para seguir por trayectorias diferentes las cuales son paralelas, rectilíneas y de misma longitud. Al aplicar un campo eléctrico por medio de los electrodos de RF, se logra modificar el índice de refracción de uno de los brazos por efecto electro-óptico, permitiendo desfasar una onda óptica con respecto a la otra mediante el efecto

Pockels. Finalmente, el resultado a la salida del MIMZ de intensidad es una modulación de la amplitud de la onda óptica debido a la interferencia de la recombinación de los dos haces ópticos [6].

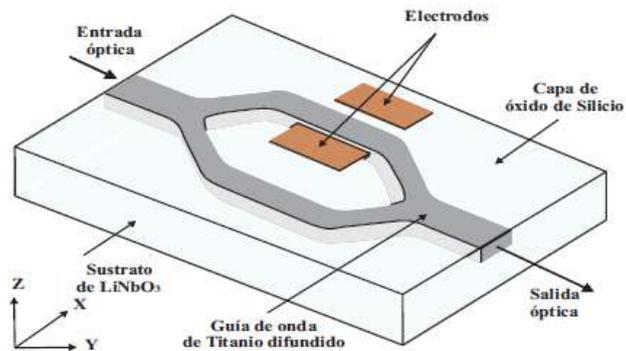


Figura 4.6.- MIMZ de intensidad en óptica integrada.

Los cortes cristalinicos se determinan en función de los ejes ópticos del cristal de  $\text{LiNbO}_3$ . La finalidad de estos cortes es alinear el campo eléctrico con los coeficientes más elevados del cristal  $\text{LiNbO}_3$ .

La guía de onda se fabrica depositando y difundiendo una película delgada de Titanio ( $\text{Ti}$ ) sobre el sustrato de  $\text{LiNbO}_3$ ; la presencia del  $\text{Ti}$  en el cristal hace que se incremente el índice de refracción conforme el  $\text{Ti}$  penetra en el sustrato de forma no lineal. Posteriormente se deposita una capa de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) seguida de un depósito de metal. La finalidad de la capa de ( $\text{SiO}_2$ ) es proporcionar un buen acoplamiento entre las señales ópticas y eléctricas. A lo largo de los brazos de la guía de onda se colocan los electrodos de RF que permiten aplicar un campo eléctrico. Por lo general el metal utilizado para los electrodos de RF es oro [6].

#### 4.4 Funcionamiento del modulador de intensidad tipo Mach-Zehnder

El modulador Mach-Zehnder actúa como modulador de intensidad ya que cada guía de onda propaga la luz y puede alterar la fase de uno de los brazos, dando que a la salida se sumen las fases de cada guía de onda.

El modulador de intensidad tipo Mach-Zehnder funciona de la siguiente manera: la señal óptica entra en la guía de onda  $P_{en}$  y se divide en dos brazos, formando una  $Y$  donde se divide la intensidad óptica a 50% en cada brazo. En un brazo se encuentran depositados los electrodos para formar el desfase entre las dos guías de onda.

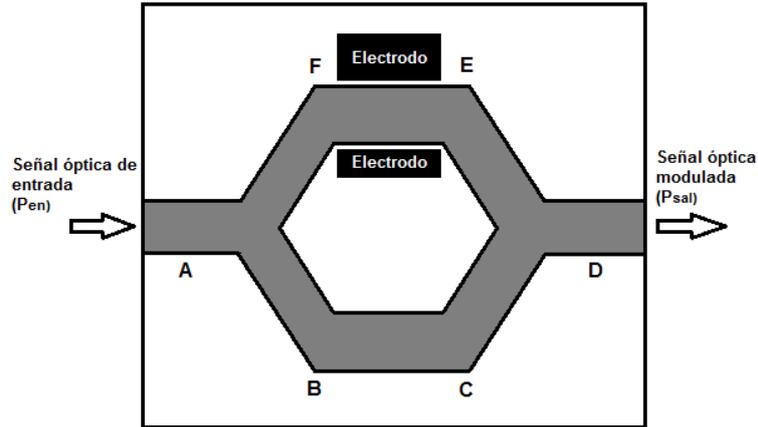


Figura 4.7.- Esquema del modulador de intensidad Mach-Zehnder.

Al dividirse la señal óptica, una viaja por uno de los brazos sin alteración (A-B-C-D). La otra parte (A-F-E-D) experimenta una modulación de fase. En el punto D de la figura 4.7 se realiza una superposición de las ondas que viajan en los brazos del MIMZ, para obtener así en la salida el término  $P_{sal}$ , el cual se representa como:

$$P_{sal} = \frac{1}{2}P_{en} + \frac{1}{2}P_{en} \cos \Delta\varphi \quad (4.1)$$

Donde  $P_{en}$  es la potencia óptica de entrada y  $P_{sal}$  es la potencia óptica de salida.  $\Delta\varphi$  es la diferencia de fase de las ondas que viajan por los brazos del modulador de intensidad.

La transmisión óptica  $P_{sal}/P_{en}$  varía cosenoidalmente con  $\Delta\varphi$  y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{P_{sal}}{P_{en}} = \frac{1}{2}(1 + \cos \Delta\varphi) \quad (4.2)$$

Esto se puede analizar para dos casos: cuando  $\Delta\varphi = 0$ , la recombinación de las señales excita el modo fundamental para una máxima transmisión del modo guiado, y cuando  $\Delta\varphi = \pi$ , esto forma un perfil del campo asimétrico pareciéndose a un modo guiado de segundo orden. Como la guía es angosta en la región de recombinación, la luz es acoplada dentro del substrato resultando en una transmisión nula del modo guiado. El rango del modulador de intensidad es cuando la diferencia de fase va de  $\Delta\varphi = 0$  a  $\Delta\varphi = \pi$ . El cambio de fase  $\Delta\varphi$  es controlado por la inyección de una señal de voltaje  $V(t)$  en uno de los brazos del dispositivo. La transmisión óptica es una función del voltaje aplicado y se puede expresar como:

$$\frac{P_{sal}}{P_{en}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \left[ \frac{\pi V(t)}{V_{\pi}} + \theta_B \right] \right) \quad (4.3)$$

En la ecuación 4.3 se muestra  $V_{\pi}$ , que es el voltaje de media onda.

$$V_{\pi} = \frac{\lambda S}{n^3 r \Gamma l} \quad (4.4)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda óptica,  $n$  es el índice de refracción,  $r$  es el coeficiente electro-óptico del niobato de litio en la dirección “z” o “x”,  $\Gamma$  es el coeficiente de superposición óptico entre el campo eléctrico de la onda luminosa y el campo eléctrico del voltaje aplicado,  $S$  es la separación de los electrodos y  $l$  es la longitud de los electrodos.

Al tener el valor de  $V_{\pi}$  se conoce el intervalo de operación del modulador. La Figura 4.8 muestra que en el rango operacional entre 0 y  $V_{\pi}$  volts se pueden introducir señales de voltaje que se encuentran en el rango de  $V_{\pi}$  que dan a la salida señales de potencia óptica [7].

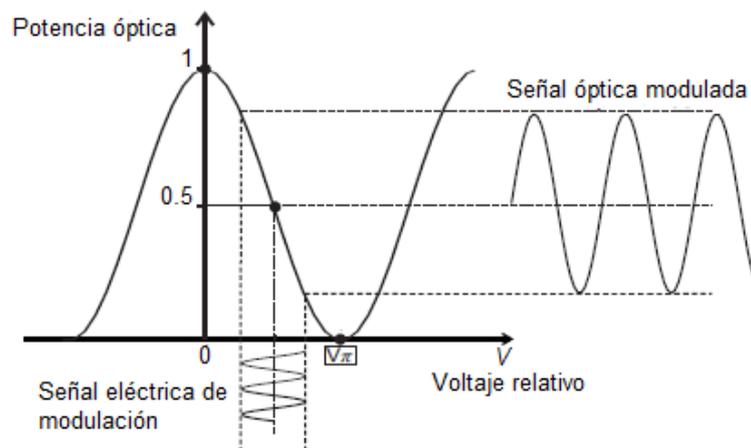


Figura 4.8.- Potencia óptica a la salida del MIMZ en función del voltaje aplicado en los electrodos de RF.

#### 4.5 Detección coherente

En la detección incoherente o directa, el receptor responde únicamente a las variaciones instantáneas de la luz y debido a un índice de modulación bajo, no se utilizan filtros de microondas para recuperar la información. En la detección coherente el receptor opera mediante la adición de un campo óptico, que es generado localmente antes de la foto-detección. El objetivo es usar el campo óptico local, para mejorar el proceso de foto-detección y recuperar la información recibida en presencia de un ruido térmico interno en el receptor. El campo combinado es foto-detectado como si fuera un

único campo óptico recibido. La detección coherente se divide en: detección heterodina y homodina.

Un receptor heterodino típico se muestra en la Figura 4.9, el campo óptico recibido es proyectado dentro de la superficie del detector.

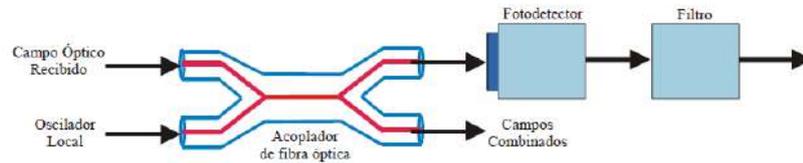


Figura 4.9.- Receptor coherente heterodino.

Los sistemas de comunicaciones ópticas, basados en esquemas de detección coherente, utilizan una fuente óptica monocromática (láser) como un oscilador local, para recuperar la información, mientras que en la detección directa o incoherente no es necesaria una señal externa (oscilador local). Sin embargo, el uso de un oscilador local en la detección coherente, permite que la dispersión cromática disminuya, lo cual resulta imposible de lograr en sistemas de detección directa. Una desventaja en los sistemas de detección coherente es que son más elaborados que los esquemas de detección directa, pero tienen la ventaja de recuperar la información impresa en señales ópticas débiles y ruidosas, esto se debe a que tiene una mejor relación señal a ruido que en los esquemas de detección directa. La mayor desventaja que presenta la detección coherente es que, para recuperar la información debe existir una alta correlación entre las fases de las señales ópticas combinadas. Esto se debe a que los láseres semiconductores que se utilizan en sistemas de detección coherente presentan anchos espectrales distintos de cero ( $\Delta\lambda \neq 0$ ) y un número de frecuencias con variaciones de fases y amplitudes alrededor de la fase deseada, esto se logra utilizando controles de polarización y técnicas OPLL (Optical Phase Locked Loops) [8].

## Referencias

- [1] José Luis Jiménez Peñalosa, *“Caracterización del modulador electro-óptico APEtm microwave analog intensity con aplicación de transmisión de video compuesto”*, tesis de maestría, especialidad en Ingeniería electrónica, Cholula, Puebla, México, Universidad de las Américas Puebla 2005, capítulo 4, pp. 52, 61.
- [2] Antonio Baylón Fuentes, *“Diseño, fabricación y utilización de antenas en sistemas de comunicaciones híbridos fibra-radio operando en el rango de las frecuencias de microondas”*, especialidad en electrónica, Tonantzintla, Puebla, México, INAOE, 2011, capítulo 2 pp. 15 – 17.
- [3] Oscar Gerardo Oviedo Federico, *“Estudio teórico – experimental de sistemas de telefonía LTE y su aplicación en sistemas híbridos de radiofrecuencia y fibra óptica”*, tesis de licenciatura, especialidad en Ingeniería electrónica, Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora 2014, capítulo 5, pp. 50 – 51.
- [4] Justiniano Casas (1994), *Óptica*, Zaragoza
- [5] Antonio Baylón Fuentes, *“Diseño, fabricación y utilización de antenas en sistemas de comunicaciones híbridos fibra-radio operando en el rango de las frecuencias de microondas”*, especialidad en electrónica, Tonantzintla, Puebla, México, INAOE, 2011, capítulo 2, pp.17 – 18.
- [6] Antonio Baylón Fuentes, *“Diseño, fabricación y utilización de antenas en sistemas de comunicaciones híbridos fibra-radio operando en el rango de las frecuencias de microondas”*, especialidad en electrónica, Tonantzintla, Puebla, México, INAOE, 2011, capítulo 2, pp. 18 – 20.
- [7] José Luis Jiménez Peñalosa, *“Caracterización del modulador electro-óptico APEtm microwave analog intensity con aplicación de transmisión de video compuesto”*, tesis de maestría, especialidad en Ingeniería electrónica, Cholula, Puebla, México, Universidad de las Américas Puebla 2005, capítulo 4, pp. 61 – 64.
- [8] Alejandro García Juárez, *“Análisis comparativo entre las características de los diferentes sistemas de comunicaciones ópticos”*, Dpto. de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora.

## Resultados del trabajo experimental

### 5.1 Estudio espectral de la modulación ASK

Para encontrar la transformada de Fourier (TDF) de la señal de modulación digital ASK, primero se obtiene la TDF de un tren de pulsos digitales y después se define la propiedad de desplazamiento en la frecuencia de la TDF.

**TDF de tren de pulsos.**- la anchura del pulso es  $\tau$ , y la amplitud del pulso va de 0V a 1V, como se muestra en la Figura 5.1.

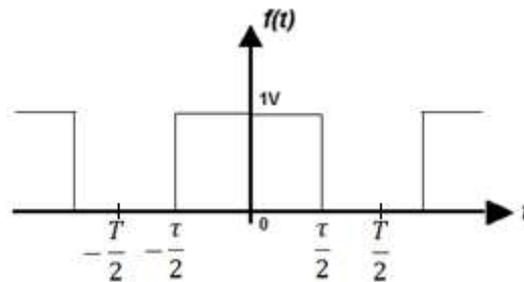


Figura 5.1.- Tren de pulsos digitales.

Hemos definido un número fijo positivo  $\tau$ ,  $f(t)$  denota el pulso rectangular de duración  $\tau$  segundos definido por [1]:

$$f(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{para todas las demas } t \end{cases}$$

Se observa que la señal de la figura es par. La TDF establece que:

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (5.1)$$

Sustituimos  $f(t)$  por 1 en la ecuación 5.1 y cambiamos los límites de integración por los límites de la función  $f(t)$  cuando vale 1. Esto se muestra en la ecuación 5.2:

$$F(\omega) = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} (1)e^{-i\omega t} dt \quad (5.2)$$

Realizando la integral, evaluándola en los límites y haciendo un cambio de signo tenemos:

$$F(\omega) = \frac{1}{i\omega} [e^{i\omega\tau/2} - e^{-i\omega\tau/2}] \quad (5.3)$$

La forma exponencial de una función seno es la siguiente:

$$\text{sen}\left(\frac{w\tau}{2}\right) = \frac{e^{i\frac{w\tau}{2}} - e^{-i\frac{w\tau}{2}}}{2i} \quad (5.4)$$

Aplicando la ecuación 5.4 a la ecuación 5.3 y eliminando términos nos queda:

$$F(w) = \frac{\tau}{w} \text{sen}\left(\frac{w\tau}{2}\right) \quad (5.5)$$

Acomodando la ecuación 5.5 para expresarla en forma de una  $\text{sinc}(x)$ , tenemos:

$$F(w) = \tau * \frac{\text{sen}\left(\frac{w\tau}{2}\right)}{\frac{w\tau}{2}} = \tau * \text{sinc}\left(\frac{w\tau}{2}\right) \quad (5.6)$$

**Propiedad de desplazamiento en la frecuencia de la TDF.**- ésta propiedad se define de la siguiente manera:

$$F[f(t)e^{iw_0t}] = \int_{-\infty}^{\infty} [f(t)e^{iw_0t}]e^{-iwt}dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i(w-w_0)t}dt = F(w - w_0)$$

$$F[f(t)e^{iw_0t}] = F(w - w_0) \quad (5.7)$$

Como ya definimos la TDF de un tren de pulsos y la propiedad de desplazamiento en la frecuencia de la TDF, podemos encontrar la TDF de la señal digital modulada en ASK  $S_{ASK}(t)$ . Lo haremos de la siguiente manera:

Encontraremos la TDF de:  $S_{ASK}(t) = f(t)\cos w_p t$ , donde  $f(t)$  es la señal digital de información y  $\cos w_p t$  es la señal portadora de información.

La forma exponencial de la función coseno es la siguiente:

$$\cos w_p t = \frac{1}{2}(e^{iw_p t} + e^{-iw_p t}) \quad (5.8)$$

Realizando la TDF de  $S_{ASK}(t) = f(t)\cos w_p t$  y utilizando la ecuación 5.7 y 5.8 tenemos:

$$F[f(t)\cos w_p t] = F\left[\frac{1}{2}f(t)e^{iw_p t} + \frac{1}{2}f(t)e^{-iw_p t}\right] = F\left[\frac{1}{2}f(t)e^{iw_p t}\right] + F\left[\frac{1}{2}f(t)e^{-iw_p t}\right]$$

$$F[f(t)\cos w_p t] = \frac{1}{2}F(w - w_p) + \frac{1}{2}F(w + w_p) \quad (5.9)$$

Ya hemos encontrado la TDF del tren de pulsos, que se encuentra en la ecuación 5.6, así que solamente la sustituiremos en la ecuación 5.9, y nos queda de la siguiente manera:

$$F[S_{ASK}(t)] = \frac{1}{2} \left[ \tau * \text{sinc} \left( \frac{\tau}{2} (\omega - \omega_0) \right) + \tau * \text{sinc} \left( \frac{\tau}{2} (\omega + \omega_0) \right) \right] \quad (5.10)$$

La ecuación 5.10 es la transformada de la señal digital modulada ASK, es la función sinc, pero desplazada hasta la frecuencia de la señal portadora de información. El espectro continuo de la señal ASK es el siguiente [2]:

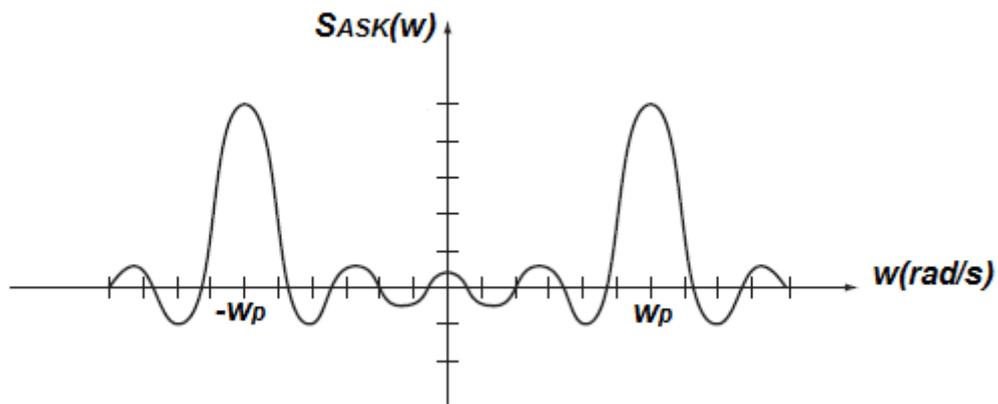


Figura 5.2.- Espectro de modulación ASK.

El espectro discreto de la señal ASK es el siguiente:

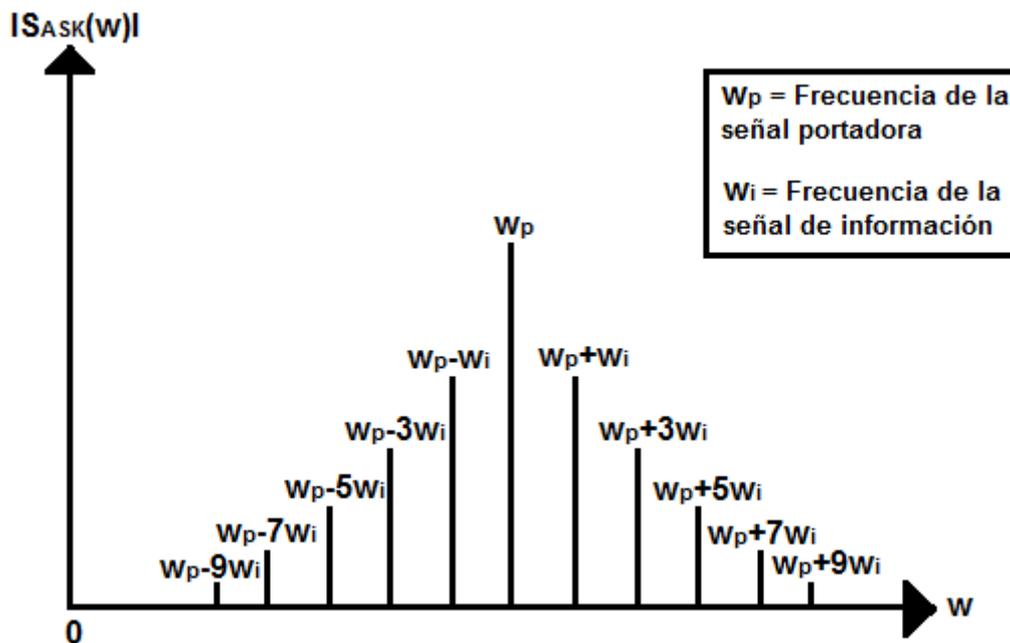


Figura 5.3.- Espectro discreto de la señal ASK.

Se observa que el armónico central está en la frecuencia de la señal portadora, el siguiente armónico a la derecha está a la frecuencia de la señal portadora más la frecuencia de la señal de información, el siguiente a la frecuencia de la señal portadora más tres veces la frecuencia de la señal de información, y así sucesivamente. El armónico se anula para números pares, y la amplitud de los armónicos decrece conforme se aumenta la frecuencia de éstos.

## **5.2 Modulación y demodulación digital ASK usando un esquema eléctrico**

Para la modulación digital ASK utilizando un esquema eléctrico se trabajó a una frecuencia de 2.4 GHz para la señal portadora y frecuencias de 15, 30, 54, 75 y 100 MHz para la señal de información. Estas elecciones de frecuencias de la señal de información son para comparar la modulación y ver a qué frecuencias es más efectiva la modulación. La demodulación digital ASK utilizando un esquema eléctrico consiste en recuperar la señal de información empleada en la modulación digital ASK, observando y comparando la demodulación en las diferentes frecuencias de la señal de información.

### **5.2.1 Sistema de modulación digital ASK**

Para este trabajo se realizaron dos sistemas diferentes de modulación digital ASK, el primer sistema de modulación consiste en modular una señal digital sin utilizar ningún filtro intermedio, mientras que el segundo sistema de modulación reside en agregar un filtro pasa banda entre el mezclador de frecuencias y el amplificador. A continuación se explicará en qué consiste cada sistema de modulación. Esto es para observar las diferencias que se obtienen cuando se le agrega un filtro pasa banda al sistema de modulación y obtener conclusiones sobre cuál de los dos sistemas realizados es más eficiente.

## Sistema de modulación digital ASK sin filtro intermedio

El sistema de modulación sin filtro intermedio se muestra en la Figura 5.4.

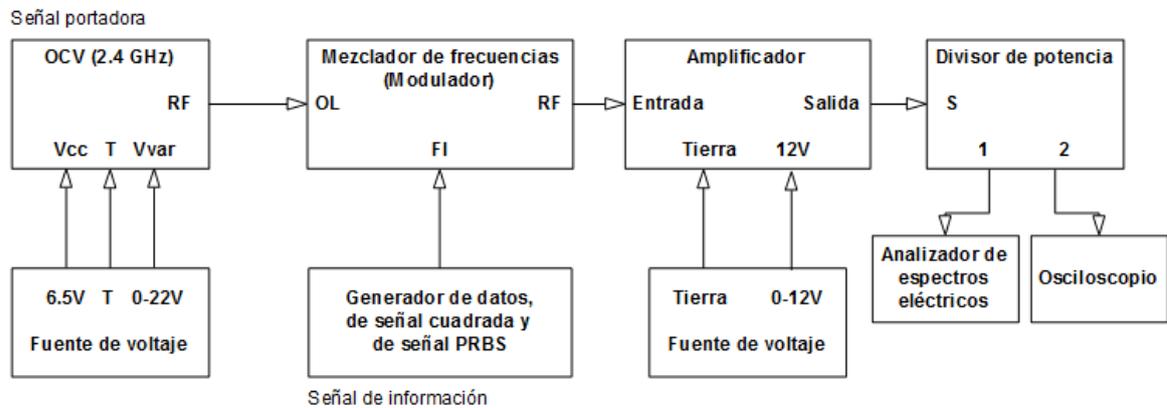


Figura 5.4.- Modulación digital ASK sin filtro intermedio.

El diagrama a bloques de la Figura 5.4 muestra una fuente de voltaje que tiene tres salidas, una variable de 0 a 6.5V, otra variable de 0 a 22V y una tierra; estas salidas se conectan a las entradas del oscilador controlado por voltaje (OCV) que son el voltaje de alimentación "Vcc" (6V máximo), la tierra "T" y el voltaje variable "Vvar" (22V máximo). La salida del OCV es una salida de radiofrecuencia (RF), ésta se conecta a la entrada del mezclador de frecuencias llamada oscilador local (OL); la otra entrada del mezclador de frecuencias llamada frecuencia intermedia (IF) está conectada a un generador de datos, el cual genera la señal de información a diferentes frecuencias. La salida del mezclador de frecuencias es una salida de RF la cual se conecta a la entrada de un amplificador de potencia. El amplificador de potencia se alimenta con 12V máximo, que provienen de una fuente de voltaje variable de 0 a 12V. La salida del amplificador se conecta a la entrada de un divisor de potencia. Finalmente las salidas del divisor de potencia se conectan a un analizador de espectros eléctricos y a un osciloscopio, esto para poder observar la modulación en el dominio del tiempo y de la frecuencia al mismo tiempo.

## Sistema de modulación digital ASK con filtro intermedio

El sistema de modulación con filtro intermedio se muestra en la Figura 5.5.

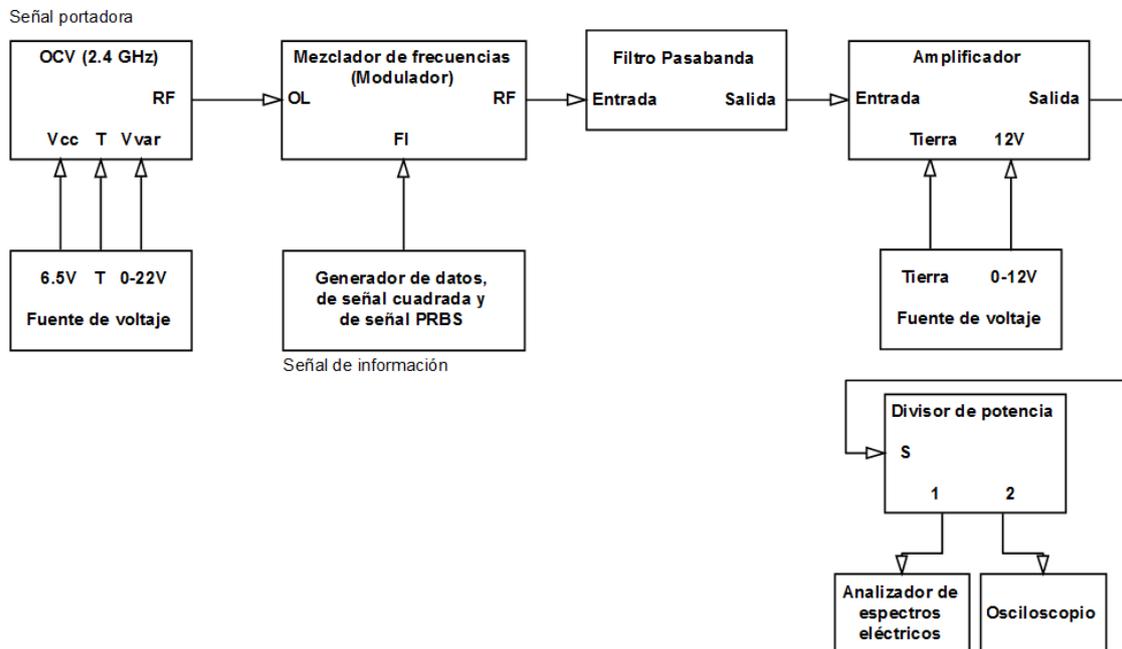


Figura 5.5.- Modulación digital ASK con filtro intermedio.

El diagrama a bloques de la figura 5.5 es similar al diagrama a bloques de la Figura 5.4, solo que en éste hay un filtro pasa banda donde la entrada está conectada a la salida del mezclador de frecuencias y la salida está conectada a la entrada del amplificador.

Para conseguir las frecuencias que se requieren en la señal portadora y de información, debe haber ciertos requisitos en los dispositivos usados para la modulación digital ASK, los cuales se mencionan a continuación:

**OCV:** El OCV usado en este trabajo tiene un rango de frecuencia de 1.3 a 2.7 GHz. Para tener una frecuencia específica se debe ajustar el  $V_{var}$  a un voltaje determinado. En este trabajo se propuso trabajar con una señal portadora de 2.4 GHz, para esto se debe tener un  $V_{var}$  ajustado a 14.15V.

**Generador de señal:** para la modulación digital ASK se utilizaron las señales de datos, cuadrada y arbitraria generadas por el generador de señal descrito en el capítulo III. Estas señales se fijaron a distintas frecuencias para la señal de información (15, 30, 54, 75 y 100 MHz). La señal de datos y la señal cuadrada tienen las siguientes características:

Señal de datos { Amplitud de 1 Volt y offset de 0.5 Volt  
Señal NRZ  
Duración de bit del 50%

Señal cuadrada { Amplitud de 1 Volt  
Offset de 0.5 Volt  
Duración de bit del 50%

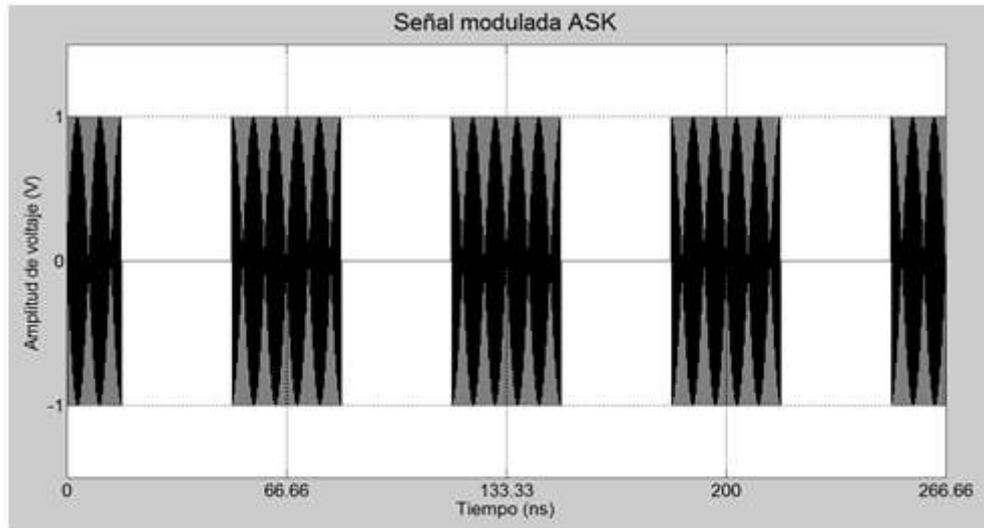
Señal arbitraria { Amplitud de 1 Volt  
Offset de 0.5 Volt

### 5.2.2 Simulación del sistema de modulación digital ASK utilizando MATLAB

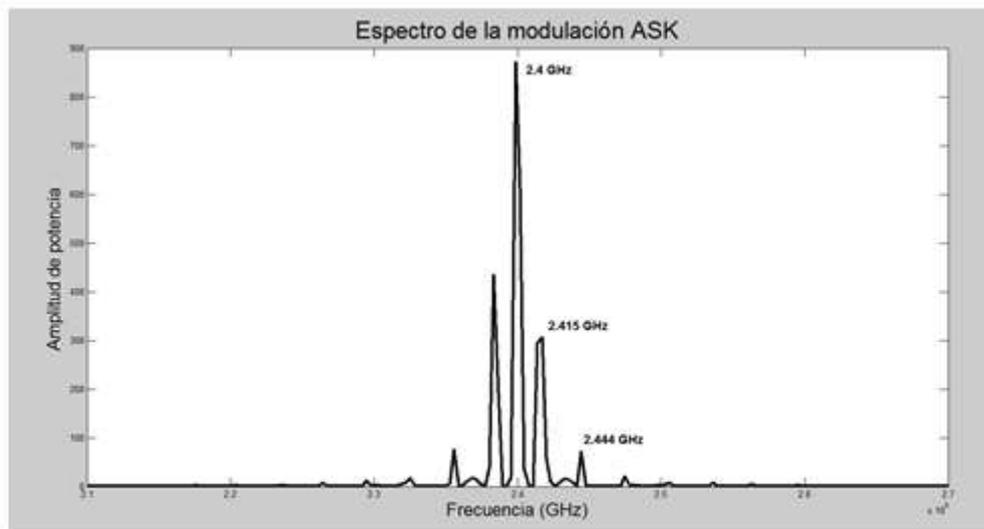
Mediante la simulación se observa el comportamiento en el tiempo y en la frecuencia de la modulación digital ASK utilizando las frecuencias mencionadas anteriormente para la señal portadora y de información. La simulación es un caso ideal, donde podemos observar una forma previa de cómo tiene que ser la modulación en la práctica, aunque no siempre la señal simulada coincide perfectamente con la obtenida con el arreglo experimental, debido a factores externos que afectan los dispositivos que componen el arreglo experimental, como pueden ser la temperatura ambiente en la que se trabaja y la pérdida que hay en los cables que conectan los dispositivos. Sin embargo, el armónico central de los espectros obtenidos prácticamente tiene una desviación de 20MHz en comparación con los espectros simulados, que tienen su armónico central en 2.4GHz.

A continuación se presentarán las simulaciones realizadas mediante MATLAB de la modulación digital ASK.

Modulación digital ASK con 2.4 GHz de señal portadora y 15 MHz de señal de información



(a)



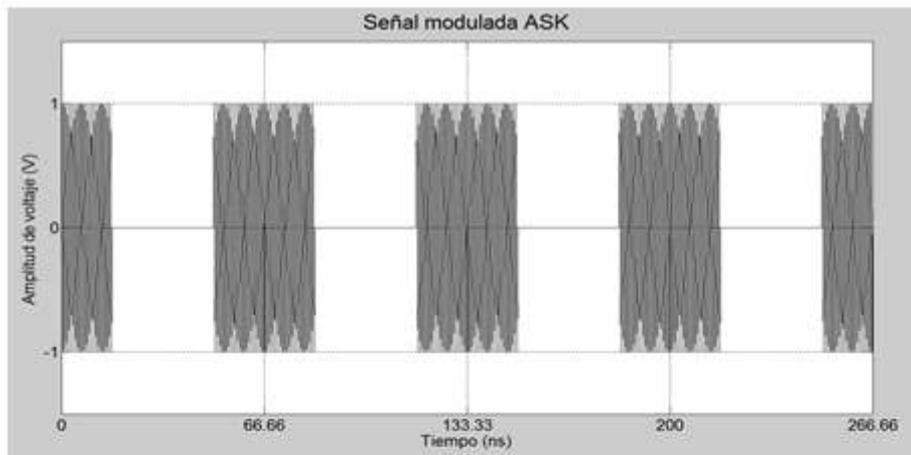
(b)

Figura 5.6.- (a) Señal modulada ASK a 15 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK.

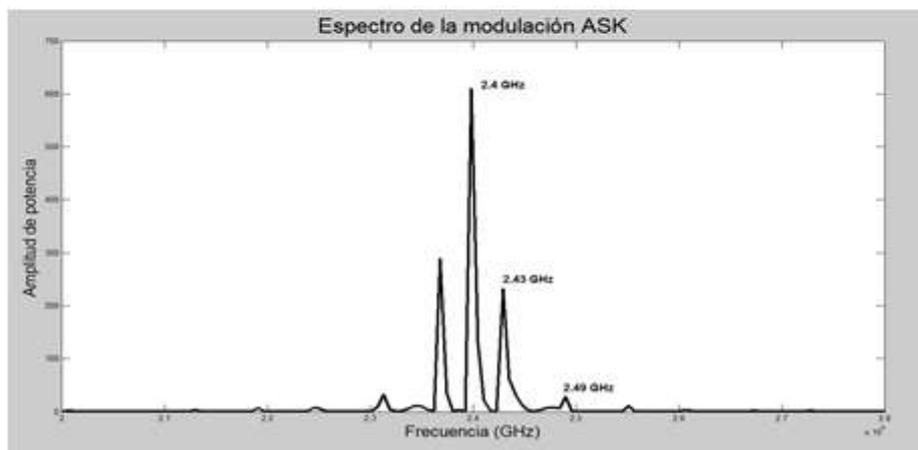
La Figura 5.6 (a) muestra claramente la modulación digital ASK, donde se observa la señal portadora situada dentro de la señal digital cuando ésta vale uno, y se observa señal nula cuando la señal digital vale cero. En este caso la señal portadora se observa comprimida, debido a que se está trabajando con 15 MHz en la señal digital, esto hace que contenga mayor capacidad de periodos de señal portadora que en las siguientes frecuencias; por esto, en las siguientes gráficas se notará un poco más la señal portadora. En la Figura 5.6 (b) se observa el espectro, que se comprueba así:

- Armónico central: 2.4GHz
- Primer armónico:  $2.4\text{GHz} + 15\text{MHz} = 2.415\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.4\text{GHz} + 3 * 15\text{MHz} = 2.445\text{GHz}$

Modulación digital ASK con 2.4 GHz de señal portadora y 30 MHz de señal de información



(a)



(b)

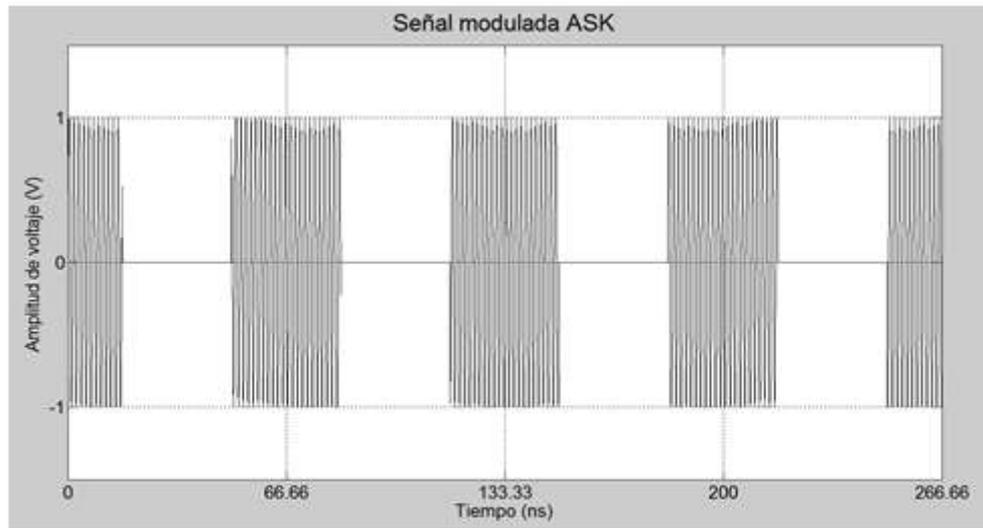
Figura 5.7.- (a) Señal modulada ASK a 30 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK.

En la Figura 5.7 (a) se observa la señal portadora un poco más descomprimida que en la Figura 5.6 (a), debido a que contiene menos periodos de señal portadora. El espectro de la Figura 5.7 (b) se analizada así:

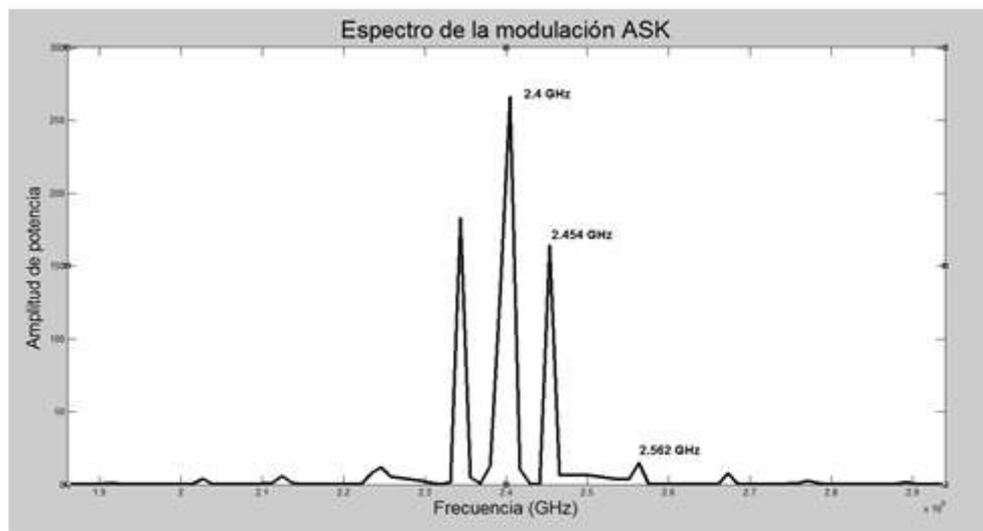
- Armónico central: 2.4GHz
- Primer armónico:  $2.4\text{GHz} + 30\text{MHz} = 2.43\text{GHz}$

- Segundo armónico:  $2.4\text{GHz} + 3 * 30\text{MHz} = 2.49\text{GHz}$

Modulación digital ASK con 2.4 GHz de señal portadora y 54 MHz de señal de información



(a)



(b)

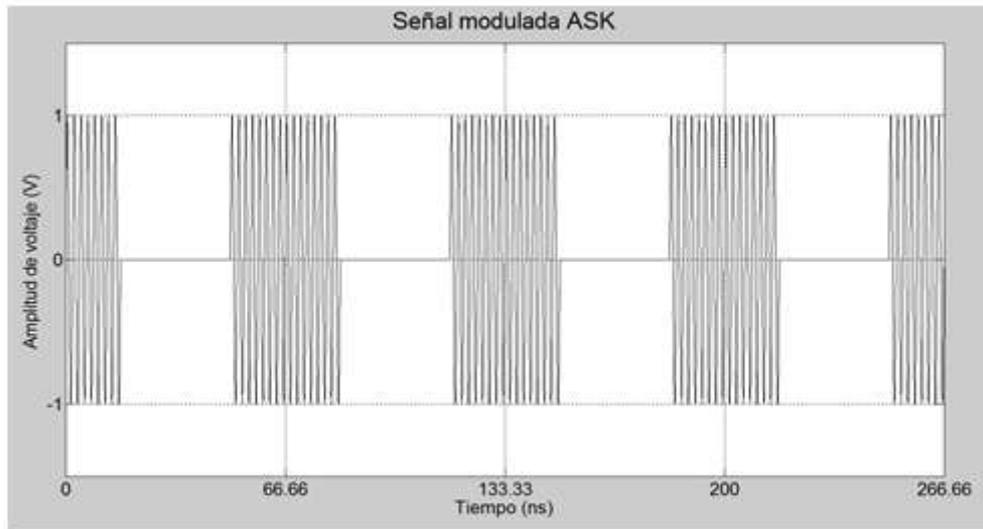
Figura 5.8.- (a) Señal modulada ASK a 54 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK.

En la Figura 5.8 (a) se aprecia más claramente la señal portadora dentro de la señal digital cuando ésta vale uno debido a que la frecuencia de la señal digital aumentó a 54 MHz. El análisis del espectro de la Figura 5.8 (b) es el siguiente:

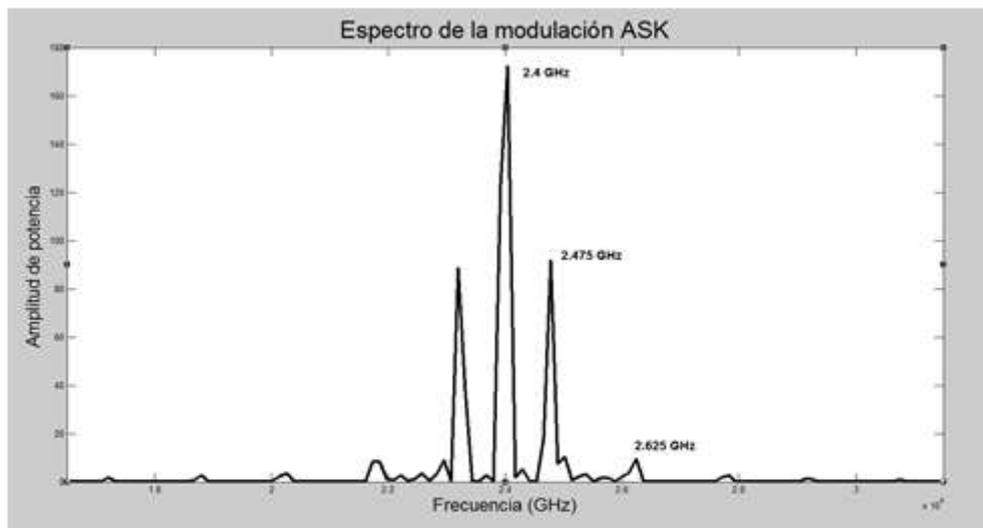
- Armónico central: 2.4GHz
- Primer armónico:  $2.4\text{GHz} + 54\text{MHz} = 2.454\text{GHz}$

- Segundo armónico:  $2.4\text{GHz} + 3 * 54\text{MHz} = 2.562\text{GHz}$

Modulación digital ASK con 2.4 GHz de señal portadora y 75 MHz de señal de información



(a)



(b)

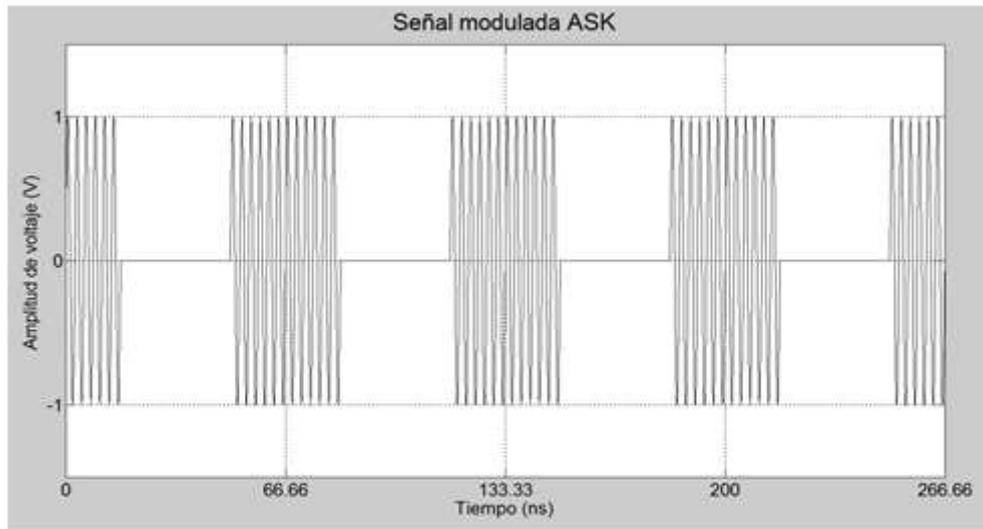
Figura 5.9.- (a) Señal modulada ASK a 75 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK.

La Figura 5.9 (a) muestra la señal modulada ASK a 75 MHz, por lo que la señal portadora se observa con más claridad. El análisis del espectro de la Figura 5.9 (b) es el siguiente:

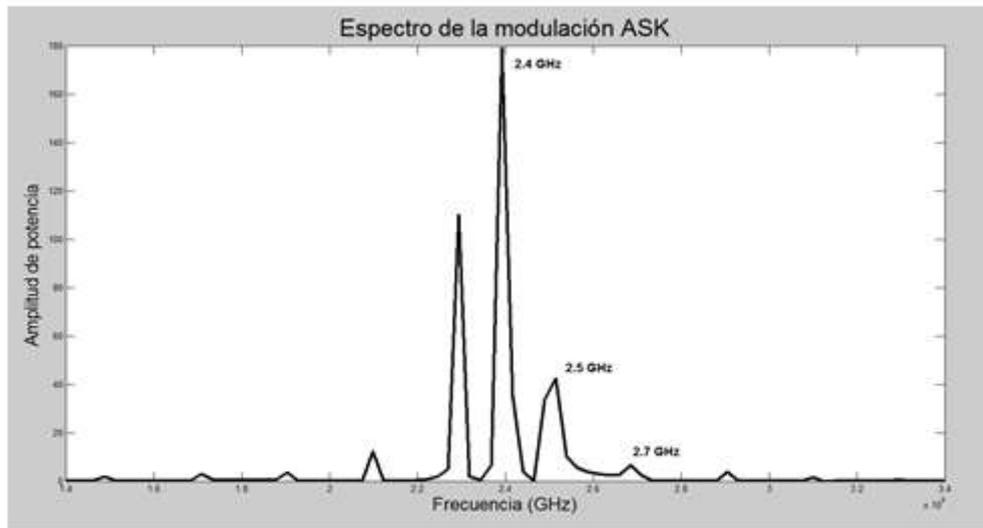
- Armónico central: 2.4GHz
- Primer armónico:  $2.4\text{GHz} + 75\text{MHz} = 2.475\text{GHz}$

- Segundo armónico:  $2.4\text{GHz} + 3 * 75\text{MHz} = 2.625\text{GHz}$

Modulación digital ASK con 2.4 GHz de señal portadora y 100 MHz de señal de información



(a)



(b)

Figura 5.10.- (a) Señal modulada ASK a 100 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK.

En la Figura 5.10 (a) se muestra la señal modulada ASK a 100 MHz en la señal digital, por lo que se observa con mejor claridad la señal portadora que las figuras anteriores. El análisis del espectro de la Figura 5.10 (b) es el siguiente:

- Armónico central: 2.4GHz
- Primer armónico:  $2.4\text{GHz} + 100\text{MHz} = 2.5\text{GHz}$

- Segundo armónico:  $2.4\text{GHz} + 3 * 100\text{MHz} = 2.7\text{GHz}$

Este análisis de la simulación de la señal modulada ASK es para tener una referencia de lo que debe pasar experimentalmente con la señal en el dominio del tiempo y de la frecuencia. El caso experimental es el que se estudiará a continuación.

### 5.2.3 Estudio en el dominio del tiempo y la frecuencia de las pruebas obtenidas experimentalmente de la modulación digital ASK

Los parámetros de la expresión de la señal digital modulada en amplitud son los siguientes:

$$\text{Señal portadora de información } (S_p) = \begin{cases} \text{Frecuencia } (F_p) = 2.4 \text{ GHz} \\ \text{Tipo de la señal: datos, cuadrada y arbitraria (PRBS)} \\ \text{Amplitud } (A_p) = 0.6\text{V}, 3.2 \text{ dBm} \end{cases}$$

$$\text{Señal digital de información } (S_i) = \begin{cases} \text{Frecuencias } (F_i) = 15, 30, 54, 75 \text{ y } 100 \text{ MHz} \\ \text{Amplitud } (A_i) = 1\text{V}, 5.5 \text{ dBm} \\ \text{Offset} = 500 \text{ mV} \end{cases}$$

Entonces, la expresión de la señal digital modulada en amplitud, al utilizar la ecuación 2.2 del capítulo 2 y usando los valores descritos anteriormente, resulta en:

$$S_{\text{MOD-ASK}} = 0.6\text{V} * \cos(2\pi * 2.4 * 10^9 * t) \left(\frac{r}{s}\right) \quad (5.11)$$

Añadiendo un amplificador a la salida de la modulación, el cual se ajustó para tener una amplificación de 10 dBm o 1.4 V como se muestra en la Figura 5.4, la ecuación 5.11 queda de la siguiente manera:

$$S_{\text{MOD-ASK}} = 2\text{V} * \cos(2\pi * 2.4 * 10^9 * t) \left(\frac{r}{s}\right) \quad (5.12)$$

Este amplificador se añadió para obtener la amplitud requerida por el circuito de demodulación.

En las pruebas experimentales para la modulación digital ASK, se utilizaron los tipos de señal cuadrada, de datos y arbitraria (PRBS) disponibles en el generador de señal.

A continuación se presentan los resultados obtenidos experimentalmente de los diagramas a bloques de las Figuras 5.4 y 5.5.

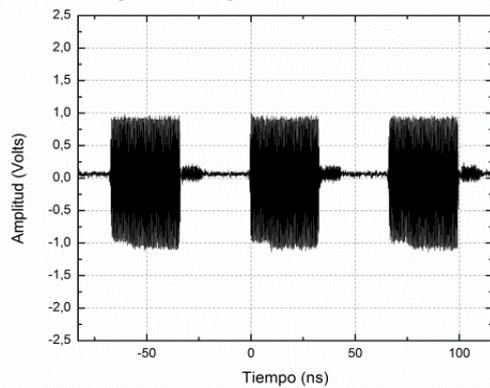
Esquema experimental para la modulación digital ASK sin filtro intermedio (Figura 5.4)



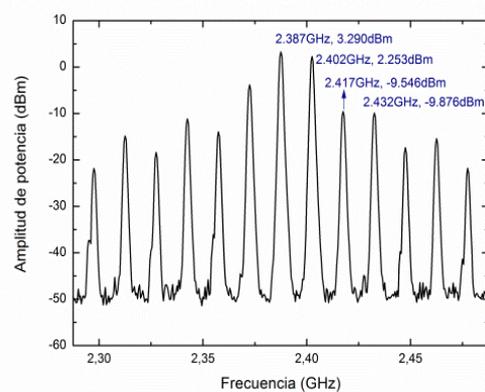
Figura 5.11.- Arreglo experimental para la modulación digital ASK sin filtro intermedio.

Modulación digital ASK utilizando un tipo de señal cuadrada en la señal de información

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 15Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

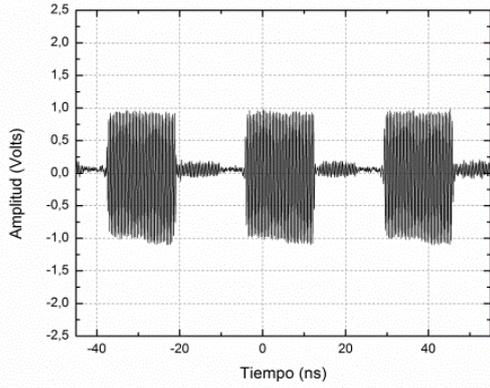


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 15Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

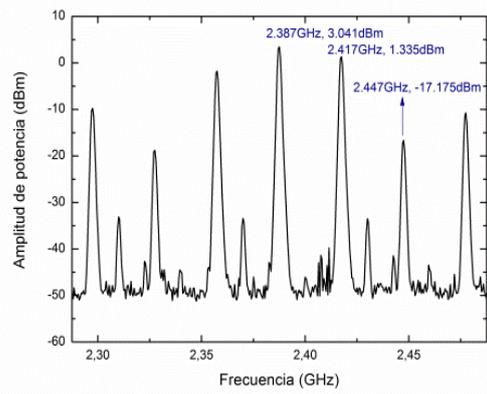


(a)

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 30Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

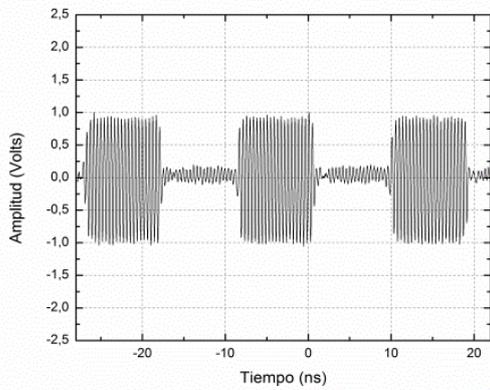


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 30Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

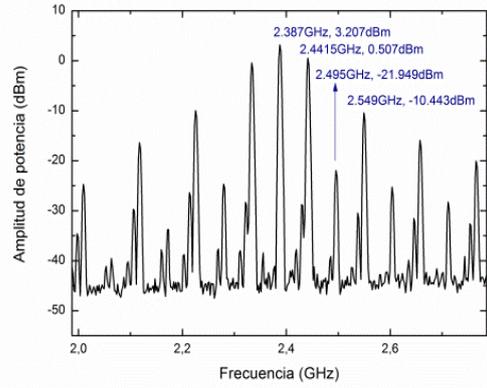


(b)

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 54Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

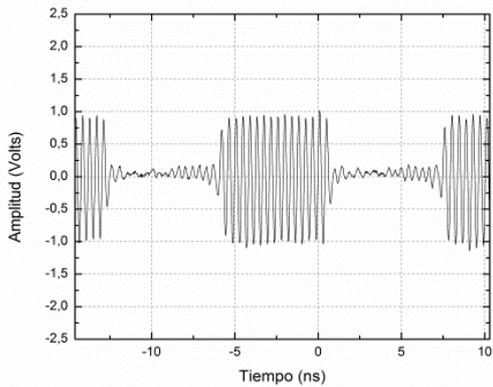


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 54Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

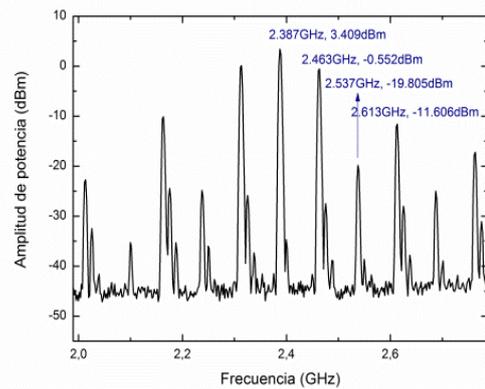


(c)

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 75Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

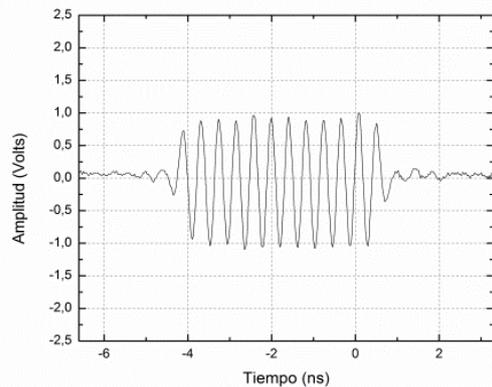


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 75Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

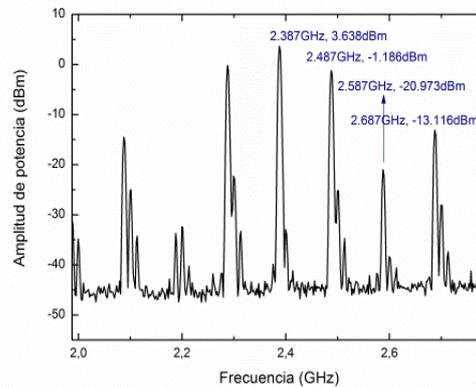


(d)

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 100Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)



Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 100Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)



(e)

Figura 5.12.- Modulación digital ASK utilizando señal cuadrada a diferentes frecuencias para la señal de información. (Izquierda), dominio del tiempo, (derecha), dominio de la frecuencia.

Las figuras de la izquierda representan la modulación digital ASK, y las figuras de la derecha representan el espectro de la señal modulada ASK. La amplitud de las señales moduladas ASK va de -1V a 1V. Se observa que las gráficas de modulación se van expandiendo. Esto se debe a que en la Figura 5.12 (a) se trabajó a 15 MHz de frecuencia para la señal digital, por lo que contiene más periodos de señal portadora que en las demás graficas de modulación. En la Figura 5.12 (b) se trabajó a 30 MHz de señal digital, en la Figura 5.12 (c) se trabajó a 54 MHz de señal digital, en la Figura 5.12 (d) se trabajó a 75 MHz de señal digital y en la Figura 5.12 (e) se trabajó a 100 MHz de señal digital. El análisis de los espectros de cada señal modulada se describe a continuación:

Para la Figura 5.12 (a):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + 15\text{MHz} = 2.402\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * 15\text{MHz} = 2.432\text{GHz}$

Para la Figura 5.12 (b):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + 30\text{MHz} = 2.417\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * 30\text{MHz} = 2.477\text{GHz}$

Para la Figura 5.12 (c):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + 54\text{MHz} = 2.441\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * 54\text{MHz} = 2.549\text{GHz}$

Para la Figura 5.12 (d):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + 75\text{MHz} = 2.462\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * 75\text{MHz} = 2.612\text{GHz}$

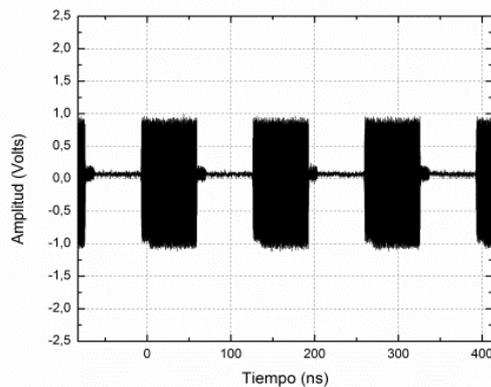
Para la Figura 5.12 (e):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + 100\text{MHz} = 2.487\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * 100\text{MHz} = 2.687\text{GHz}$

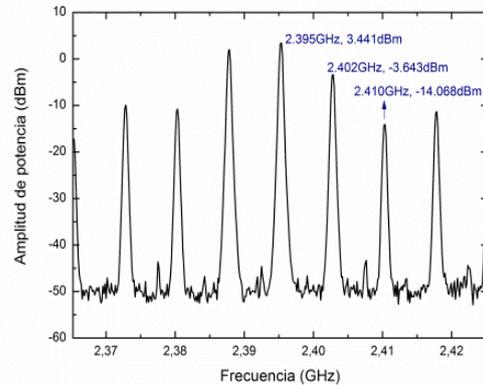
La potencia de los armónicos disminuye gradualmente conforme se alejan de la frecuencia central (2.4 GHz). El armónico central presenta una amplitud de potencia de 3.2dBm, y ésta disminuye en los siguientes armónicos.

### Modulación digital ASK utilizando un tipo de señal de datos en la señal de información

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 15Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

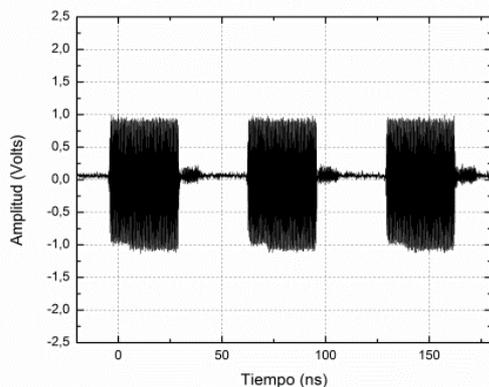


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 15Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

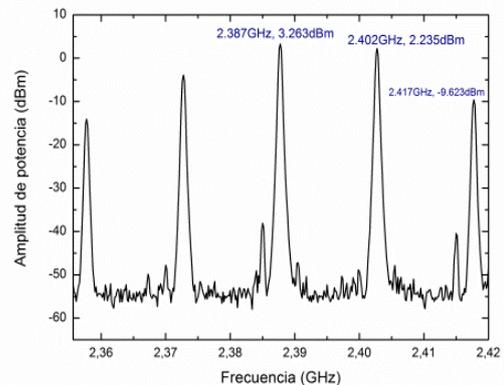


(a)

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 30Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

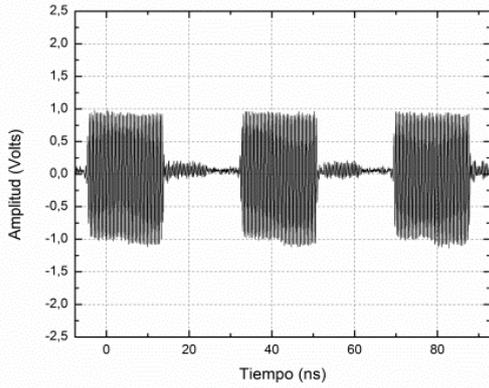


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 30Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

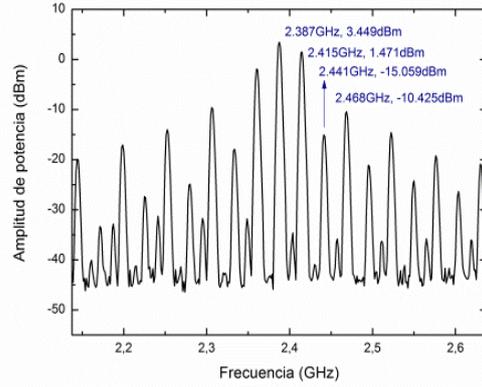


(b)

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 54Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

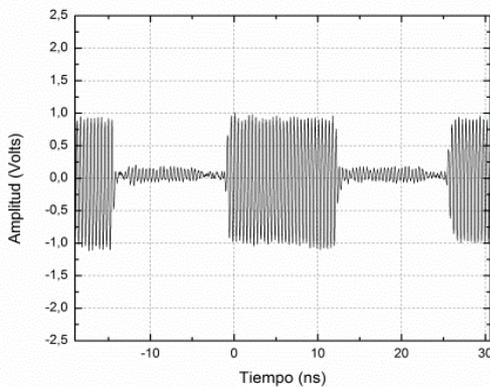


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 54Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

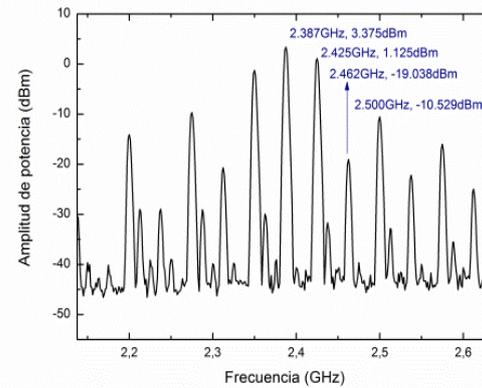


(c)

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 75Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

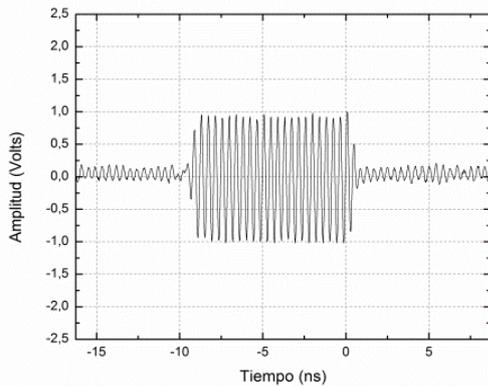


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 75Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

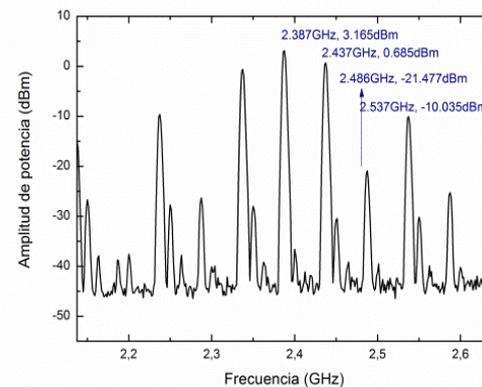


(d)

Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 100Mbps con señal de datos (Amp. incluido)



Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 100Mbps con señal de datos (Amp. incluido)



(e)

Figura 5.13.- Modulación digital ASK utilizando señal de datos a diferentes frecuencias para la señal de información. (Izquierda), dominio del tiempo, (derecha), dominio de la frecuencia.

La Figura 5.13 muestra la modulación digital ASK utilizando una señal de datos como señal de información. En las gráficas de modulación en el dominio del tiempo (izquierda) se puede observar que la señal portadora intenta pasar en el nivel cero de

la señal de información, esto se debe a que en el proceso de modulación, no se logra filtrar completamente la señal portadora en el nivel cero de la señal digital. También se observa que a medida que se aumenta la frecuencia de información, la señal modulada ASK se expande cada vez más. En la Figura 5.13 (a) se trabajó a 15MHz en la señal digital, en la 5.13 (b) a 30MHz, en la 5.13 (c) a 54MHz, en la 5.13 (d) a 75MHz y en la 5.13 (e) a 100MHz, todas con señal portadora de 2.4GHz. En este formato de señal de datos digitales, la frecuencia captada por el analizador de espectros y el osciloscopio es la mitad de la frecuencia transmitida, debido a problemas de detección de armónicos centrales en los equipos de medición. El análisis de los espectros de cada señal modulada ASK (derecha) se describe a continuación:

Para la Figura 5.13 (a):

- Armónico central: 2.395GHz
- Primer armónico:  $2.395\text{GHz} + \left(\frac{15}{2}\right)\text{MHz} = 2.402\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.395\text{GHz} + 3 * \left(\frac{15}{2}\right)\text{MHz} = 2.417\text{GHz}$

Para la Figura 5.13 (b):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + \left(\frac{30}{2}\right)\text{MHz} = 2.402\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * \left(\frac{30}{2}\right)\text{MHz} = 2.432\text{GHz}$

Para la Figura 5.13 (c):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + \left(\frac{54}{2}\right)\text{MHz} = 2.414\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * \left(\frac{54}{2}\right)\text{MHz} = 2.468\text{GHz}$

Para la Figura 5.13 (d):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + \left(\frac{75}{2}\right)\text{MHz} = 2.424\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * \left(\frac{75}{2}\right)\text{MHz} = 2.499\text{GHz}$

Para la Figura 5.13 (e):

- Armónico central: 2.387GHz
- Primer armónico:  $2.387\text{GHz} + \left(\frac{100}{2}\right)\text{MHz} = 2.437\text{GHz}$
- Segundo armónico:  $2.387\text{GHz} + 3 * \left(\frac{100}{2}\right)\text{MHz} = 2.537\text{GHz}$

La potencia de los armónicos va decayendo conforme se aumenta la frecuencia. El armónico central y los primero dos armónicos componen mayormente la forma de onda de la señal modulada. El armónico central tiene una amplitud de 3.2dBm y ésta decae en los siguientes armónicos como se muestra en la Figura 5.13, parte derecha.

Modulación digital ASK utilizando un tipo de señal arbitraria (PRBS) en la señal de información

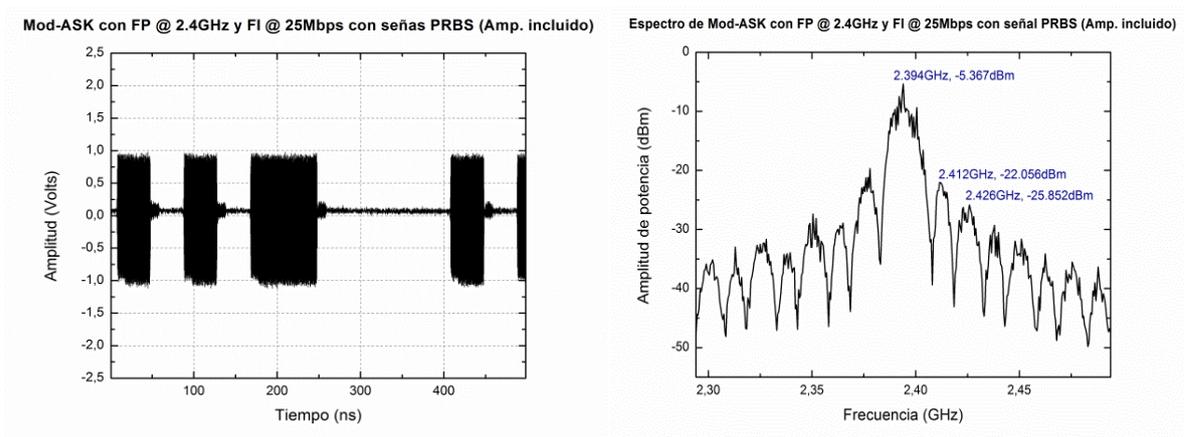


Figura 5.14.- Modulación digital ASK utilizando señal arbitraria (PRBS) a diferentes frecuencias para la señal de información. (Izquierda), dominio del tiempo, (derecha), dominio de la frecuencia.

La Figura 5.14 muestra la modulación digital ASK utilizando una señal PRBS a 25MHz como señal de información y señal portadora con frecuencia de 2.4GHz. A la izquierda se muestra la señal modulada en el dominio del tiempo, que presenta una amplitud de 2V, y a la derecha se muestra la señal en el dominio de la frecuencia. Se eligió 25MHz como la frecuencia de señal de información debido a que a esta frecuencia se obtuvo el mejor espectro en cuanto a simetría entre los armónicos. El espectro es diferente a los demás mostrados anteriormente, debido a que en este caso se trabaja con una señal no continua. El armónico central se sitúa en 2.394GHz con amplitud de -5.36dBm, el siguiente armónico está a 2.412GHz con -22.056dBm, y el tercero está a 2.426GHz con amplitud de -25.85dbm.

La razón de que los armónicos centrales de los espectros presentados en las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 no estén situados a 2.4GHz, es por el rango de frecuencias que permite observar la ventana del analizador de espectros, si se modifica el rango también se modifica la frecuencia central.

Esquema experimental para la modulación digital ASK con filtro intermedio (Figura 5.5)

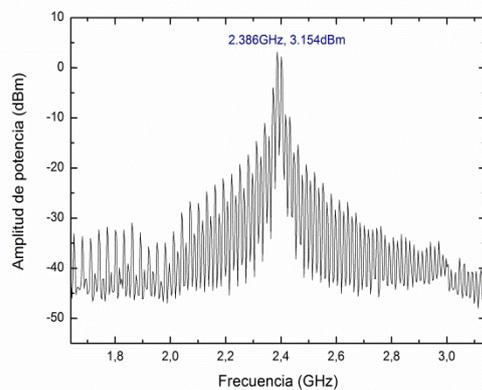


Figura 5.15.- Arreglo experimental para la modulación digital ASK con filtro intermedio.

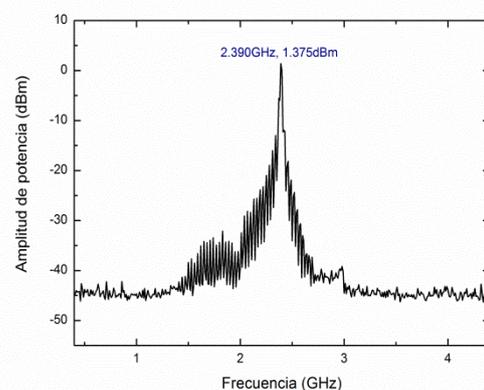
Se presenta una comparación de los espectros de la señal modulada ASK sin filtro intermedio y con filtro intermedio trabajando a frecuencias de 15, 30, 54, 75 y 100 MHz en la señal de información y 2.4 GHz en la señal portadora.

Espectros de modulación digital ASK utilizando señal de información cuadrada

Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 15Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

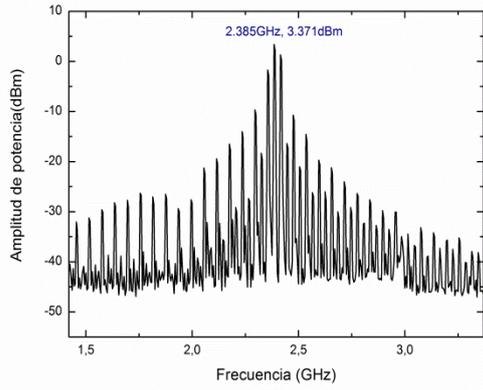


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 15Mbps con señal cuadrada (Filtro pasabanda y Amp.)

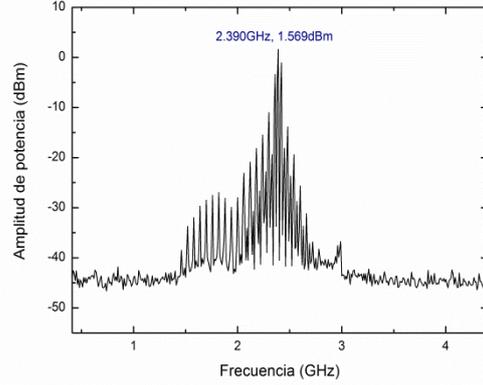


(a)

Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FP @ 30Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

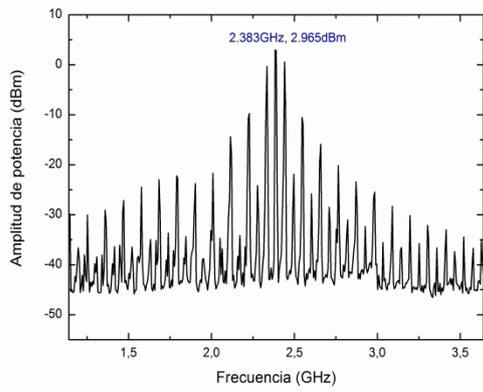


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 30 Mbps con señal cuadrada (Filtro pasabanda y Amp.)

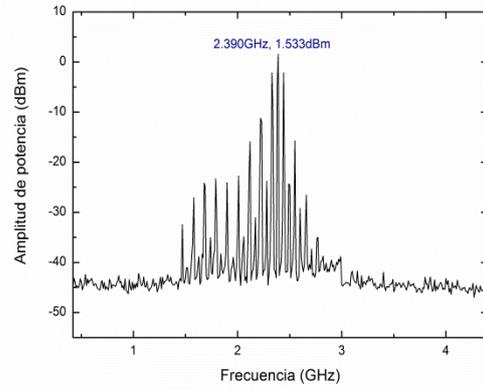


(b)

Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FP @ 54Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

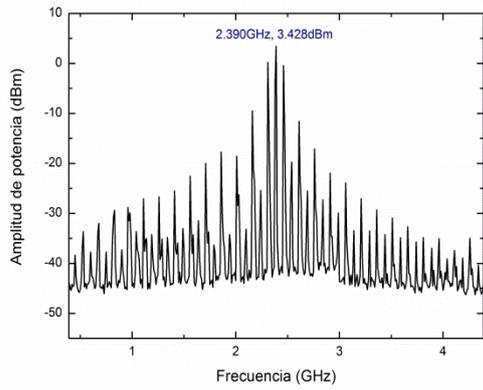


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 54 Mbps con señal cuadrada (Filtro pasabanda y Amp.)

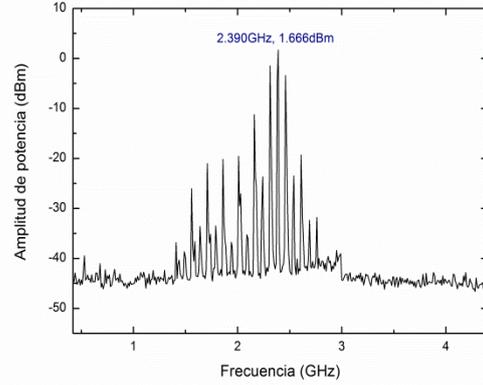


(c)

Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FP @ 75Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)

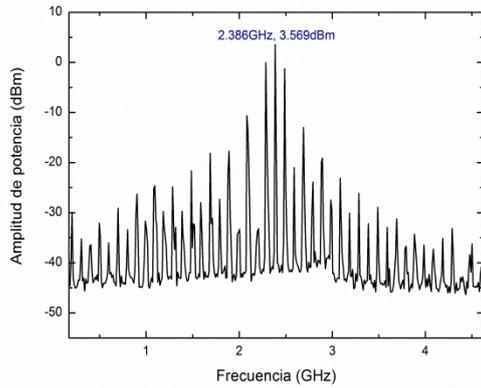


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 75 Mbps con señal cuadrada (Filtro pasabanda y Amp.)

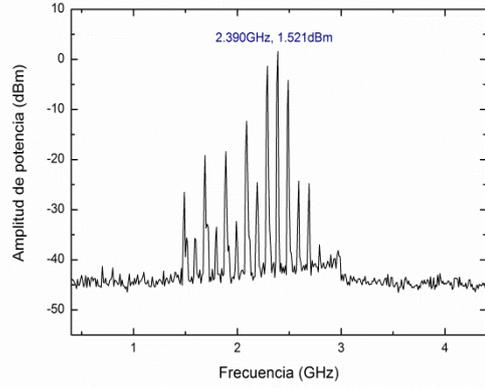


(d)

Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FP @ 100Mbps con señal cuadrada (Amp. incluido)



Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 100 Mbps con señal cuadrada (Filtro pasabanda y Amp.)



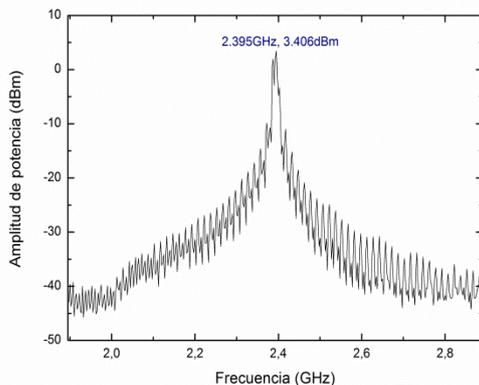
(e)

Figura 5.16.- (Izquierda) espectros de modulación ASK sin filtro intermedio, (derecha) espectros de modulación ASK con filtro intermedio.

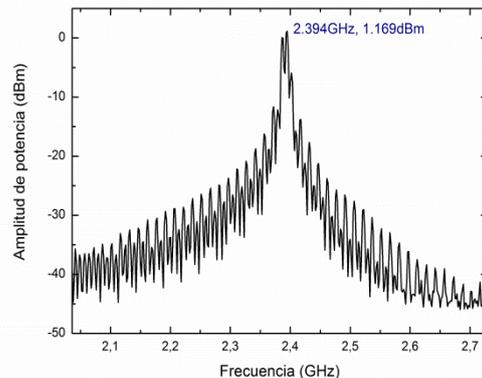
La Figura 5.16 muestra una comparación de la señal modulada ASK, a la izquierda sin filtro intermedio y a la derecha, con filtro intermedio. Las Figuras 5.16 (a, b, c, d y e) de la izquierda tienen el armónico central en 2.38GHz con una amplitud de potencia promedio de 3.2dBm, y las Figuras 5.16 (a, b, c, d y e) de la derecha tienen el armónico central en 2.39GHz con una amplitud de potencia promedio de 1.5dBm. El filtro pasa-banda tiene una frecuencia central de 2GHz, con un rango de 1720MHz a 2270MHz, es un componente pasivo que absorbe 1.8dBm de potencia. Al observar los espectros, se nota claramente la exclusión de los armónicos que no pasan por el filtro pasa banda, pero hay una concentración de armónicos en la parte izquierda de los espectros de la Figura 5.16 (parte derecha), debido a que nosotros trabajamos a 2.4 GHz y la frecuencia central del filtro pasa banda es 2GHz. A pesar de que el filtro funciona perfectamente, no se adecua a la frecuencia de 2.4GHz, por lo que no es conveniente utilizarlo en este trabajo.

### Espectros de modulación digital ASK utilizando señal de información de datos

Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FP @ 15Mbps con señal de datos (Amp. incluido)

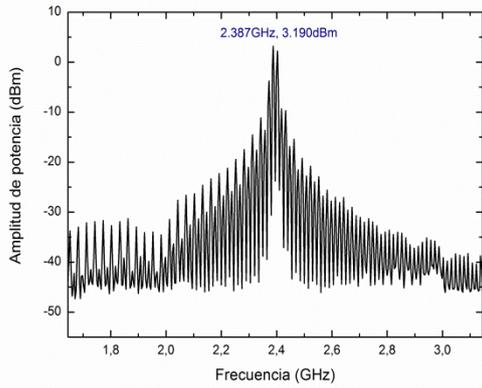


Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 15 Mbps con señal de datos (Filtro pasabanda y Amp.)

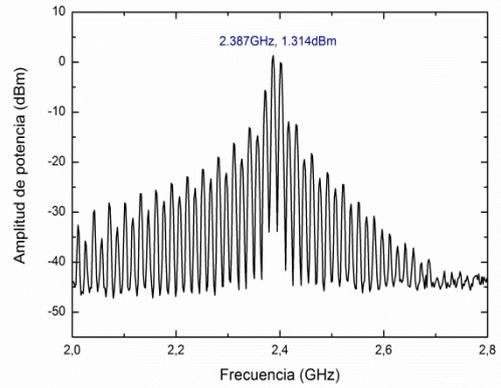


(a)

**Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FP @ 30Mbps con señal de datos (Amp. incluido)**

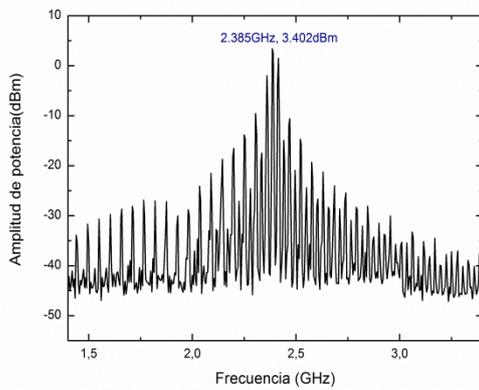


**Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 30 Mbps con señal de datos (Filtro pasabanda y Amp.)**

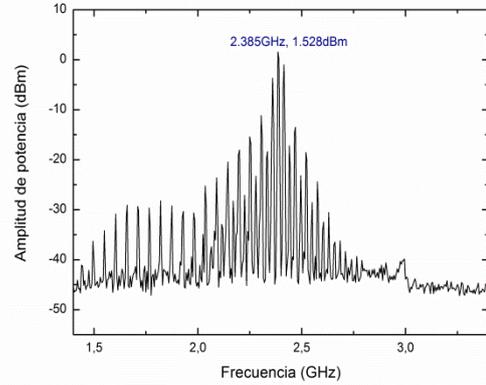


(b)

**Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FP @ 54Mbps con señal de datos (Amp. incluido)**

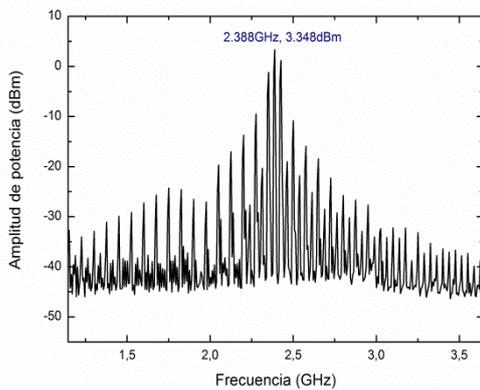


**Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 54 Mbps con señal de datos (Filtro pasabanda y Amp.)**

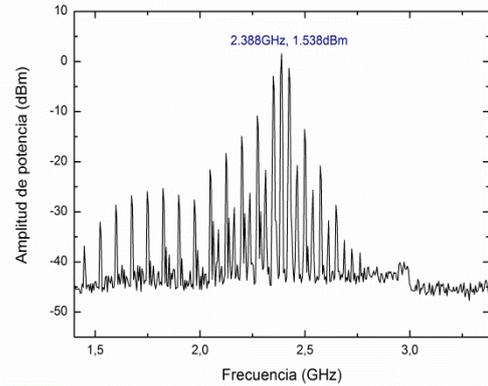


(c)

**Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FP @ 75Mbps con señal de datos (Amp. inclui**

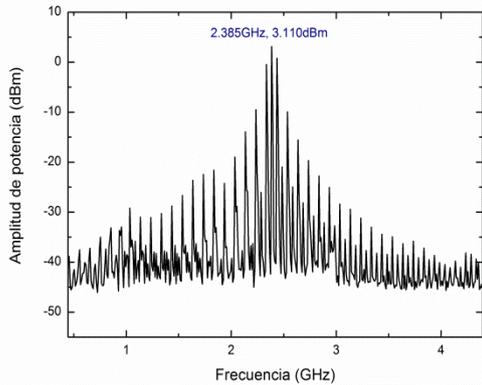


**Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 75 Mbps con señal de datos (Filtro pasabanda y Amp.)**

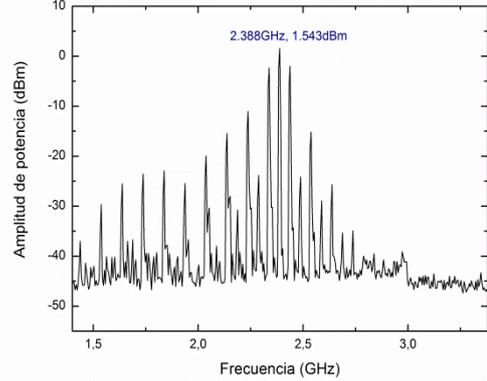


(d)

Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 100Mbps con señal de datos (Amp. incluido)



Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 100 Mbps con señal de datos (Filtro pasabanda y Amp.)



(e)

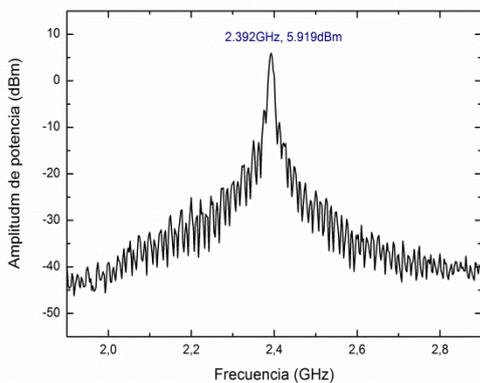
Figura 5.17.- (Izquierda) espectros de modulación ASK sin filtro intermedio, (derecha) espectros de modulación ASK con filtro intermedio.

En la Figura 5.17 se muestra la comparación de hacer la modulación digital ASK sin filtro (parte izquierda) y con filtro (parte derecha). Estos espectros presentan las mismas características que los espectros de la Figura 5.16. Se observa la funcionalidad del filtro pasa banda en la parte derecha de la figura, pero los espectros no presentan simetría debido a que la frecuencia de operación del filtro no coincide con la que se utilizó en este trabajo.

En la Figura 5.18 parte izquierda se ilustra la modulación ASK sin filtro pasa-banda y en la parte derecha con filtro pasa-banda.

### Espectros de modulación digital ASK utilizando señal de información PRBS

Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4GHz y FI @ 25Mbps con señal PRBS (Amp. incluido)



Espectro de Mod-ASK con FP @ 2.4 GHz y FI @ 25 Mbps con señal PRBS (Filtro pasabanda y Amp.)

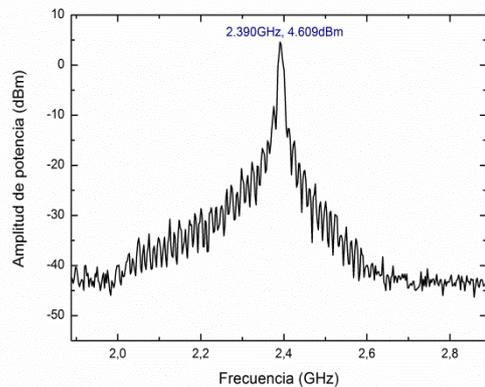


Figura 5.18.- (Izquierda) espectro de modulación ASK sin filtro intermedio, (derecha) espectro de modulación ASK con filtro intermedio.

## 5.2.4 Sistema de demodulación digital ASK

El diagrama de bloques del sistema de demodulación digital ASK es el mostrado en la Figura 5.19.

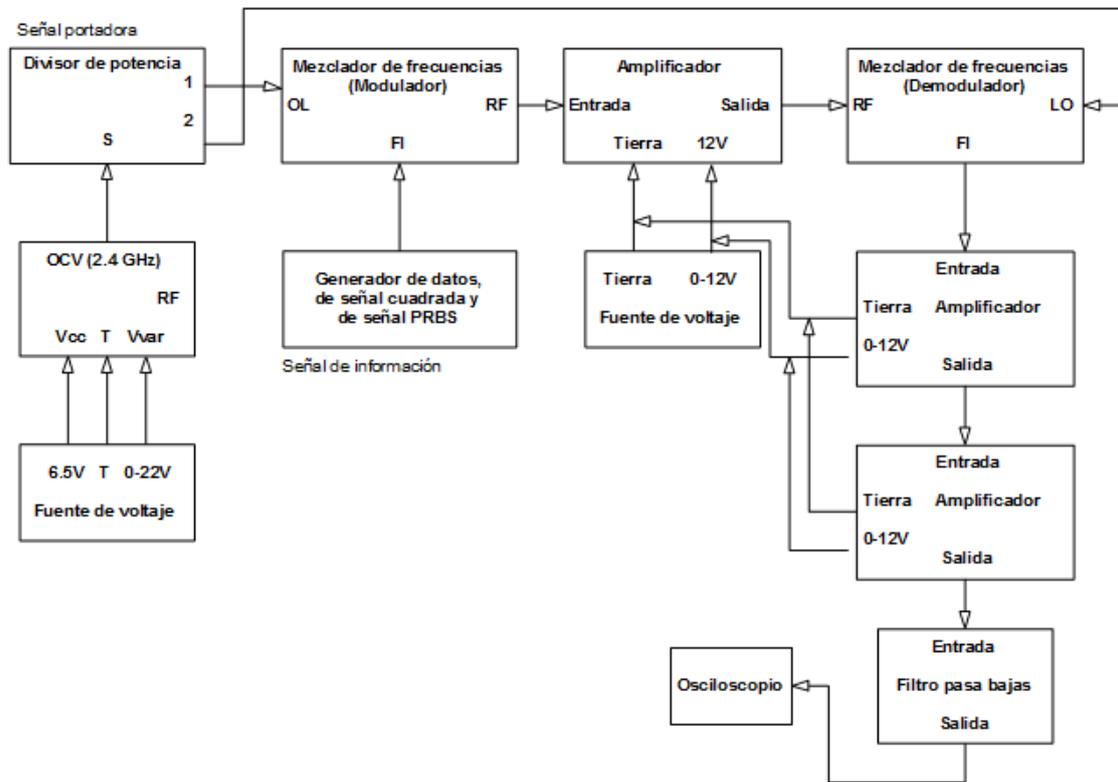


Figura 5.19.- Diagrama de bloques de sistema de demodulación ASK utilizando componentes eléctricos.

En el diagrama de la Figura 5.19, se muestra la modulación y demodulación digital ASK. La etapa de demodulación comienza conectando la salida de la etapa de modulación (que es donde se encuentra el amplificador que precede al modulador) a la entrada de RF del demodulador, después la entrada OL del demodulador se conecta a un divisor de potencia que contiene la señal portadora. La salida del demodulador (FI) va a la entrada de un amplificador, la salida de éste amplificador va a la entrada de otro amplificador, después la salida de éste amplificador se conecta a un filtro pasa bajas. Finalmente, la salida de éste filtro se conecta al osciloscopio que permite observar la señal digital demodulada.

### 5.2.5 Estudio en el dominio del tiempo y la frecuencia de las pruebas obtenidas experimentalmente de la demodulación digital ASK

En esta parte se muestran los resultados de la demodulación de la señal digital ASK. La demodulación consiste en recuperar la información transmitida con la calidad necesaria para poder recibir la información. La Figura 5.20 ilustra el arreglo experimental utilizado para la demodulación de la señal digital ASK.

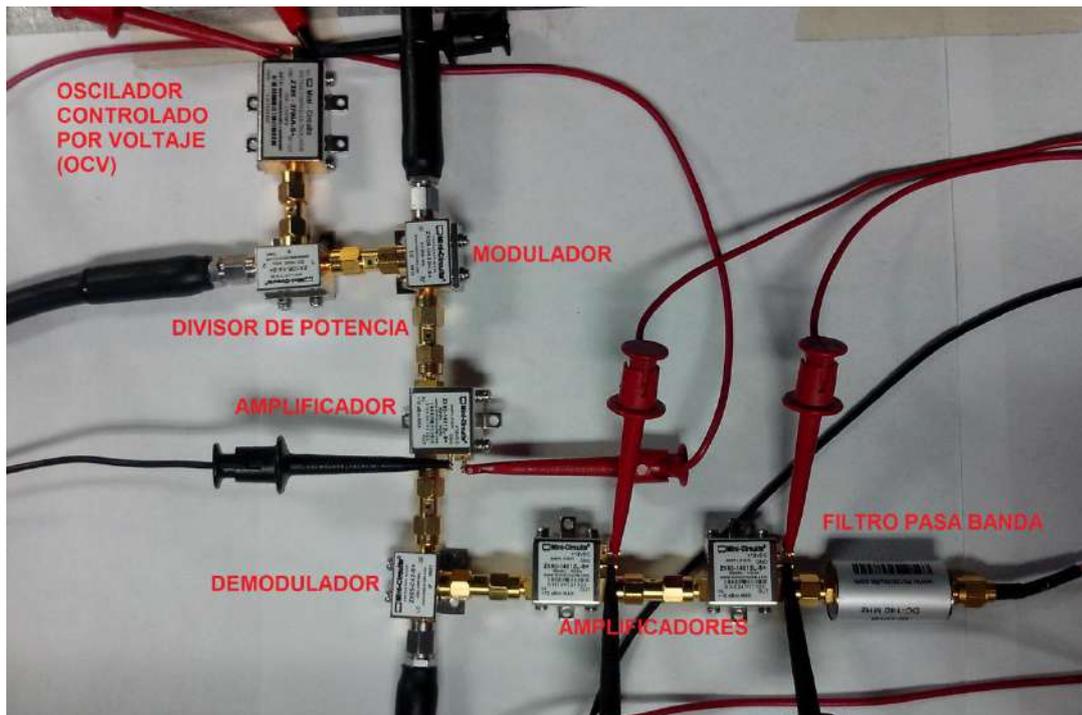


Figura 5.20.- Arreglo experimental para la demodulación de la señal ASK.

A continuación se presentan las señales digitales (forma cuadrada, de datos y PRBS) demoduladas con frecuencias de 15, 30, 54, 75 y 100 MHz.

## Demodulación digital ASK utilizando un tipo de señal cuadrada en la señal de información

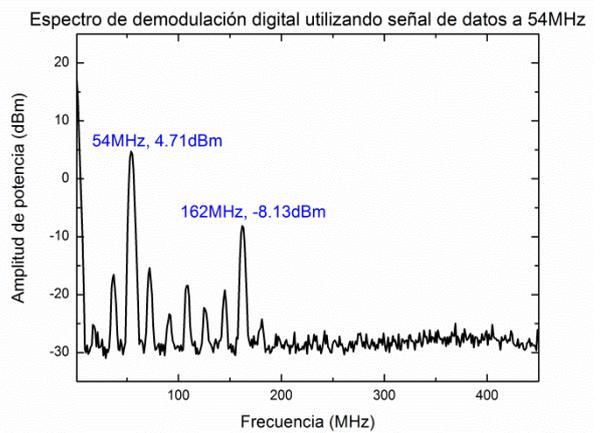
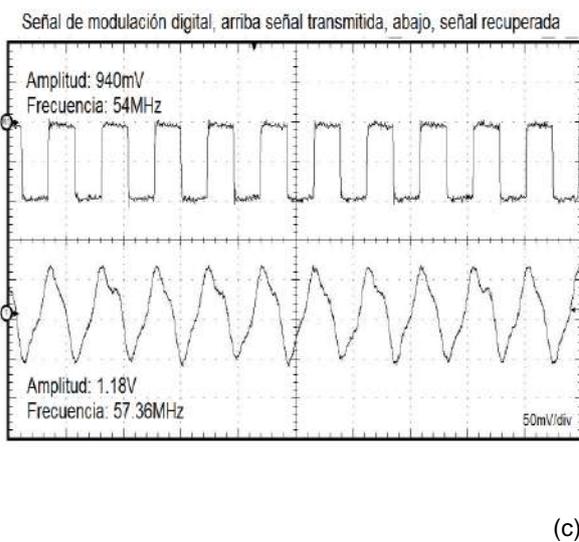
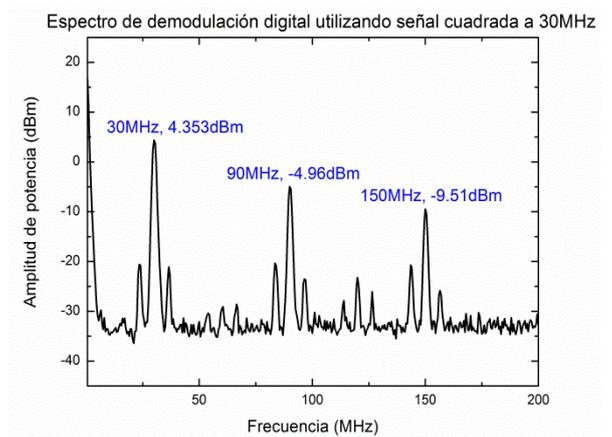
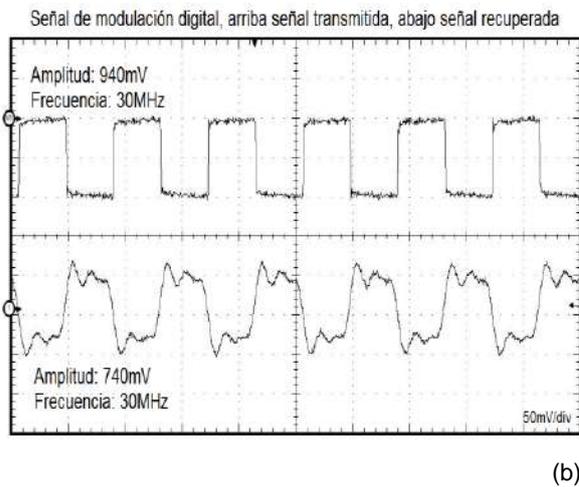
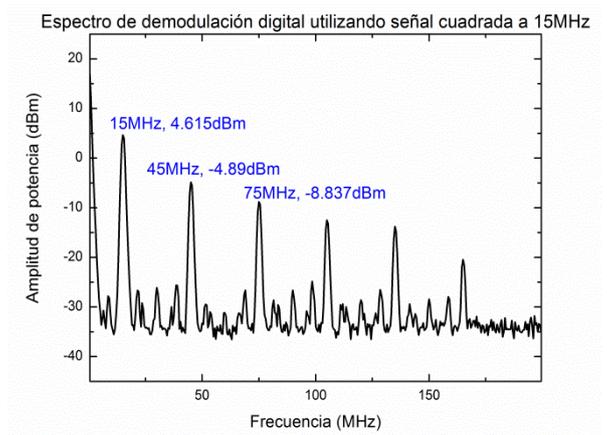
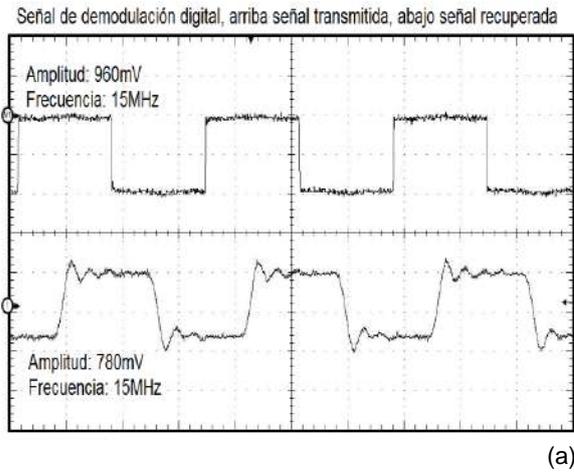
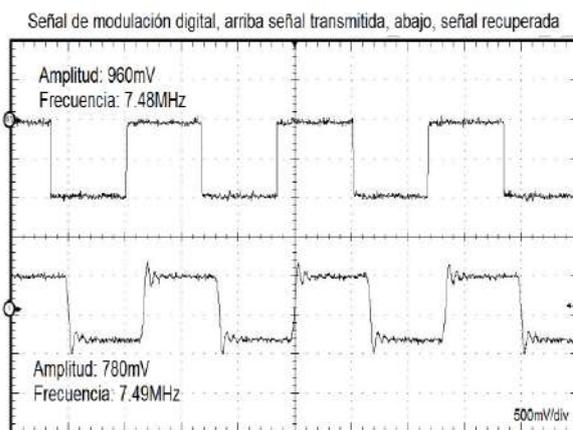


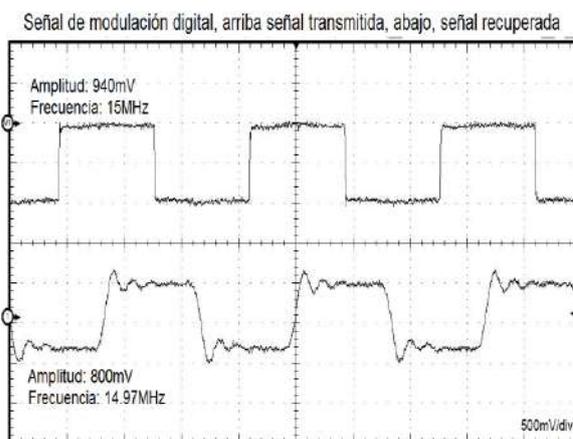
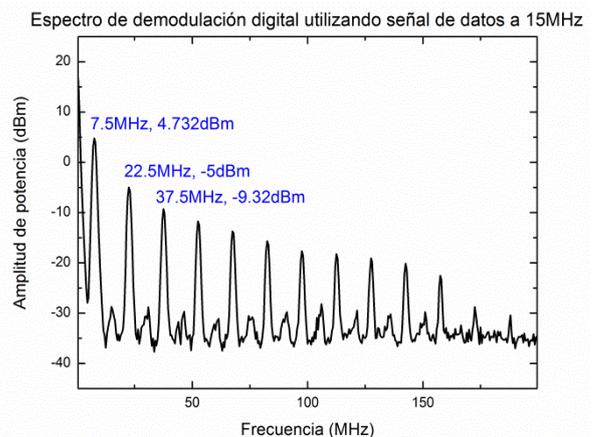
Figura 5.21.- Demodulación digital ASK, (a) 15MHz, (b), 30MHz, (c) 54MHz.

La Figura 5.21 ilustra la demodulación digital ASK. En la izquierda se presenta la señal en el tiempo y en la derecha su respectivo espectro. Las señales en el tiempo de las Figuras 5.21 (a, b y c) muestran un desfase entre la señal transmitida y la señal recuperada, esto se debe a que los dispositivos utilizados para la demodulación agregan un desfase en cada conexión. La señal en el tiempo de la Figura 5.21 (a) es la que mejor forma tiene en comparación a las otras, estos es, porque su espectro contiene mayor número de armónicos que las otras señales recuperadas. Entre menos armónicos, la señal pierde calidad reflejándose en las deformidades. La amplitud de la señal recuperada (~740mV) es menor que el de la señal transmitida (~920mV), debido a que los dispositivos utilizados son pasivos y atenúan la potencia. Utilizando señal cuadrada sólo se puede recuperar la señal a 15, 30 y 54 MHz. Después de estas frecuencias, la señal demodulada pierde completamente su forma cuadrada, llegando a ser una señal casi senoidal.

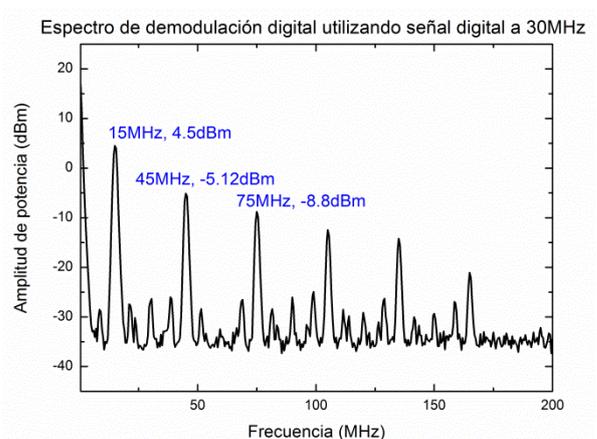
### Demodulación digital ASK utilizando un tipo de señal de datos en la señal de información

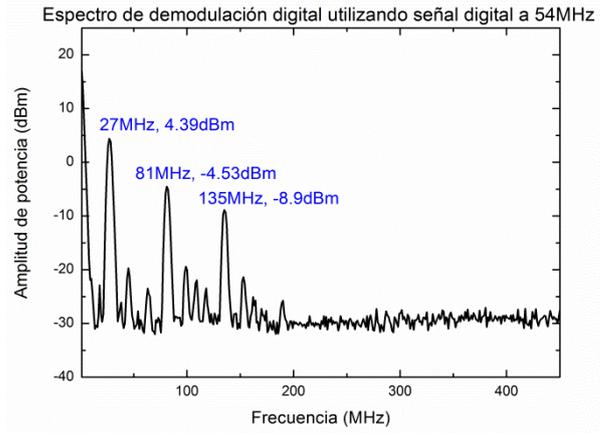
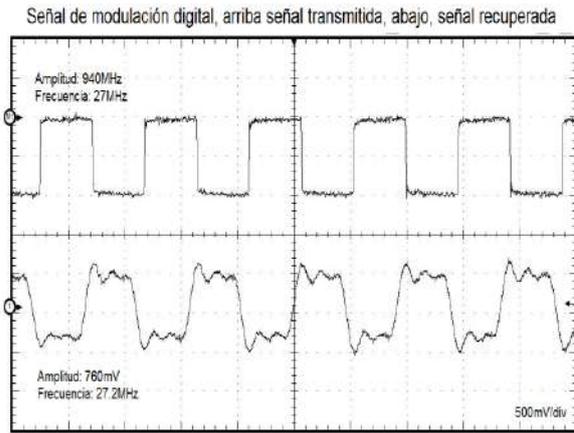


(a)

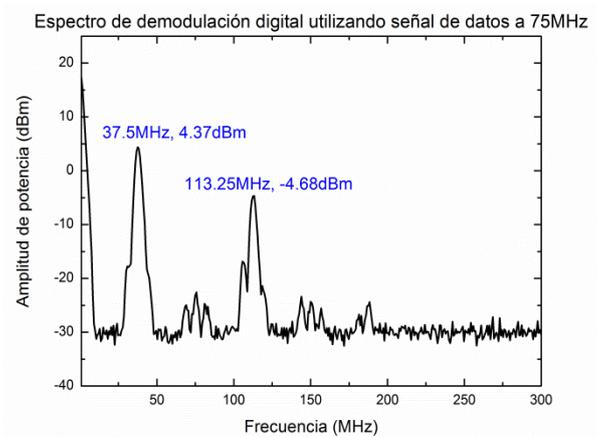
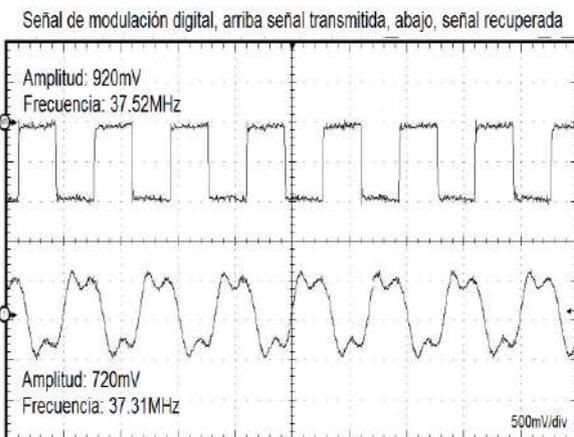


(b)

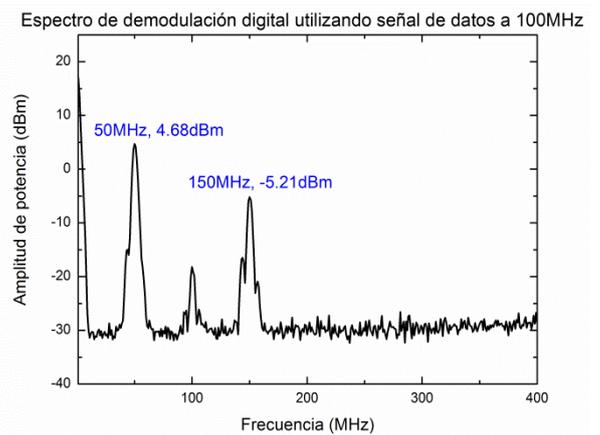
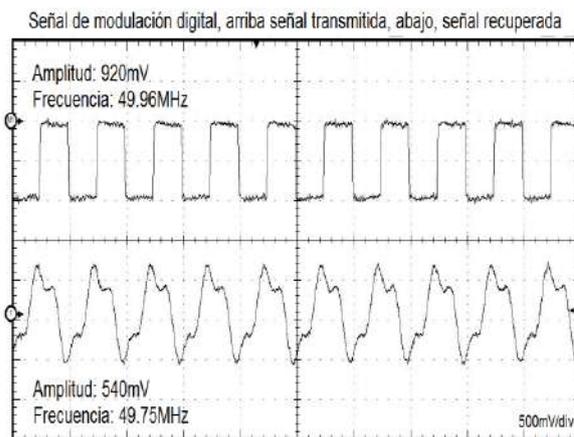




(c)



(d)



(e)

Figura 5.22.- Demodulación digital ASK, (a) 15MHz, (b), 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.

La Figura 5.22 muestra la demodulación digital ASK, en la izquierda se muestra la señal en el tiempo y en la derecha su respectivo espectro. A la izquierda se muestra la señal modulada en el dominio del tiempo y a la derecha se muestra la señal en el dominio de la frecuencia. Al utilizar una señal de datos como señal de información, se puede obtener una demodulación a más frecuencias que utilizando una señal cuadrada de información. En cuanto al dominio del tiempo, se observa que la señal va perdiendo su forma conforme aumenta su frecuencia. La amplitud disminuye poco a poco como se muestra en la figura 5.22 (a, b, c, d y e) parte izquierda, siendo la máxima amplitud en 15 y 30 MHz, y la mínima en 100MHz. Estas señales también presentan desfase. En cuanto a los espectros, los armónicos centrales corresponden con las frecuencias de las señales digitales transmitidas (15, 30, 54, 75 y 100 MHz). La amplitud promedio de los armónicos centrales es 4.5dBm. Se observa que si la señal contiene muchos armónicos, la señal presenta una buena forma, pero ésta decae conforme se disminuye el número de armónicos en el espectro.

Demodulación digital ASK utilizando un tipo de señal PRBS en la señal de información

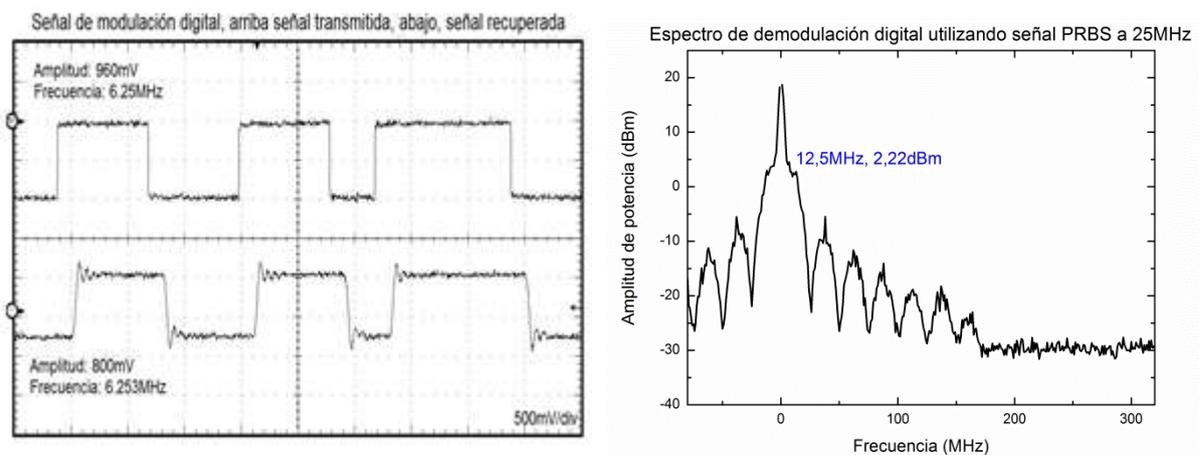


Figura 5.23.- Demodulación digital ASK, 25MHz.

En la Figura 5.23 se ilustra la señal demodulada empleando un tipo de señal PRBS para la señal de información, a la izquierda se muestra la señal en el tiempo, se observa que la señal transmitida conserva una buena forma, excepto por un sobretiro que se debe a problemas de filtrado de la señal portadora en la etapa de demodulación. El espectro que se observa en la parte derecha presenta una buena simetría y buena potencia para la transmisión de la señal.

## 5.2.6 Estudio de los diagramas de ojo

El diagrama de ojo es un método utilizado para el análisis del comportamiento de los enlaces de transmisión digital. Permite analizar las formas de onda de los pulsos que se propagan en un enlace de comunicaciones, para lograr observar sus formas, desfases, niveles de ruido, potencia de las señales. También se pueden apreciar los errores de sincronización en el receptor. Al tomar muestras instantáneas de señales digitales de alta velocidad, un diagrama de ojo se compone de la suma de las muestras de la superposición de 1s y 0s. Esto se ilustra en la Figura 5.24.

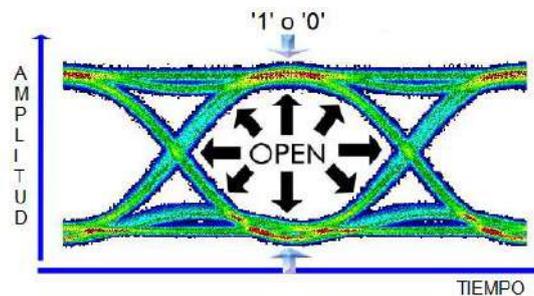


Figura 5.24.- Un diagrama de ojo resulta de la superposición de "0"s y "1"s de una cadena de datos digitales de alta velocidad.

Para medir la calidad de la señal recuperada, el diagrama de ojo es la mejor herramienta, porque permite observar alteraciones de la señal en términos de distorsión de amplitud y tiempo [3].

En este trabajo se utilizó la relación señal a ruido (SNR) por sus siglas en inglés (*Signal to Noise Ratio*), para medir la calidad de la señal recuperada. La SNR es la diferencia entre el nivel de la señal y el nivel de ruido [4].

Los cálculos realizados para la SNR son estadísticos, en los que se utilizan histogramas. Los histogramas se utilizan para analizar estadísticamente la amplitud y el tiempo de los diagramas de ojo. La media y la desviación estándar son dos aspectos importantes del tiempo y la distorsión de amplitud en cadenas digitales de alta velocidad. La media y la desviación estándar se ilustran mediante la distribución normal en la Figura 5.25 [3].

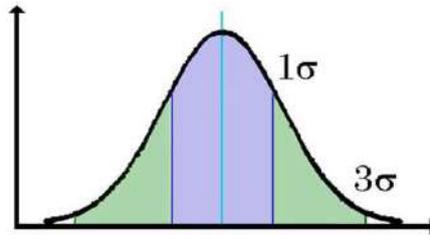


Figura 5.25.- Distribución normal de datos.

- La media es la suma de los valores dividido entre el número de valores.
- La desviación estándar es la medida de la dispersión de los datos.
- Desviación estándar, dos sigma, es  $\pm 1\sigma$ ,  $\pm 34\%$  (o 68%) de la media.
- Desviación estándar, seis sigma, es  $\pm 3\sigma$ ,  $\pm 49.85\%$  (o 99.7%) de la media.

Para obtener la SNR se debe primero calcular el nivel uno y el nivel cero del diagrama de ojo, estos se definen a continuación:

**Nivel uno:** el nivel uno en un diagrama de ojo se define en la Figura 5.26.

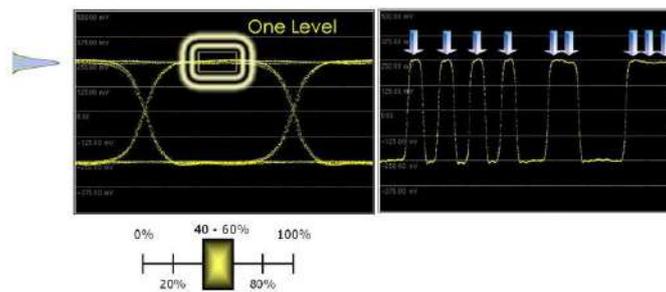


Figura 5.26.- Nivel uno.

El nivel uno de la forma de onda de la derecha es formado por los niveles que indican las flechas. El nivel uno se calcula como la distribución del histograma superior en el medio del 20% del ojo. Este 20% medio, también se conoce como el porcentaje de la región 40 a 60 y se pone de relieve en la escala de medición bajo el patrón de ojo.

**Nivel cero:** como se muestra en la Figura 5.27, el nivel cero se calcula en la misma región de 40 a 60%, pero esta vez midiendo en la base del diagrama de ojo. Del mismo modo, el valor real calculado del nivel cero viene del histograma de los datos capturados en el interior del 20% medio del periodo del ojo.

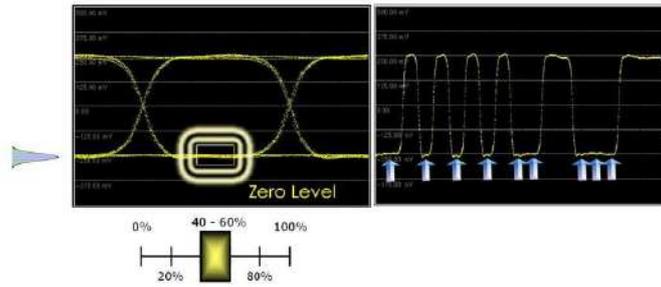


Figura 5.27.- Nivel cero.

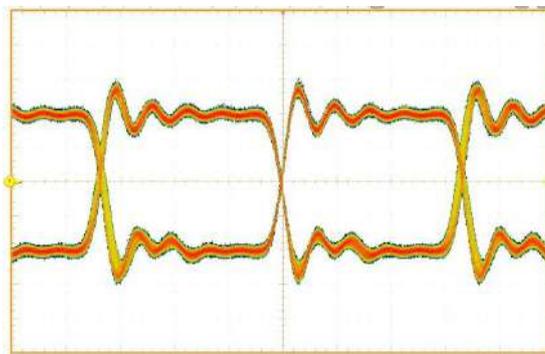
La expresión que define la SNR es la siguiente [3]:

$$SNR = \frac{(\text{Nivel uno} - \text{Nivel cero})}{(1\sigma[\text{Nivel uno}] + 1\sigma[\text{Nivel cero}])} \quad (5.13)$$

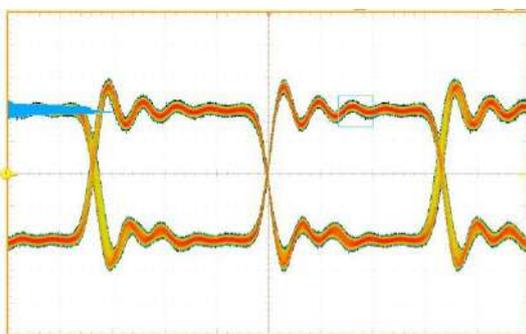
A continuación se presentan los diagramas de ojo y se calcularán las SNR de las señales recuperadas:

Diagrama de ojo utilizando 15MHz de señal cuadrada de información

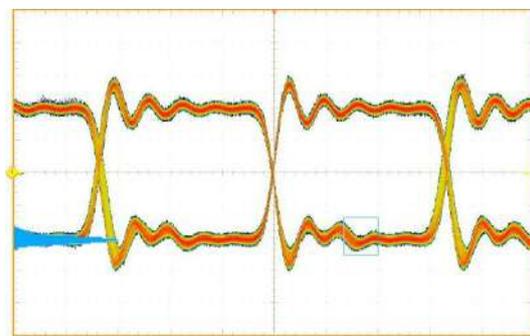
A continuación se muestra un ejemplo de cómo se calcula la SNR del diagrama de ojo de la señal recuperada, este mismo ejemplo se aplica a las demás señales.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.28.- (a) Diagrama de ojo, (b) Nivel uno, (c) Nivel cero.

En la Figura 5.28 (a) se observa el diagrama de ojo de la señal demodulada a 15MHz, se observa un poco de sobretiro en la señal, debido a factores en los componentes del sistema de modulación/demodulación, pero se puede tener una buena transmisión porque la apertura del ojo es buena. La Figura 5.28 (b) ilustra el nivel uno del diagrama de ojo y la 5.28 (c) el nivel cero. Observando estos diagramas de ojo concluimos que:

- Nivel uno: 384mV
- Nivel cero: -424mV
- $1\sigma$ [Nivel uno] = 19.19mV
- $1\sigma$ [Nivel cero] = 23.35mV

Con estos valores ya podemos obtener la SNR del diagrama de ojo:

$$SNR = \frac{(\text{Nivel uno} - \text{Nivel cero})}{(1\sigma[\text{Nivel uno}] + 1\sigma[\text{Nivel cero}])} = \frac{384\text{mV} + 424\text{mV}}{19.19\text{mV} + 23.35\text{mV}} = \frac{808\text{mV}}{42.54\text{mV}} = 19$$

El valor de la SNR se transformará a dB, para tener una lectura de SNR logarítmica.

$$SNR(\text{dB}) = 20 * \log_{10}(SNR) \quad (5.14)$$

$$SNR(\text{dB}) = 20 * \log_{10}(19) = \mathbf{25.57\text{dB}}$$

La amplitud del ojo es la diferencia del nivel uno y del nivel cero (Amplitud de ojo = nivel uno - nivel cero). Se obtuvo una SNR con valor de 25.57dB cuando se tiene una amplitud del ojo de 808mV. Aunque se observa en el nivel uno y cero un poco de ruido, este valor es bueno para la transmisión, y con este valor de SNR el detector de la señal no tendría problemas en diferenciar el bit uno y cero.

Este mismo procedimiento para calcular la SNR se utiliza para las siguientes señales.

Diagrama de ojo utilizando 30 y 54 MHz de señal cuadrada de información

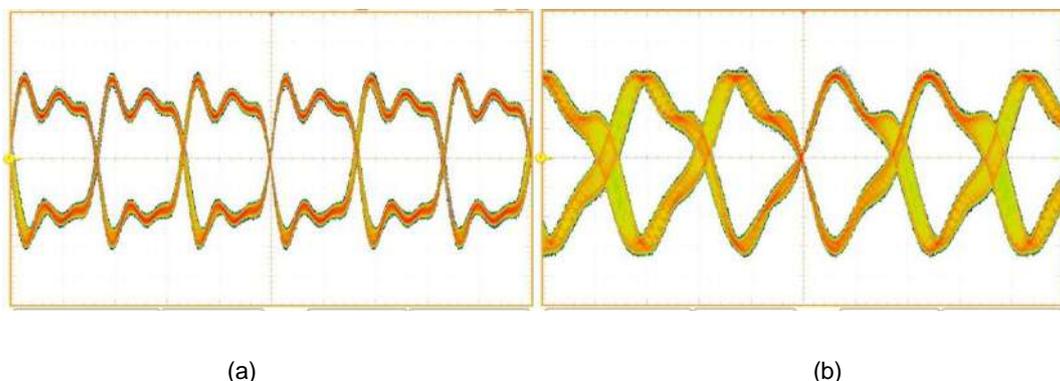


Figura 5.29.- Diagramas de ojo para (a) 30MHz de señal cuadrada de información (b) 54 MHz de señal cuadrada de información.

Los diagramas de ojo de la Figura 5.29 van perdiendo la forma cuadrada, debido a que la señal portadora intenta mezclarse con la señal de información. Este problema se conoce como diafonía, la cual se define cuando se tienen dos circuitos, y parte de las señales presentes en uno de ellos, considerado perturbador, aparece en el otro, considerado perturbado.

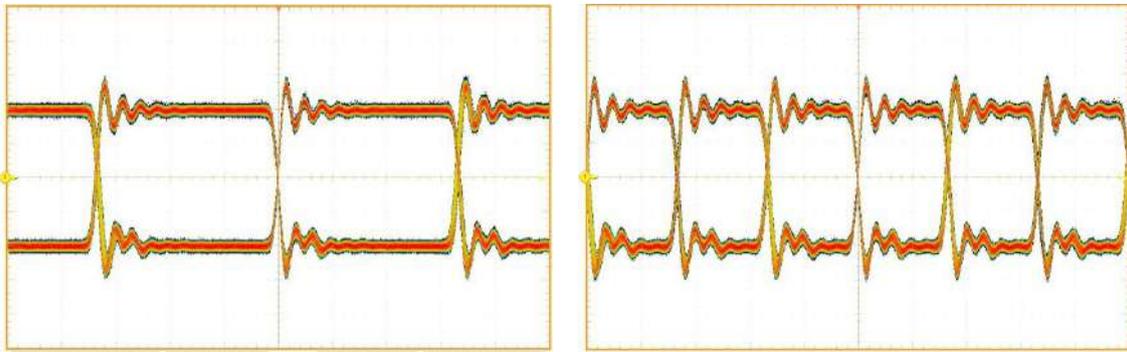
SNR de las señales recuperadas utilizando señal cuadrada de información

Frecuencia (señal de información)	30MHz	54MHz
Nivel uno (mV)	408	416
Nivel cero (mV)	-408	-448
$1\sigma$ [Nivel uno] (mV)	50.37	72.02
$1\sigma$ [Nivel cero] (mV)	35.29	85.56
<b>SNR(dB)</b>	<b>19.57</b>	<b>14.77</b>

Tabla 5.1.- SNR de las señales demoduladas utilizando señal cuadrada de información.

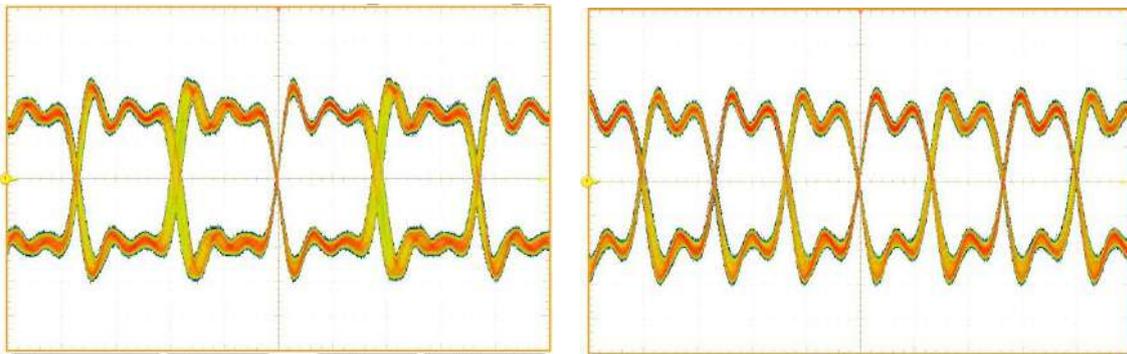
Para 30MHz, se obtuvo una SNR de 19.57dB y para 54MHz una SNR de 14.77dB, se concluye que conforme aumenta la frecuencia la calidad de la señal disminuye.

Diagrama de ojo utilizando 15, 30, 54, 75 y 100 MHz de señal de datos de información



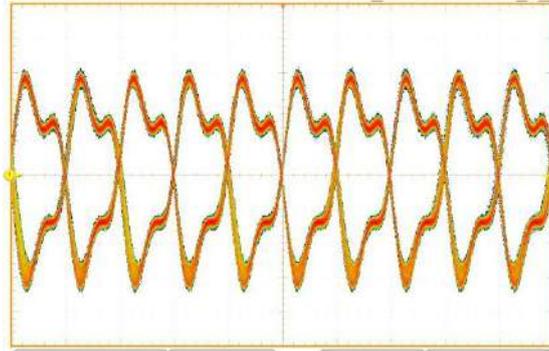
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 5.30.- Diagramas de ojo utilizando señal de datos de información para (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.

SNR de las señales recuperadas utilizando señal de datos de información

Frecuencia de señal de información (MHz)	15	30	54	75	100
Nivel uno (mV)	400	400	424	328	344
Nivel cero (mV)	-424	-432	-416	-360	-392
$1\sigma$ [Nivel uno] (mV)	10.28	19.39	29.36	21.89	68.78
$1\sigma$ [Nivel cero] (mV)	10.24	23.85	25.69	25.88	74.01
<b>SNR(dB)</b>	<b>32.07</b>	<b>25.68</b>	<b>23.05</b>	<b>23.16</b>	<b>14.23</b>

Tabla 5.2.- SNR de las señales demoduladas utilizando señal de datos de información.

Entre más grande sea el valor de la SNR mejor calidad presenta la señal. Se observa que para 15MHz se tiene la señal con mayor calidad, y conforme la SNR disminuye, la forma de la señal también disminuye.

### Diagrama de ojo utilizando 30, 54, 75 y 100 MHz de señal de datos de información

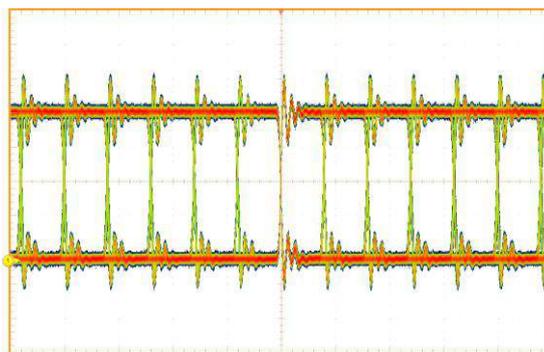


Figura 5.31.- Diagrama de ojo utilizando señal PRBS de información a 25MHz.

### SNR de la señal recuperada utilizando señal PRBS de información

Frecuencia de señal de información (MHz)	25
Nivel uno (mV)	86.48
Nivel cero (mV)	-0.182
$1\sigma$ [Nivel uno] (mV)	1.519
$1\sigma$ [Nivel cero] (mV)	1.382
<b>SNR(dB)</b>	<b>29.5</b>

Tabla 5.3.- SNR de la señal demodulada utilizando señal PRBS de información.

Se presenta una SNR de 29.5dB, y se observa una clara apertura del ojo, esto indica que la señal es buena para la transmisión de la información.

### **5.3 Modulación y demodulación digital ASK usando un esquema óptico**

Para la modulación y demodulación digital ASK utilizando un esquema óptico se utilizó un diodo láser operando en el infrarrojo a 1550nm como señal portadora de información. Para la señal de información se utilizaron las mismas señales que en el esquema eléctrico, es decir, señales cuadradas, de datos y PRBS ubicadas en frecuencias de 15, 30, 54, 75 y 100 MHz. La modulación se realiza mediante un modulador electro – óptico (MEO). En este esquema óptico sólo se muestran las señales demoduladas, porque no se tiene el equipo necesario para observar la modulación óptica de señales digitales.

### 5.3.1 Sistema de demodulación digital ASK

A continuación se muestra el diagrama a bloques del sistema de modulación y demodulación digital ASK con el esquema óptico:

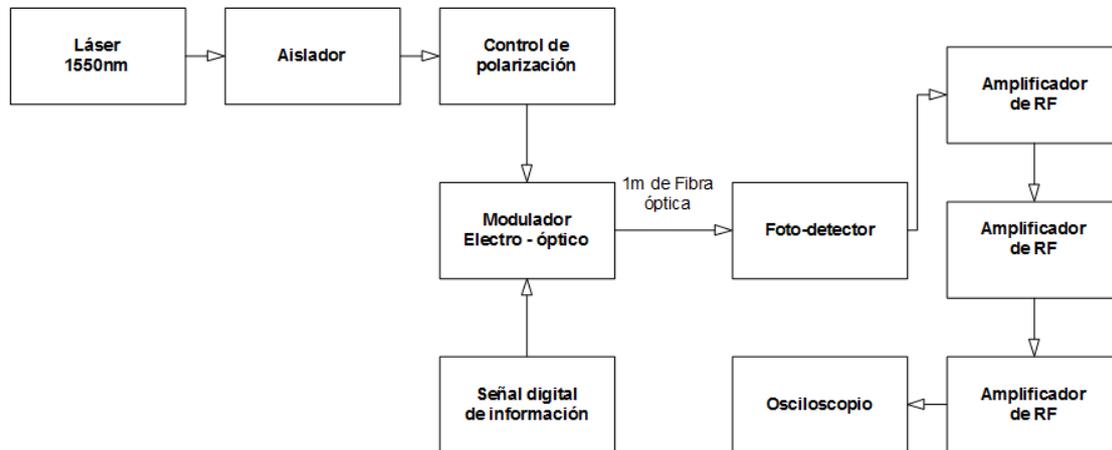


Figura 5.32.- Diagrama de bloques del esquema de modulación y demodulación óptica.

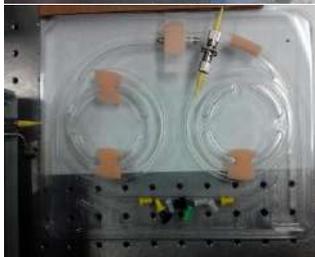
La Figura 5.32 muestra el esquema óptico, se observa que empieza con el diodo láser que opera a 1550nm, su función es ser la señal portadora de información; seguido se conecta el aislador de fibra óptica, la función de este dispositivo es proteger al láser de posibles reflexiones de luz que lo puedan dañar, después se conecta el control de polarización, este se utiliza para cambiar el estado de polarización de la luz y obtener la mejor transmisión posible del haz de luz que sale del diodo laser. Después la salida del control de polarización se conecta a la entrada óptica del MEO; en la entrada eléctrica del MEO es donde se conecta el generador de señales digitales, el cual funciona como la señal de información. A la salida del MEO se conecta 1m de fibra óptica por la cual se transmite la señal modulada, después se conecta a un foto-detector, cuya función es recuperar la señal de información, seguido están tres amplificadores los cuales amplifican la potencia de la señal recuperada, y por último está el osciloscopio, donde se observa la señal recuperada.

### 5.3.2 Estudio en el dominio del tiempo y la frecuencia de las pruebas obtenidas experimentalmente de la demodulación digital ASK

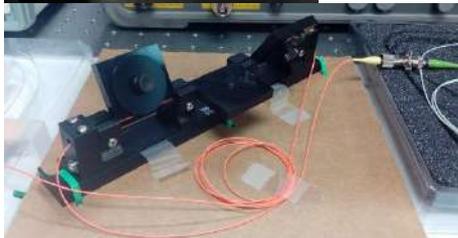
En esta subsección se muestran las pruebas obtenidas experimentalmente de las señales recuperadas (demoduladas) utilizando el esquema óptico. A continuación se muestran los dispositivos utilizados en el esquema experimental:



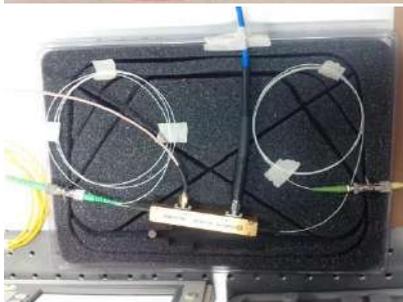
(a) Diodo laser DFB a 1550nm con potencia de 7.14mW



(b) Aislador de fibra óptica



(c) Control de polarización



(d) MEO



(e) Foto – detector y amplificadores

Figura 5.33.- Componentes utilizados para el esquema de modulación y demodulación digital ASK óptico.

El espectro de la señal portadora se muestra a continuación:

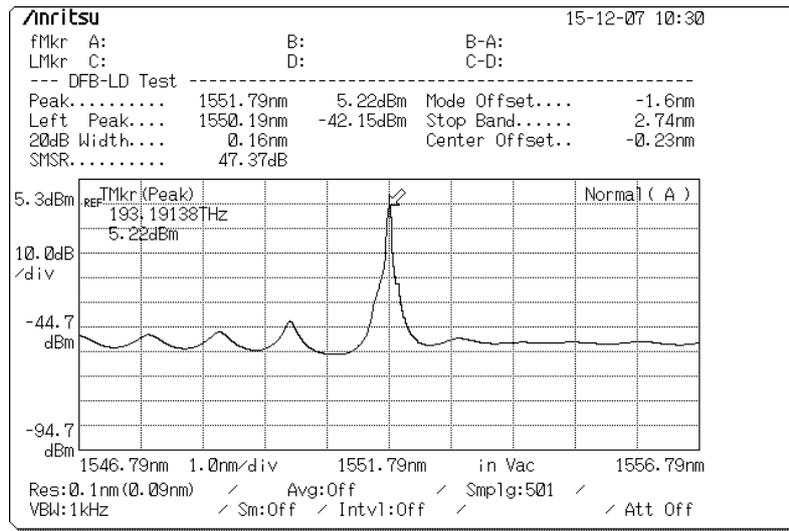
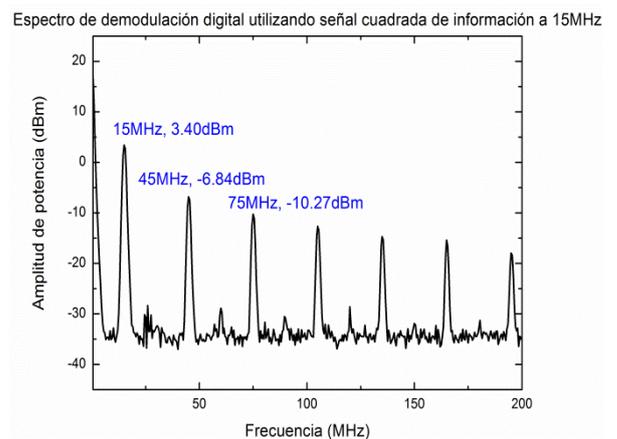
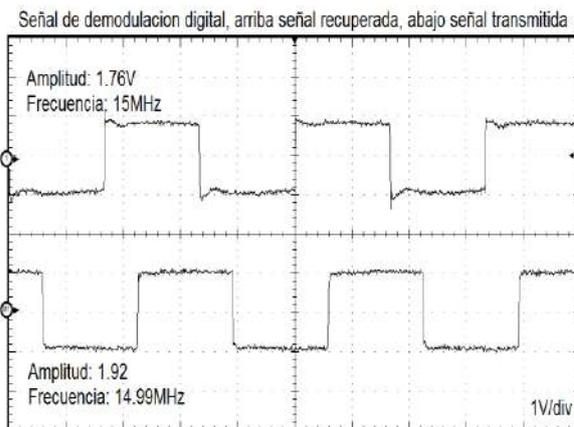


Figura 5.34.- Espectro de la señal portadora de información.

El espectro de la Figura 5.34 tiene su armónico central en 193.19138THz, que corresponde a 1550nm. La potencia es de 5.22dBm, que corresponde a 3.29mW, la cual es menor que la potencia generada por el láser (7.14mW), lo que indica que la fibra óptica conectada al láser presenta una atenuación de 3.85mW.

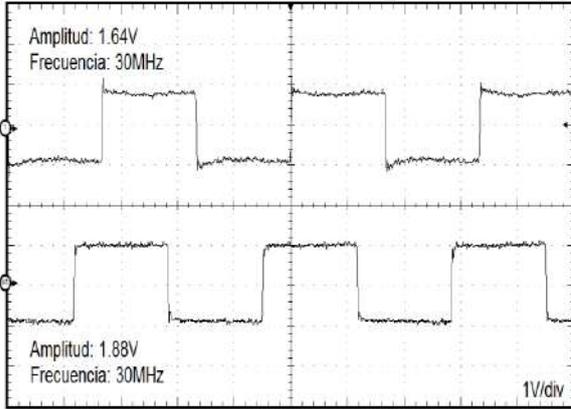
A continuación se presentan las señales digitales (forma cuadrada, de datos y PRBS) demoduladas con frecuencias de 15, 30, 54, 75 y 100 MHz.

### Demodulación digital ASK utilizando un tipo de señal cuadrada en la señal de información



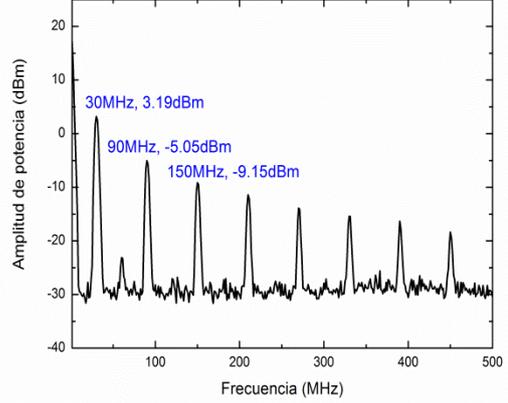
(a)

Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida

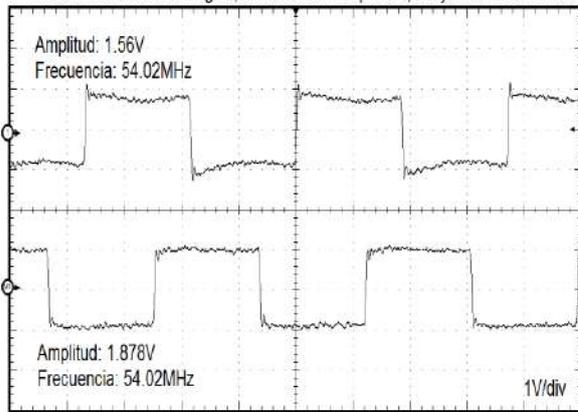


(b)

Espectro de demodulación digital utilizando señal cuadrada de información a 30MHz

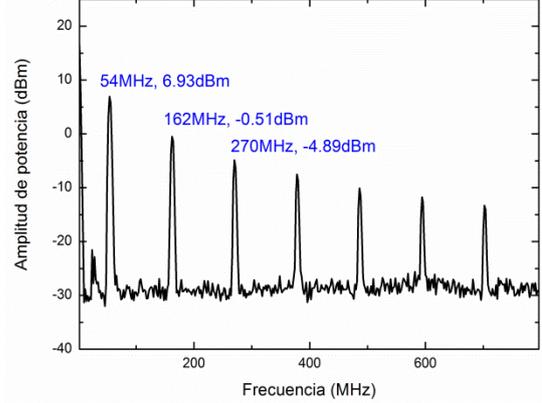


Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida

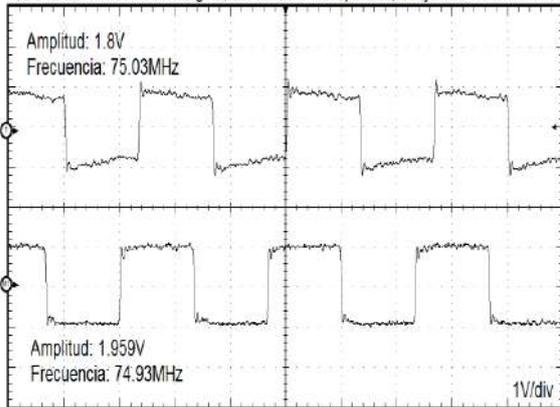


(c)

Espectro de demodulación digital utilizando señal cuadrada de información a 54MHz

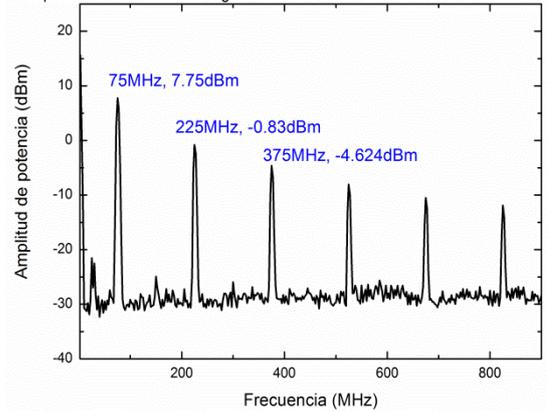


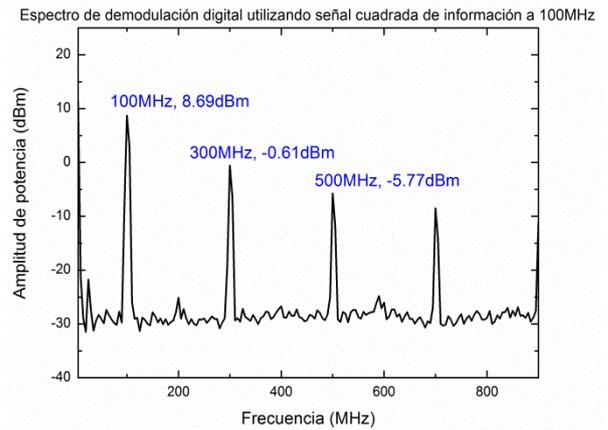
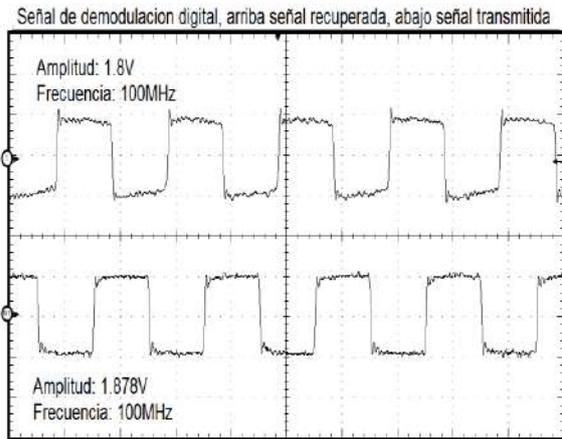
Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida



(d)

Espectro de demodulación digital utilizando señal cuadrada de información a 75MHz



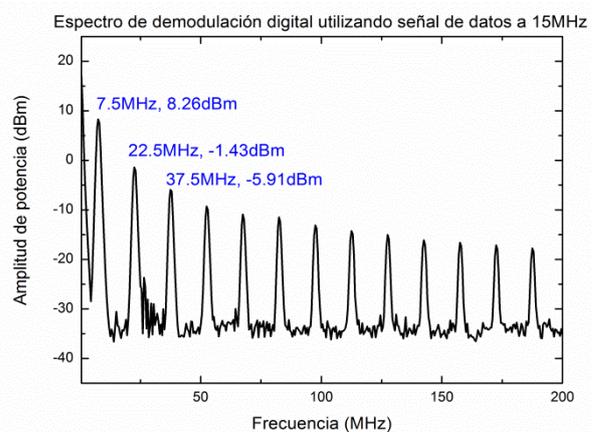
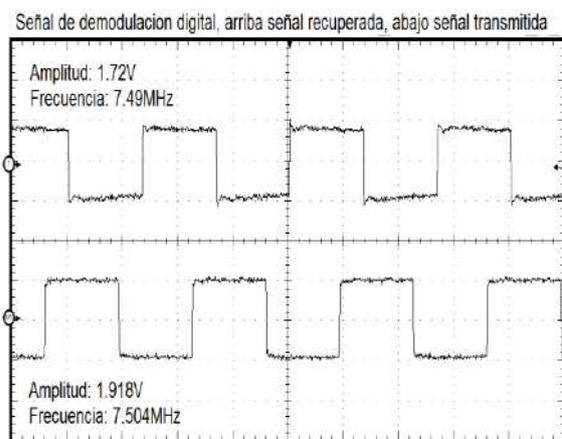


(e)

Figura 5.35.- Señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.

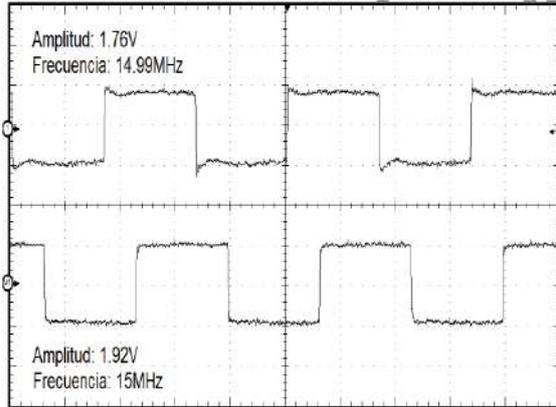
La Figura 5.35 muestra las señales demoduladas empleando señal cuadrada como señal de información, en la parte izquierda se observan las señales en el dominio del tiempo, se observa que se logró una demodulación más efectiva que empleando un sistema eléctrico para la demodulación. La forma de las señales demoduladas es casi idéntica que la señal transmitida salvo por pequeñas variaciones en el nivel cero de las señales a 75 y 100 MHz. Las amplitudes también son buenas, en la señal transmitida se tiene una amplitud promedio de 1.9V mientras que la amplitud de la señal demodulada es en promedio 1.7V. Los espectros de la parte derecha corresponden a las señales demoduladas. El armónico central de los espectros está situado a la frecuencia de la señal de información utilizada.

### Demodulación digital ASK utilizando un tipo de señal de datos en la señal de información

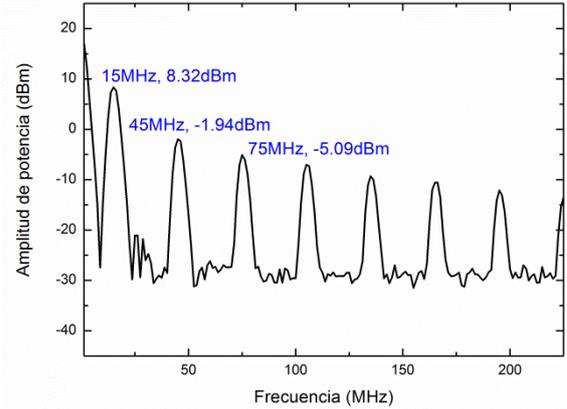


(a)

Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida

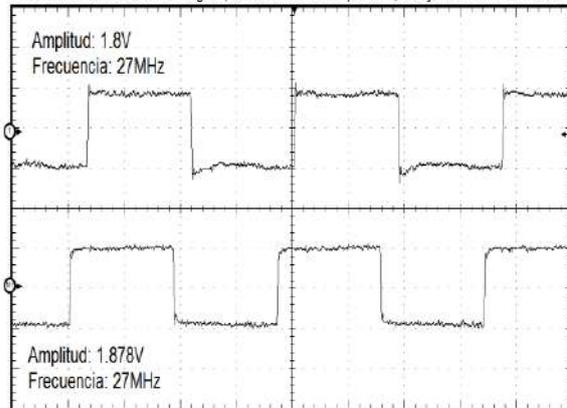


Espectro de demodulación digital utilizando señal de datos a 30MHz

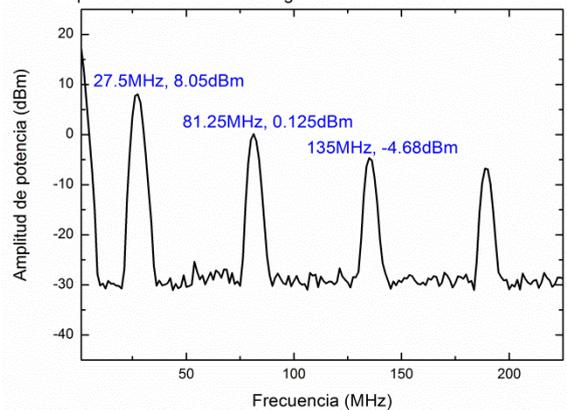


(b)

Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida

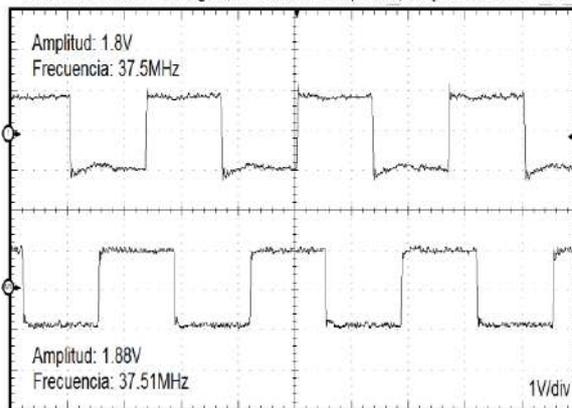


Espectro de demodulación digital utilizando señal de datos a 54MHz

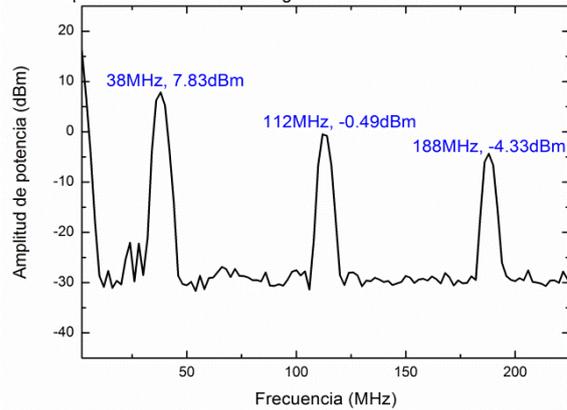


(c)

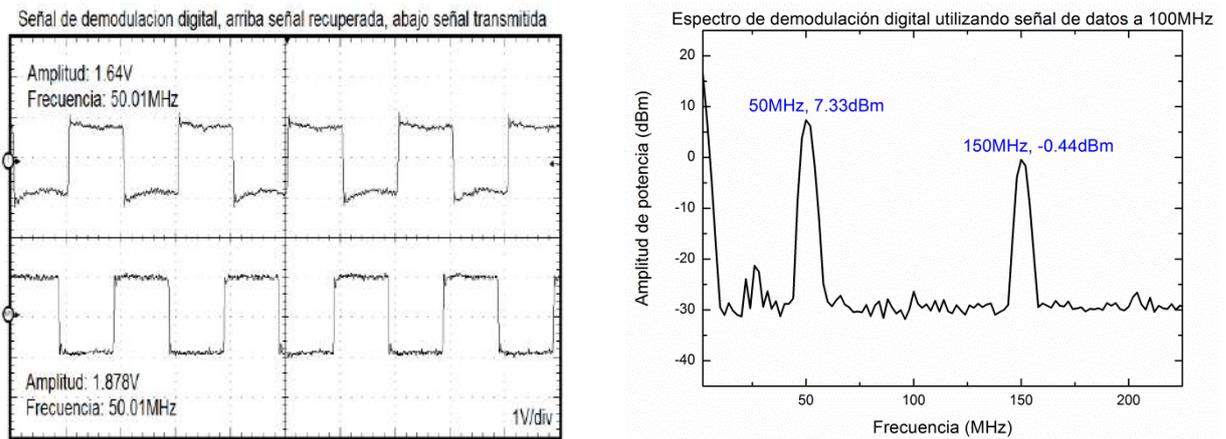
Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida



Espectro de demodulación digital utilizando señal de datos a 75MHz



(d)

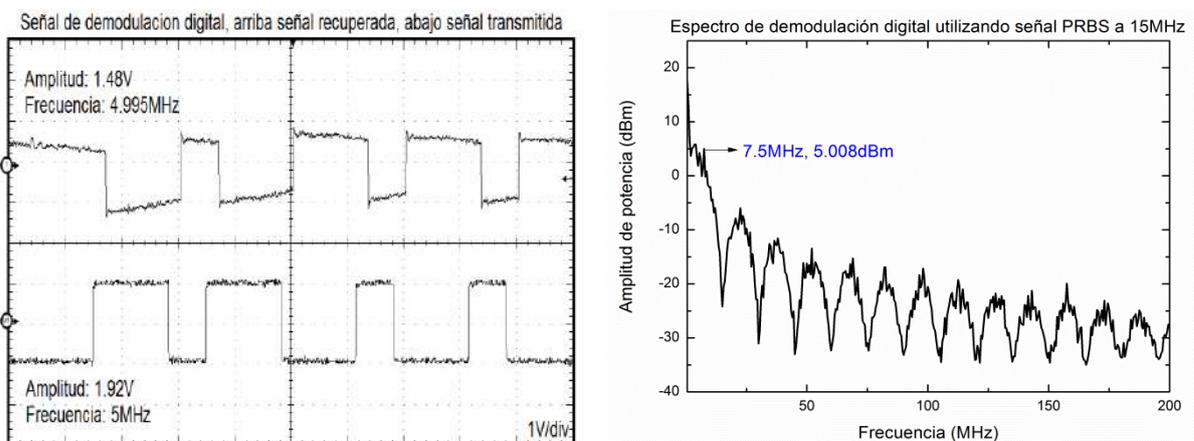


(e)

Figura 5.36.- Señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.

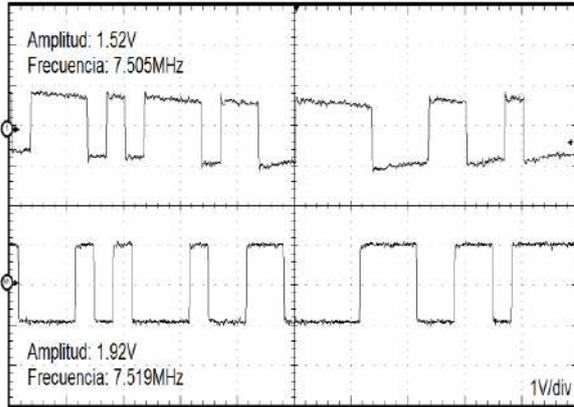
La Figura 5.36 muestra a la derecha las señales demoduladas y transmitidas utilizando señal de datos como señal de información y a la izquierda el correspondiente espectro de cada señal demodulada. Se aprecia que la señal demodulada coincide en forma con la señal transmitida, excepto por los desfases entre las señales transmitidas y demoduladas. La amplitud de las señales es casi la misma, en la transmisión se tiene aproximadamente 1.9V y en la demodulación 1.8V. Como se mencionó anteriormente, la frecuencia en la señal de datos observada en el analizador de espectros eléctricos y el osciloscopio es la mitad de la señal generada por el generador de señales. Se observa que los espectros contienen suficientes armónicos para tener una buena señal.

### Demodulación digital ASK utilizando un tipo de señal PRBS en la señal de información

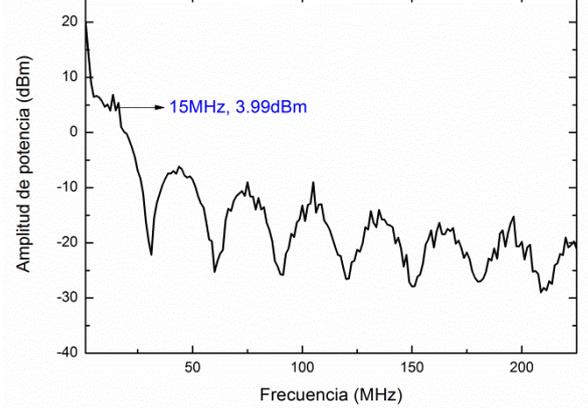


(a)

Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida

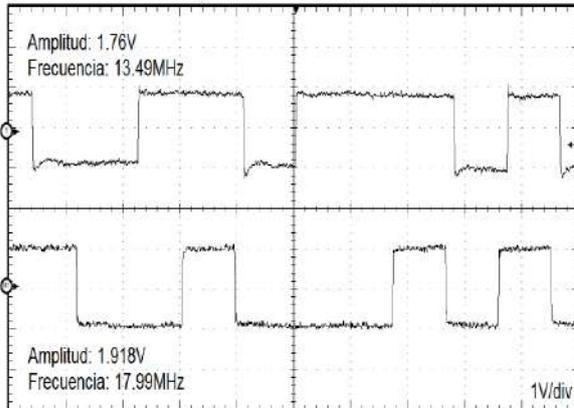


Espectro de demodulación digital utilizando señal PRBS a 30MHz

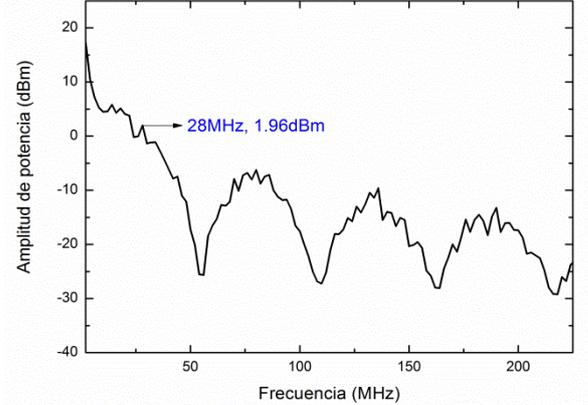


(b)

Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida

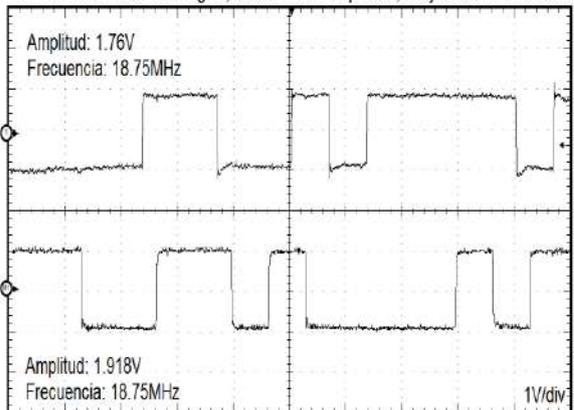


Espectro de demodulación digital utilizando señal PRBS a 54MHz

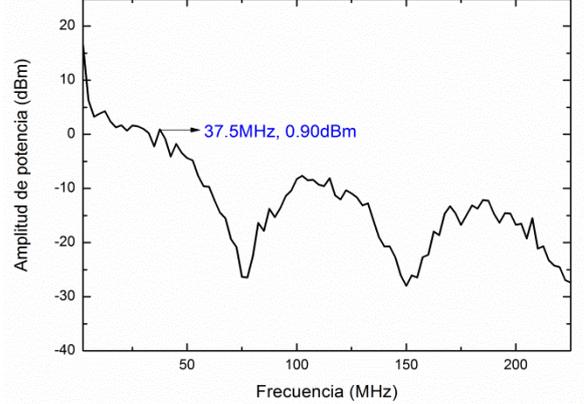


(c)

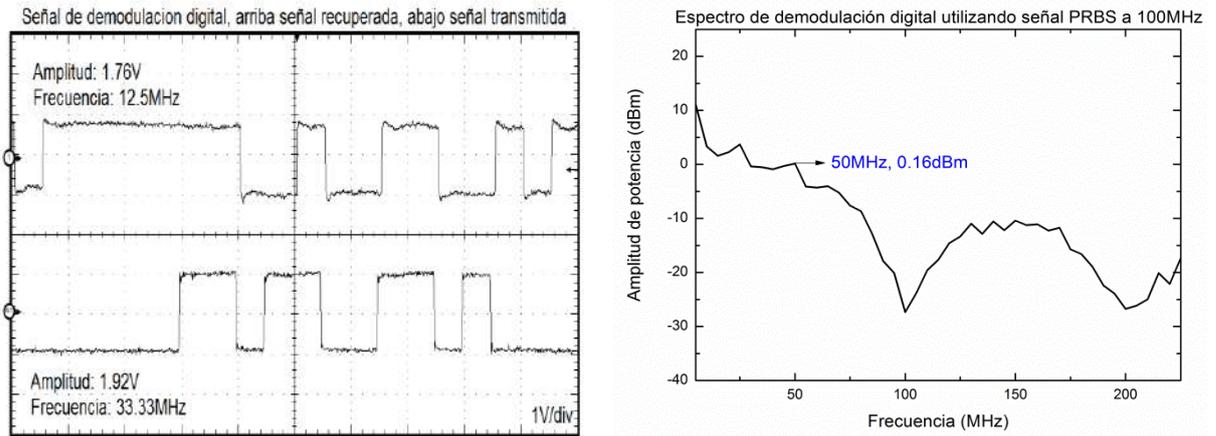
Señal de demodulación digital, arriba señal recuperada, abajo señal transmitida



Espectro de demodulación digital utilizando señal PRBS a 75MHz



(d)



(e)

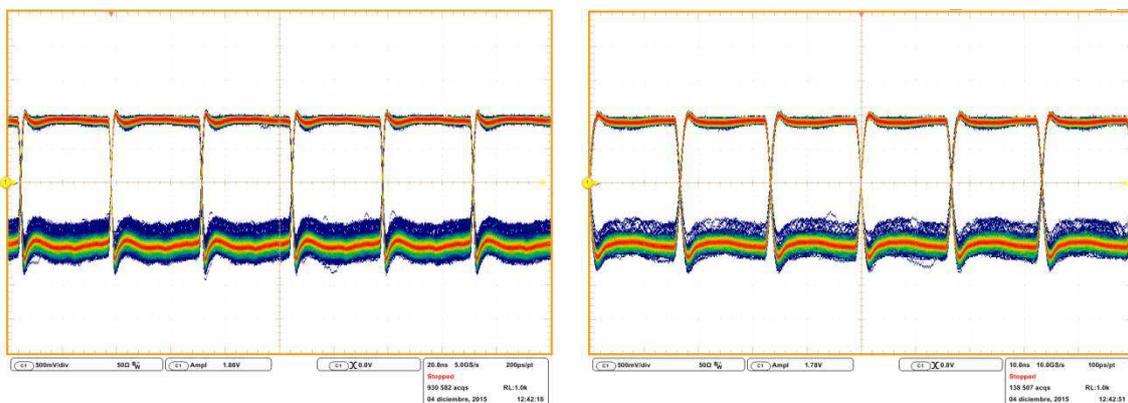
Figura 5.37.- Señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.

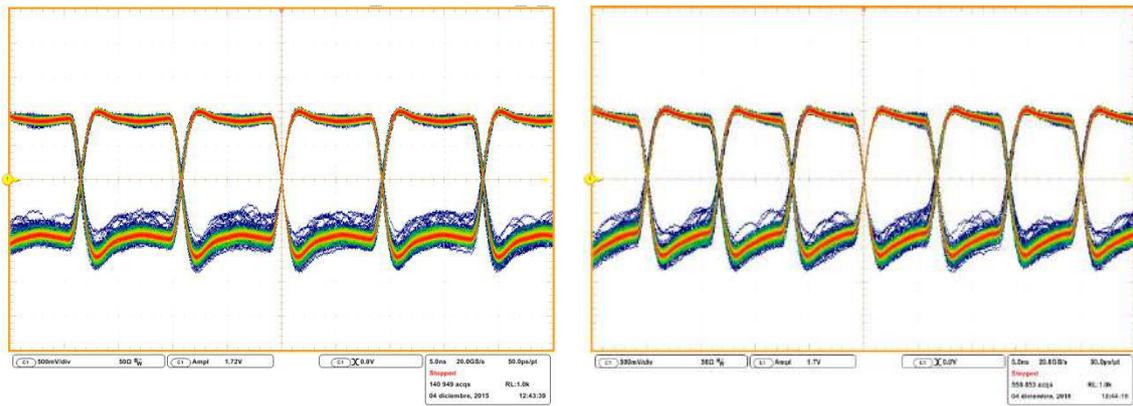
La Figura 5.37 ilustra la demodulación utilizando señal PRBS como señal de información. A la izquierda se muestra la señal transmitida y demodulada en el dominio del tiempo. Se observa desfase entre la transmisión y la demodulación. Para 15 y 30 MHz se observa problema de detección del nivel cero, esto muestra que a bajas frecuencias utilizando señal PRBS el foto – detector presenta problemas de detección. A la derecha se observan los espectros de la señales demoduladas.

### 5.3.3 Estudio de los diagramas de ojo

A continuación se presentan los diagramas de ojo y se calcularán las SNR de las señales recuperadas:

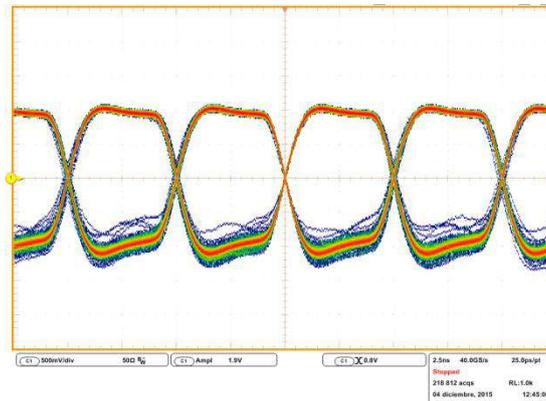
Diagrama de ojo utilizando 15, 30, 54, 75 y 100 MHz de señal cuadrada de información





(c)

(d)



(e)

Figura 5.38.- Diagrama de ojo de las señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.

La Figura 5.38 ilustra los diagramas de ojo de las señales recuperadas utilizando señal cuadrada. Para todas las frecuencias (15, 30, 54, 75 y 100 MHz) se observa que el nivel cero presenta ruido. Para disminuir lo más posible este ruido se ajustó el voltaje de media onda ( $V_{\pi}$ ). Esto se hizo inyectando un pequeño voltaje de 0 a 1V en la entrada de DC bias del MEO.

El cálculo de las SNR se presenta a continuación:

SNR de las señales recuperadas utilizando señal cuadrada de información

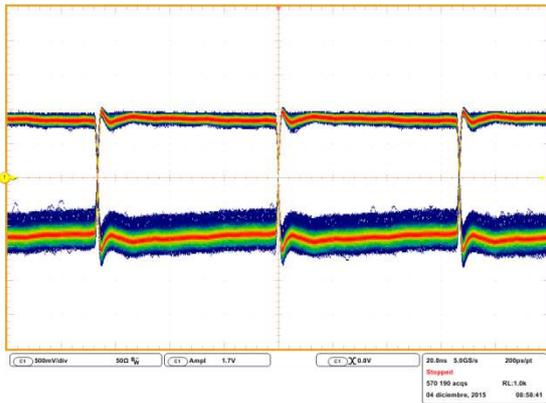
Frecuencia de señal de información (MHz)	15	30	54	75	100
Nivel uno (mV)	914.2	859.3	806.6	896.2	959.5
Nivel cero	-987	-887	-825.4	-933.1	-1026

(mV)					
1 $\sigma$ [Nivel uno] (mV)	16.39	18.98	23.18	24.56	23.41
1 $\sigma$ [Nivel cero] (mV)	26.73	28.12	32.69	44.97	42.45
<b>SNR(dB)</b>	<b>32.88</b>	<b>31.38</b>	<b>29.31</b>	<b>28.39</b>	<b>29.58</b>

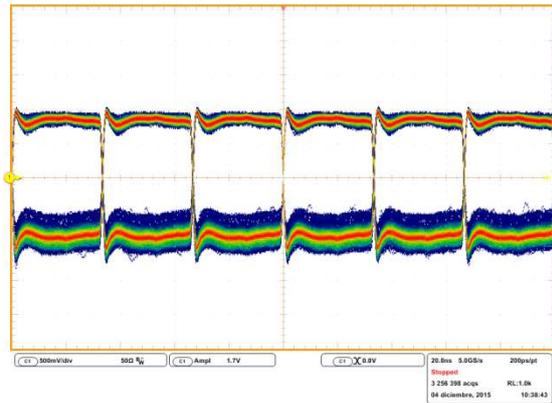
Tabla 5.4.- SNR de las señales demoduladas utilizando señal cuadrada de información.

En la Tabla 5.4 se observan las SNR obtenidas de la señales demoduladas utilizando señal cuadrada de información. Los valores de las SNR son altos, todos arriba de 20dB, que es el valor mínimo para tener una transmisión adecuada.

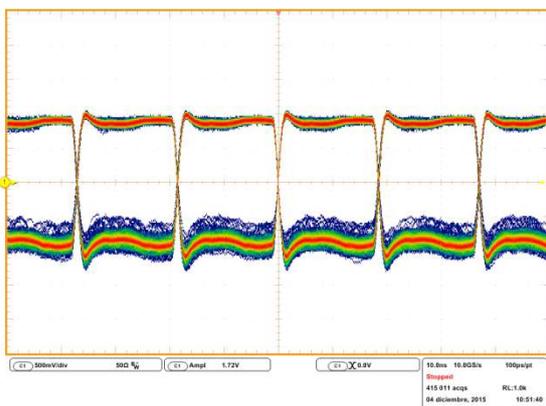
Diagrama de ojo utilizando 15, 30, 54, 75 y 100 MHz de señal de datos de información



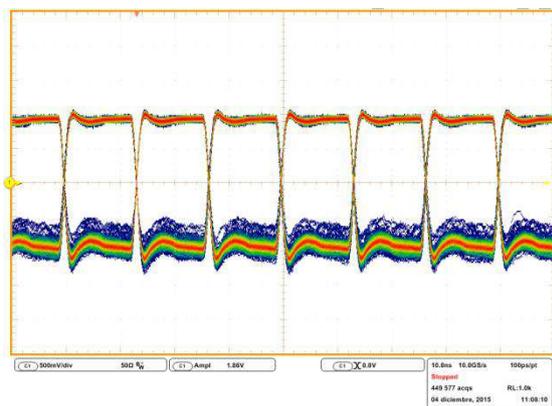
(a)



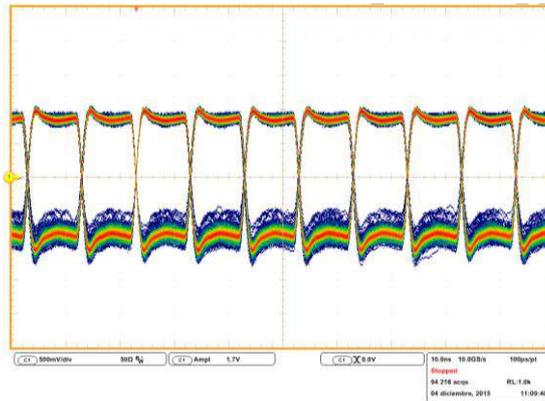
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.39.- Diagrama de ojo de las señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.

La Figura 5.39 muestra los diagramas de ojo de la señal demodulada utilizando señal de datos de información. En estos diagramas de ojo también se presenta ruido en el nivel cero, el cual se disminuyó lo más posible ajustando el voltaje  $V_{\pi}$ .

El cálculo de las SNR se presenta a continuación:

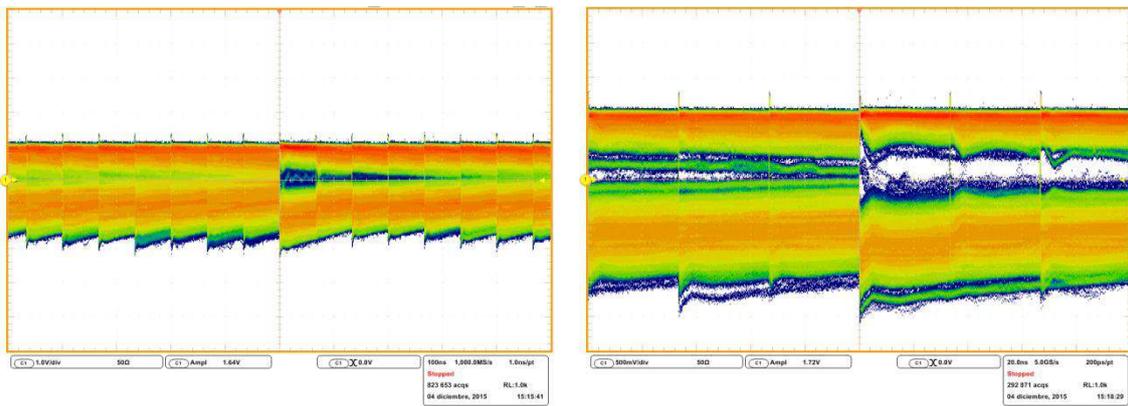
SNR de las señales recuperadas utilizando señal de datos de información

Frecuencia de señal de información (MHz)	15	30	54	75	100
Nivel uno (mV)	818.8	840.2	843.1	894.3	801.7
Nivel cero (mV)	-876.9	-896.4	-870.3	-915.3	-839.2
$1\sigma$ [Nivel uno] (mV)	19.1	19.09	21	20.28	21.76
$1\sigma$ [Nivel cero] (mV)	26.92	26.95	29.12	36.88	29.17
<b>SNR(dB)</b>	<b>31.32</b>	<b>31.52</b>	<b>30.67</b>	<b>30</b>	<b>30.15</b>

Tabla 5.5.- SNR de las señales demoduladas utilizando señal de datos de información.

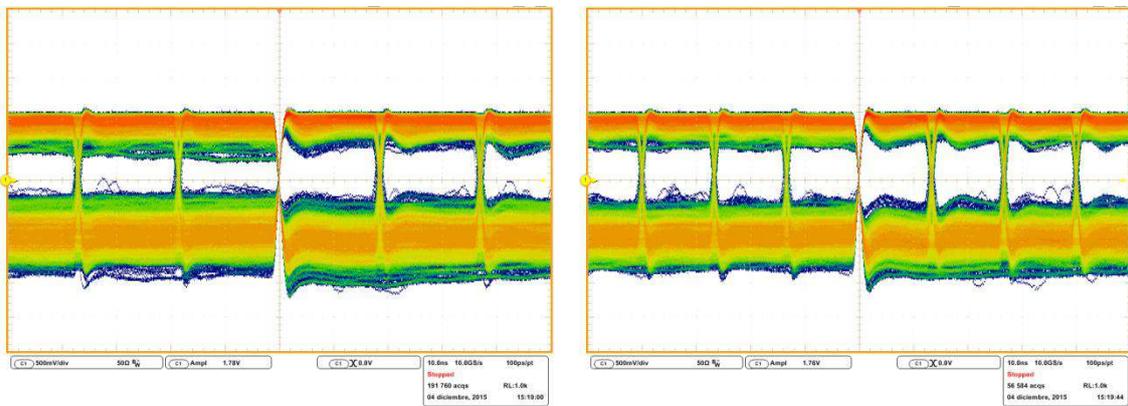
La Tabla 5.5 muestra las SNR utilizando señal de datos de información. Estas SNR tienen valores altos, en general, los valores de las desviaciones estándar son pequeños, lo que indica que las muestras para formar la señal no están alejadas de la media, es decir, no hay tanta dispersión en las muestras.

Diagrama de ojo utilizando 15, 30, 54, 75 y 100 MHz de señal PRBS de información



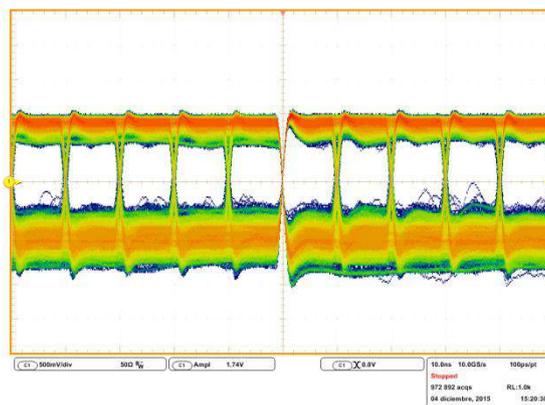
(a)

(b)



(c)

(d)



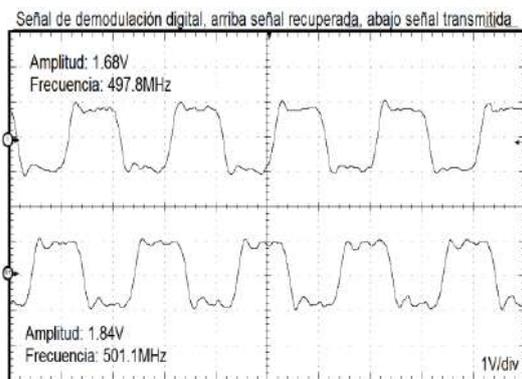
(e)

Figura 5.40.- Diagrama de ojo de las señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.

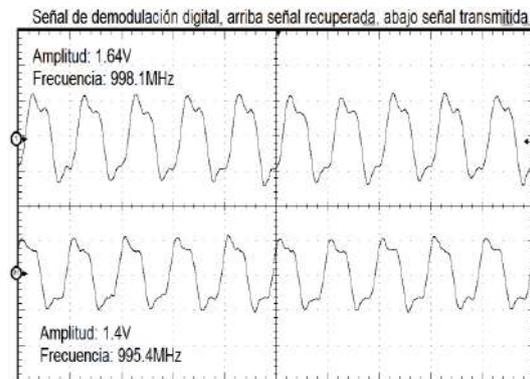
La Figura 5.40 ilustra los diagramas de ojo de las señales demoduladas utilizando señal PRBS como señal de información. En este caso, los diagramas de ojo no presentan buena apertura del ojo. Para 15 y 30 MHz el ojo está cerrado y los niveles

uno y cero presentan mucho ruido, lo que hace que estas señales sean deficientes para la transmisión de información. Para 54, 75 y 100 MHz el ojo se empieza a abrir un poco, pero el ruido en los niveles uno y cero permanece. Debido al ruido en los niveles uno y cero en las señales demoduladas, no se puede tener medidas confiables para el cálculo de las SNR.

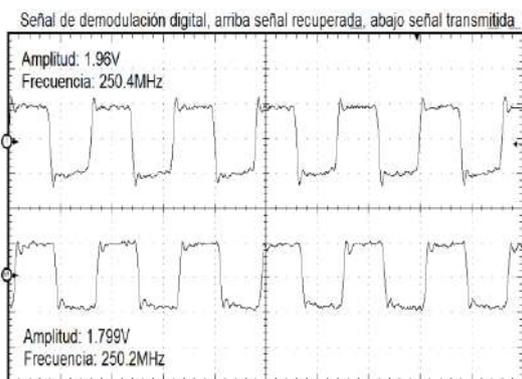
Utilizando el esquema óptico para la modulación y demodulación ASK de señales digitales se consiguió demodular señales a mayores frecuencias que utilizando el esquema eléctrico. Se obtuvieron resultados de señales demoduladas hasta para 1GHz en la señal de información, aquí sólo se mostrará la forma de la señal para demostrar que utilizando el esquema óptico permite mayor ancho de banda que el esquema eléctrico, estas señales se presentan a continuación:



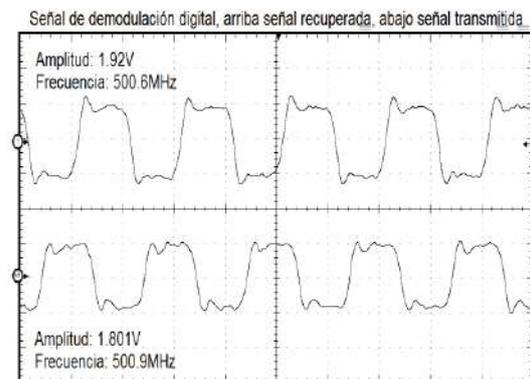
(a)



(b)



(c)



(d)

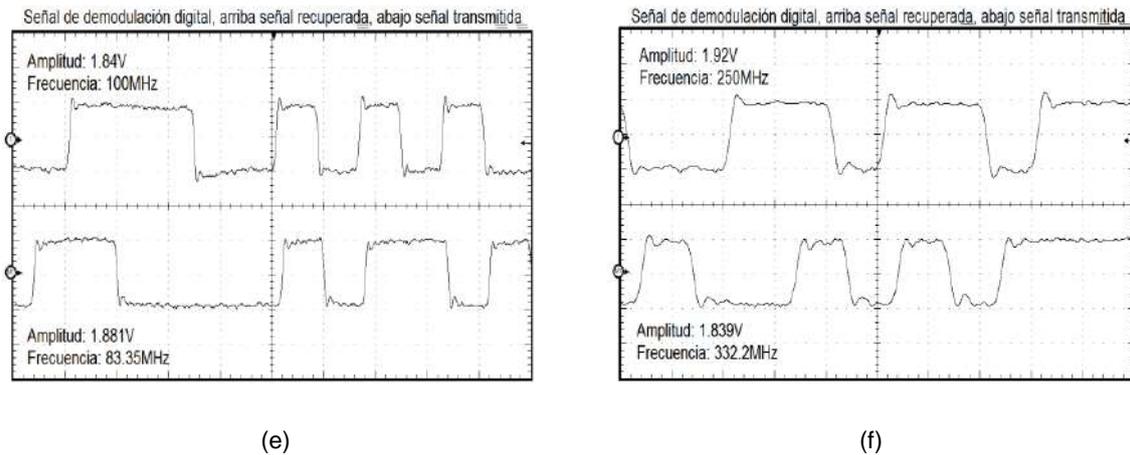


Figura 5.41.- Señal cuadrada: (a) 500MHz, (b) 1GHz; señal de datos: (c) 500MHz, (d) 1GHz; señal PRBS: (e) 500MHz, (f) 1GHz.

## 5.4 Análisis comparativo de los dos esquemas de modulación y demodulación digital ASK

Haciendo una comparación del esquema eléctrico y óptico, se concluye que el esquema óptico ofrece mayor ancho de banda, menor pérdida de potencia y mayor inmunidad al ruido externo que utilizando un esquema eléctrico.

Un sistema de fibra óptica es similar a un sistema utilizando cable de cobre. La diferencia está en que la fibra óptica utiliza pulsos de luz para transmitir información a través de líneas de fibra en lugar de usar pulsos eléctricos para transmitir información a través de líneas de cobre.

La fibra óptica ofrece muchas ventajas sobre cable coaxial para la transmisión de señales de RF en aplicaciones de antenas de comunicación remota, así como aplicaciones de redes celulares y televisión por cable.

A continuación se presenta una comparación de utilizar un sistema de comunicaciones óptico y uno eléctrico, desde la perspectiva de los parámetros más importantes a tomar en cuenta en el diseño de un sistema de comunicaciones.

**Peso, tamaño y flexibilidad:** para un enlace de comunicaciones de larga distancia, cables de fibra óptica son más baratos para transportar y más fáciles de instalar que cables de cobre. Esto es porque los cables de fibra son más pequeños y ligeros comparados con cables de cobre. Los cables de fibra ocupan menos espacio en los conductos y pesan menos que los cables de cobre. Los ahorros varían desde 30 hasta 90% dependiendo de los tipos de cables utilizados. La flexibilidad en la fibra es

atractiva para instalaciones que contienen muchas vueltas a lo largo de la trayectoria de transmisión a diferencia de los cables de cobre.

**Pérdidas de señal:** La Figura 5.42 muestra la atenuación utilizando fibra óptica y cable de cobre para una distancia de 1Km. La atenuación está en función de la longitud de onda y la pérdida se indica en dB/Km. Una señal óptica retiene el 50% de su potencia después de viajar 12Km, esto es utilizando una fibra monomodo, independientemente de la tasa de velocidad. Otros factores que causan pérdida son la dispersión y los conectores de fibra.

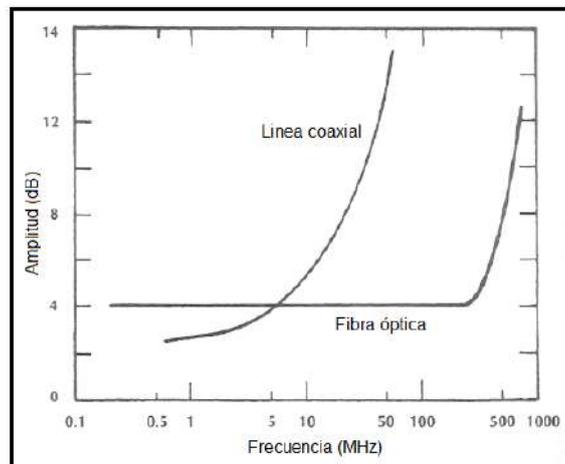


Figura 5.42.- Atenuación efectiva de 1Km de distancia de un cable coaxial y una fibra óptica. El ancho de banda de 3dB de la fibra es 500MHz.

Comparado con el cobre, cuando señales de alta tasa de transmisión se propagan a través de cables de cobre, se disipa energía por radiación en el espacio. Estas pérdidas se incrementan conforme se aumenta la tasa de transmisión. La fibra óptica tiene menores pérdidas, lo que la hace atractiva para enlaces de comunicación de larga distancia, por otra parte, el cobre tiene altas pérdidas.

**Capacidad de información:** el ancho de banda utilizable de una fibra monomodo fácilmente excede los 10THz, esto ofrece mucho espacio para la transmisión a alta velocidad. El ancho de banda del cable de cobre más caro y sofisticado es sólo de 1GHz. El incremento de capacidad de información en fibra óptica y las altas velocidades de datos puede ser el principal factor de sustituir a la nueva era de esta tecnología.

**Inmunidad y ruido:** una ventaja de la fibra óptica es la inmunidad al ruido externo. Ruido eléctrico, también conocido como IEM (interferencia electromagnética), e IRF

(interferencia de radiofrecuencia), son señales eléctricas no deseadas que producen efectos indeseables y de otra manera alteran el sistema de audio y datos. Las fuentes de IEM/IRF incluyen aparatos de iluminación, ordenadores, motores eléctricos y transmisiones de audio y televisión. La interferencia de estas fuentes modifica las señales de datos usando cables metálicos, causando errores de datos. En resumen, la fibra óptica es totalmente inmune a cualquier campo eléctrico extraño, por lo que sólo transporta señales de mejor calidad [5].

## Referencias

[1] Hwei P. Hsu, 1970, *Análisis de Fourier*, Wilmington, Delaware, E.U.A, Addison Wesley Iberoamericana, S.A, pp. 84-85.

[2] Edward E. Kamen, Bonnie S. Heck, 2008, *Fundamentos de señales y sistemas usando la WEB y MATLAB*, Naucalpan de Juárez, Estado de México, Pearson Educación de México, S.A de C.V, pp. 133-134.

[3] Understanding Eye Pattern Measurements, *Anritsu*, 2010.

[4] Universidad Nacional abierta y a distancia, módulo de entrenamiento auditivo, *lección 15, relación señal a ruido SNR*.

[5] Norazan Mohd Kassim, 2008, *Recent Trends in Radio Over Fiber Technology*, Universidad Tecnológica de Malasia,

## Comentarios, conclusión y trabajos a futuro

La invención de la tecnología de fibra óptica, es algo totalmente revolucionario por su capacidad, comparada con la tecnología de cables de metales. En la actualidad, las industrias de telecomunicaciones están cambiando a tecnología de fibra óptica, por la gran capacidad de información que pueden mandar en un solo recorrido. Conforme la tecnología avance, será necesario enviar datos a mayores velocidades y con capacidad de información, esto se logrará implementando fibra óptica en los enlaces de comunicaciones. La fibra óptica seguirá siendo tema de investigación por las ventajas y oportunidades que brinda.

Con el desarrollo y resultados obtenidos de los sistemas de modulación/demodulación digital ASK eléctrico y óptico, se cumplió con los objetivos, generales y específicos propuestos al inicio de esta tesis. Mediante las pruebas obtenidas de los dos sistemas desarrollados, se concluye que el sistema óptico presenta ventajas sobre el sistema eléctrico. Estas ventajas abarcan, principalmente, el ancho de banda, el cual es mayor si se usa un sistema óptico que un eléctrico; otras ventajas son que se tiene mayor velocidad de datos, inmunidad al ruido electromagnético, y un peso más ligero en comparación con un sistema eléctrico. En cuanto al sistema eléctrico, la ventaja sobre el sistema óptico que se obtuvo, fue que es más fácil implementar un sistema eléctrico, debido a que todos los componentes trabajan en el dominio eléctrico, a diferencia del sistema óptico, donde se tiene que trabajar con componentes ópticos y eléctricos.

A continuación se presenta una comparación de las SNRs obtenidas del esquema eléctrico y del esquema electroóptico:

Señal cuadrada como señal de información		
Tasas de velocidad (Mbps)	SNRs (dB) del esquema eléctrico	SNRs (dB) del esquema electro-óptico
15	25.57	32.88
30	19.57	31.38
54	14.77	29.31
75	No se recuperó la señal digital	28.39
100	No se recuperó la señal digital	29.58
500	No se recuperó la señal digital	26.64
1000	No se recuperó la señal digital	19.57

(a)

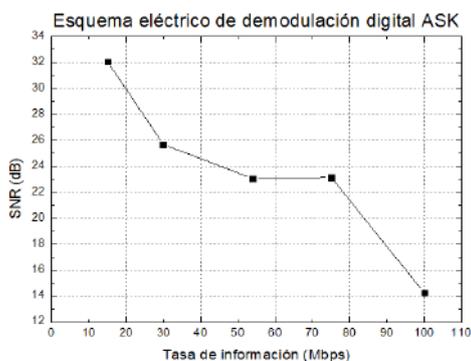
Señal de datos como señal de información		
Tasas de velocidad (Mbps)	SNRs (dB) del esquema eléctrico	SNRs (dB) del esquema electro-óptico
15	32.07	31.32
30	25.68	31.52
54	23.05	30.37
75	23.16	30
100	14.23	30.15
500	No se recuperó la señal digital	30.45
1000	No se recuperó la señal digital	26.05

(b)

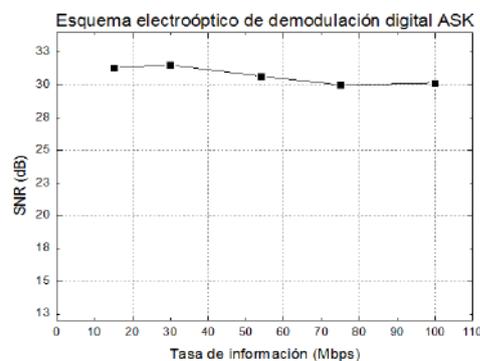
Tabla 6.1.- SNRs de: (a) señal cuadrada y (b) señal de datos

En la Tabla 6.1 se observa que empleando el esquema eléctrico con señal cuadrada se puede recuperar la información sólo hasta 54Mbps, mientras que con el esquema electro-óptico se puede recuperar información hasta 1GHz. El esquema eléctrico con señal de datos tiene la capacidad de recuperar información hasta 100Mbps mientras que el esquema electro-óptico puede recuperar información hasta 1GHz. Con el esquema eléctrico, la calidad de la señal recuperada es menor que utilizando un esquema electro-óptico, esto se comprueba con la SNR, debido a que es menor en el esquema eléctrico y mayor en el esquema electro-óptico.

A continuación en la Figura 6.1 se presenta una comparación gráfica de las SNRs obtenidas del esquema eléctrico y electro-óptico, utilizando señal de datos como señal de información, donde se observa que para el caso eléctrico, la SNR disminuye con el aumento de frecuencia, mientras que para el caso electro-óptico, la gráfica presenta una forma plana, donde la SNR se mantiene en un nivel de 30dB aproximadamente para todas las tasas de transmisión.



(a)



(b)

Figura 6.1.- Gráficas de tasa de transmisión contra SNR, (a) esquema eléctrico, (b) esquema electro-óptico

Como trabajos a futuro para mejorar el ya realizado, se contempla diseñar un filtro pasa-banda de radiofrecuencia operando a una frecuencia central de 2.4GHz, que es con la que se trabajó. Este filtro nos servirá para eliminar cualquier ruido que se pueda mezclar con la señal, permitiendo solo un cierto ancho de banda, que sea suficiente para tener una buena forma de señal.

Otro trabajo a futuro contemplado, es desarrollar el sistema óptico, pero utilizando como medio de transmisión 30Km de fibra óptica, para observar como es un enlace de fibra óptica apegado más a la realidad, observando factores como la atenuación y dispersión.

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación.....	7
Figura 1.2.- Sistema de transmisión de señales digitales.....	10
Figura 2.1.- Diagrama de bloques simplificado de un sistema de comunicaciones electrónicas. .....	11
Figura 2.2.- Modulación digital de amplitud: (a) señal portadora, (b) señal moduladora, (c) señal modulada.....	13
Figura 2.3.- Esquema de bloques del transmisor de ASK.....	14
Figura 2.4.- Modulador ASK.....	14
Figura 2.5.- Demodulador ASK detección síncrona.....	15
Figura 2.6.- Posibles formas de transmitir la señal portadora junto con una señal modulada. ..	17
Figura 2.7.- Demodulación ASK detección de envoltorio.....	17
Figura 2.8.- Formas de onda de entrada y salida binaria FSK.....	18
Figura 2.9.- Señales de la modulación PSK: (a) Señal binaria de información; (b) Señal modulada PSK.....	20
Figura 3.1.- Característica de la salida de frecuencia de un oscilador controlado por voltaje, en función del voltaje de polarización.....	22
Figura 3.2.- VCO serie ZX95-2700A-S+.....	23
Figura 3.3.- Formatos NRZ, RZ y R1 aplicados en una secuencia binaria.....	25
Figura 3.4.- Generador de patrones de pulso Agilent 81133A.....	25
Figura 3.5.- Símbolos del mezclador.....	25
Figura 3.6.- Traslación de frecuencia en un receptor superheterodino.....	26
Figura 3.7.- Esquema del mezclador ideal.....	26
Figura 3.8.- Mezclador de frecuencia (modulador) ZX05-U432H-S+.....	27
Figura 3.9.- Mezclador de frecuencia (demodulador) ZX05-C42-S+.....	28

Figura 3.10.- Definición de las cuatro categorías comunes de filtros. ....	29
Figura 3.11.- Filtro pasa-bajas ideal. ....	29
Figura 3.12.- Filtro pasa-bajas real. ....	30
Figura 3.13.- Filtro pasa bajas SLP-150+. ....	31
Figura 3.14.- Circuito del filtro pasa-banda. ....	31
Figura 3.15.- Respuesta de un filtro pasa-banda. ....	32
Figura 3.16.- Filtro pasa-banda VBFZ-2000-S+. ....	32
Figura 3.17.- Amplificador de RF ZX60-14012L-S+. ....	33
Figura 3.18.- Fuente de voltaje BK Precision 1761. ....	34
Figura 3.19.- Fuente de alimentación Keysight E3630A. ....	34
Figura 3.20.- Divisor de potencia de RF ZX10R-14-S+. ....	35
Figura 3.21.- Laser de retroalimentación distribuida ADFB-1550-10. ....	36
Figura 3.22.- Esquema y flujo de señales en un aislador de fibra óptica. ....	36
Figura 3.23.- Control de polarización. ....	37
Figura 3.24.- Modulador de intensidad electro-óptico IM-1550-20. ....	38
Figura 3.25.- Foto-detector LR-15-A-M. ....	39
Figura 3.26.- Osciloscopio digital de fósforo DPO 7254 Tektronix. ....	41
Figura 3.27.- Analizador de espectros eléctricos Agilent E4407B. ....	41
Figura 3.28.- Analizador de espectros ópticos Anritsu MS9710C. ....	42
Figura 4.1.- (a) Esquema de modulación directa, (b) Circuito eléctrico de modulación directa. ....	46
Figura 4.2.- Esquema de modulación externa. ....	46
Figura 4.3.- Diagrama de sistema electro-óptico. ....	47
Figura 4.4.- Esquema de fabricación de un modulador electro-óptico. ....	47
Figura 4.5.- (a) MEO orientado longitudinalmente, (b) MEO orientado transversalmente, (c) Modulador de tipo transversal en óptica integrada. ....	48
Figura 4.6.- MIMZ de intensidad en óptica integrada. ....	49
Figura 4.7.- Esquema del modulador de intensidad Mach-Zehnder. ....	50
Figura 4.8.- Potencia óptica a la salida del MIMZ en función del voltaje aplicado en los electrodos de RF. ....	51
Figura 4.9.- Receptor coherente heterodino. ....	52
Figura 5.1.- Tren de pulsos digitales. ....	54
Figura 5.2.- Espectro de modulación ASK. ....	56
Figura 5.3.- Espectro discreto de la señal ASK. ....	56
Figura 5.4.- Modulación digital ASK sin filtro intermedio. ....	58
Figura 5.5.- Modulación digital ASK con filtro intermedio. ....	59
Figura 5.6.- (a) Señal modulada ASK a 15 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK. ....	61
Figura 5.7.- (a) Señal modulada ASK a 30 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK. ....	62
Figura 5.8.- (a) Señal modulada ASK a 54 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK. ....	63
Figura 5.9.- (a) Señal modulada ASK a 75 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK. ....	64
Figura 5.10.- (a) Señal modulada ASK a 100 MHz, (b) Espectro de la señal modulada ASK. ..	65

Figura 5.11.- Arreglo experimental para la modulación digital ASK sin filtro intermedio. ....	67
Figura 5.12.- Modulación digital ASK utilizando señal cuadrada a diferentes frecuencias para la señal de información. (Izquierda), dominio del tiempo, (derecha), dominio de la frecuencia. .....	69
Figura 5.13.- Modulación digital ASK utilizando señal de datos a diferentes frecuencias para la señal de información. (Izquierda), dominio del tiempo, (derecha), dominio de la frecuencia. .....	71
Figura 5.14.- Modulación digital ASK utilizando señal arbitraria (PRBS) a diferentes frecuencias para la señal de información. (Izquierda), dominio del tiempo, (derecha), dominio de la frecuencia. ....	73
Figura 5.15.- Arreglo experimental para la modulación digital ASK con filtro intermedio. ....	74
Figura 5.16.- (Izquierda) espectros de modulación ASK sin filtro intermedio, (derecha) espectros de modulación ASK con filtro intermedio.....	76
Figura 5.17.- (Izquierda) espectros de modulación ASK sin filtro intermedio, (derecha) espectros de modulación ASK con filtro intermedio.....	78
Figura 5.18.- (Izquierda) espectro de modulación ASK sin filtro intermedio, (derecha) espectro de modulación ASK con filtro intermedio. ....	78
Figura 5.19.- Diagrama de bloques de sistema de demodulación ASK utilizando componentes eléctricos. ....	79
Figura 5.20.- Arreglo experimental para la demodulación de la señal ASK. ....	80
Figura 5.21.- Demodulación digital ASK, (a) 15MHz, (b), 30MHz, (c) 54MHz.....	81
Figura 5.22.- Demodulación digital ASK, (a) 15MHz, (b), 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz. ....	83
Figura 5.23.- Demodulación digital ASK, 25MHz.....	84
Figura 5.24.- Un diagrama de ojo resulta de la superposición de "0"s y "1"s de una cadena de datos digitales de alta velocidad. ....	85
Figura 5.25.- Distribución normal de datos. ....	86
Figura 5.26.- Nivel uno. ....	86
Figura 5.27.- Nivel cero. ....	87
Figura 5.28.- (a) Diagrama de ojo, (b) Nivel uno, (c) Nivel cero. ....	87
Figura 5.29.- Diagramas de ojo para (a) 30MHz de señal cuadrada de información (b) 54 MHz de señal cuadrada de información. ....	88
Figura 5.30.- Diagramas de ojo utilizando señal de datos de información para (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz.....	90
Figura 5.31.- Diagrama de ojo utilizando señal PRBS de información a 25MHz. ....	91
Figura 5.32.- Diagrama de bloques del esquema de modulación y demodulación óptica. ....	92
Figura 5.33.- Componentes utilizados para el esquema de modulación y demodulación digital ASK óptico. ....	93
Figura 5.34.- Espectro de la señal portadora de información. ....	94

Figura 5.35.- Señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz. ....	96
Figura 5.36.- Señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz. ....	98
Figura 5.37.- Señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz. ....	100
Figura 5.38.- Diagrama de ojo de las señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz. ....	101
Figura 5.39.- Diagrama de ojo de las señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz. ....	103
Figura 5.40.- Diagrama de ojo de las señales digitales demoduladas (a) 15MHz, (b) 30MHz, (c) 54MHz, (d) 75MHz, (e) 100MHz. ....	104
Figura 5.41.- Señal cuadrada: (a) 500MHz, (b) 1GHz; señal de datos: (c) 500MHz, (d) 1GHz; señal PRBS: (e) 500MHz, (f) 1GHz.....	106
Figura 5.42.- Atenuación efectiva de 1Km de distancia de un cable coaxial y una fibra óptica. El ancho de banda de 3dB de la fibra es 500MHz. ....	107
Figura 6.1.- Gráficas de tasa de transmisión contra SNR, (a) esquema eléctrico, (b) esquema electro-óptico .....	110

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Características eléctricas del OCV. ....	22
Tabla 3.2.- Rango de frecuencias de operación del mezclador (modulador) de RF. ....	28
Tabla 3.3.- Rango de frecuencias del mezclador en la etapa de demodulación. ....	28
Tabla 3.4.- Características eléctricas del filtro pasa – banda. ....	32
Tabla 3.5.- Características eléctricas del ARF.....	33
Tabla 5.1.- SNR de las señales demoduladas utilizando señal cuadrada de información. ....	89
Tabla 5.2.- SNR de las señales demoduladas utilizando señal de datos de información. ....	90
Tabla 5.3.- SNR de la señal demodulada utilizando señal PRBS de información.....	91
Tabla 5.4.- SNR de las señales demoduladas utilizando señal cuadrada de información. ....	102
Tabla 5.5.- SNR de las señales demoduladas utilizando señal de datos de información. ....	103
Tabla 6.1.- SNRs de: (a) señal cuadrada y (b) señal de datos .....	110