

A continuación se describe el proceso de medición del voltaje V_{π} y de la respuesta optoelectrónica.

5.2.1 Respuesta del modulador ante el voltaje aplicado y medición del voltaje de media onda (V_{π}).

El valor de V_{π} es el voltaje que se requiere para provocar una máxima variación en la intensidad óptica a la salida del modulador. Para medir el valor V_{π} se realizó el arreglo de la Figura 5.2.

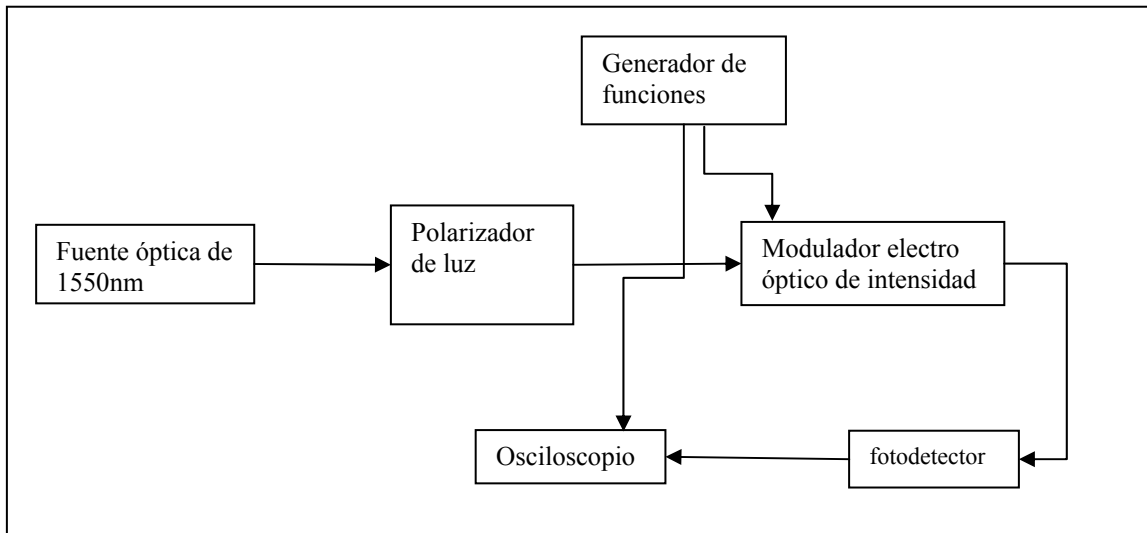


Figura 5.2 Arreglo experimental para medir el valor V_{π} .

El valor de V_{π} que da el fabricante para una modulación alterna es de 6 Volts para una señal luminosa de longitud de onda de 1550nm. Para la obtención del valor V_{π} de forma experimental, se hace una comparación entre la señal que se inyecta al modulador y con la señal recuperada después de pasar por el sistema óptico, la comparación es la medición de las señales en el osciloscopio de acuerdo al arreglo que se mostró en la Figura 5.2. Al saber el valor de V_{π} que da el fabricante se hace la prueba primero de colocar al

modulador una señal dentro de este rango para medir su respuesta en el osciloscopio. En la Figura 5.3 se muestra en cada canal del osciloscopio lo siguiente:

En canal 1 se tendrá la señal modulante, la cual fue obtenida directamente del generador de funciones, la señal triangular se invirtió en el osciloscopio, esto con el fin de poder apreciar mejor las características como fase, y la comparación de variaciones de la respuesta del modulador. Esta señal se utilizará como señal de referencia.

En el canal 2 se desplegará la señal óptica modulada después de haber pasado por el fotodetector. En la Figura 5.3 se muestra que tanto la señal modulada y la modulante presentan la misma forma triangular, esto significa que la señal triangular tiene una amplitud que está en el rango operacional de la respuesta del modulador y por esa razón las gráficas son iguales.

Para entender mejor el porqué se invierte la señal que se aplica al modulador hay que considerar lo siguiente: En el capítulo anterior se describió que la relación de potencia que genera el modulador es de forma cosenoidal como lo indica su fórmula de función transferencia de potencia de salida entre la potencia de entrada la cual es:

$$\frac{P_{sal}}{P_{en}} = \frac{1}{2} \left(1 + \text{Cos} \left[\frac{\pi V(t)}{V_{\pi}} \right] \right). \text{ Para que la Potencia luminosa sea igual a cero, se logra con el}$$

valor de la señal modulante $V(t)=V_{\pi}$ Volts, pues sustituyendo $V(t)$ en la ecuación de la función transferencia *queda lo siguiente:*

$$\frac{P_{sal}}{P_{en}} = \frac{1}{2} \left(1 + \text{Cos} \left[\frac{\pi(V_{\pi})}{V_{\pi}} \right] \right) = \frac{1}{2} (1 + \text{Cos}[\pi]) = \frac{1}{2} (1 + (-1)) = 0. \text{ Ahora para que la potencia}$$

luminosa sea la misma la de la entrada que la de la salida, se logra con el valor de la señal

modulante $V(t)=0$ Volts, pues sustituyendo en la función transferencia queda de la

$$\text{siguiente forma } \frac{P_{sal}}{P_{en}} = \frac{1}{2} \left(1 + \text{Cos} \left[\frac{\pi(0)}{V_{\pi}} \right] \right) = \frac{1}{2} (1 + \text{Cos}[0]) = \frac{1}{2} (1 + (1)) = 1.$$

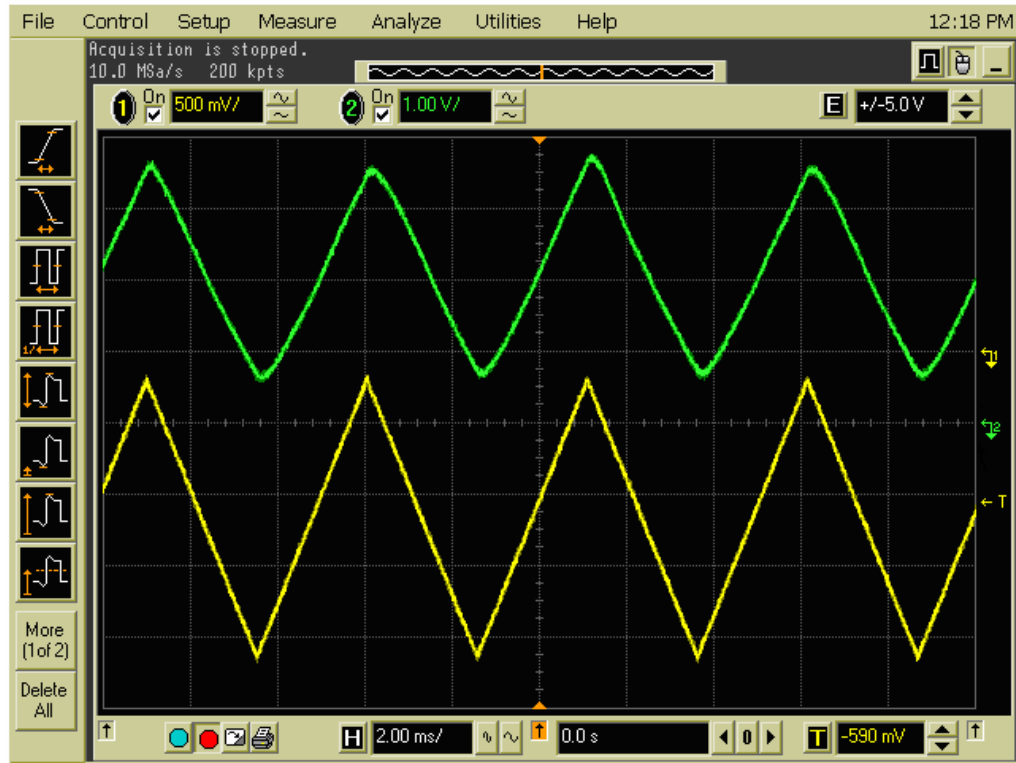


Figura 5.3 Señal modulante en el rango operacional del modulador.

Ya medida en el osciloscopio la respuesta del modulador en el rango operacional, la siguiente señal que se coloca al modulador es la señal triangular pero con valores superiores a los marcados por el fabricante, con el fin de observar el comportamiento del modulador en valores de voltaje mayores a los del rango operacional. En el osciloscopio se usaron la misma referencia de los canales y los resultados se muestran en la Figura 5.4, en la parte de la señal triangular que sobrepasa el rango operacional del modulador electro-óptico de intensidad, se presenta un doblamiento (inicio y cambio de ciclo) en los máximos y mínimos de intensidad, esto es de acuerdo a la función de transferencia.

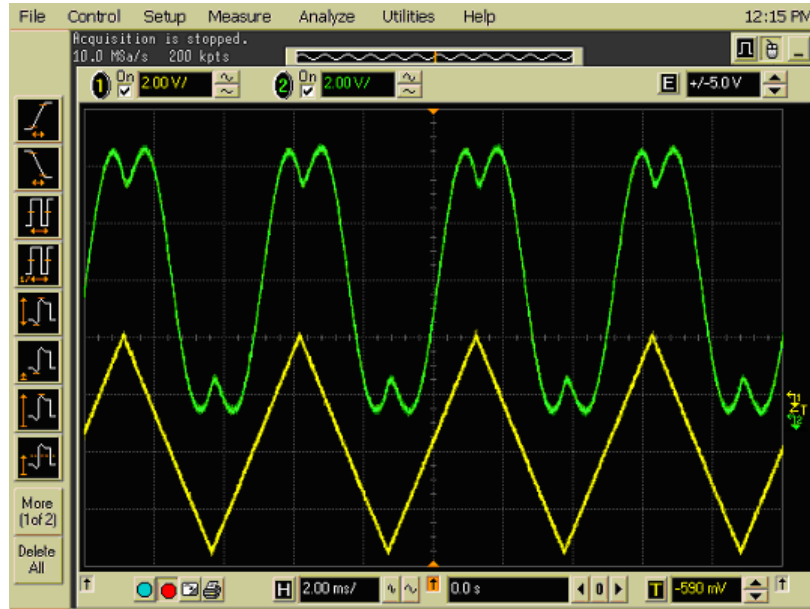


Figura 5.4 Imagen de Señal triangular fuera de rango operacional del modulador.

Para entender mejor el doblamiento de la intensidad de la señal luminosa, se hace un acercamiento de la Figura 5.4 únicamente en la mitad de un ciclo de la señal modulante tal como se muestra en la Figura 5.5.

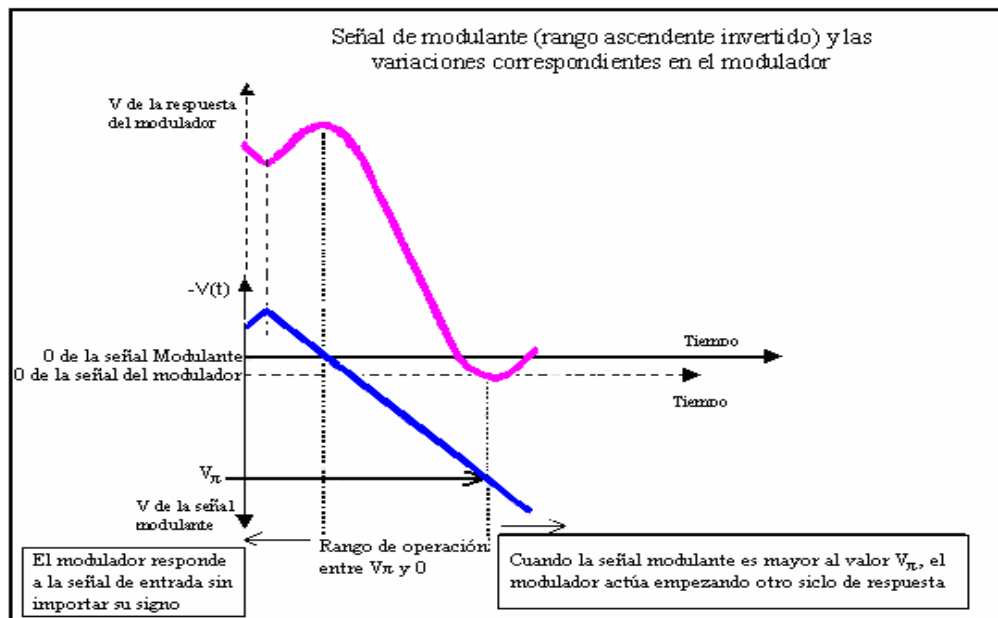


Figura 5.5 Señal modulante en el rango ascendente invertido y la señal del modulador.

De la figura 5.5 se aclara que la razón de usar una señal triangular como señal modulante es para observar el cambio en la señal modulada cuando la señal modulante tiene un rango de valores más grande que el rango operacional marcado por el fabricante. El rango operacional de voltaje en el cual trabaja de modulador va de 0 hasta V_{π} . En figura 5.5 se muestra que el valor V_{π} es el voltaje de la señal modulante que corresponde al valor intensidad igual a cero del modulador. Cualquier valor fuera del rango operacional, implicaría que se repita el ciclo de la respuesta del modulador y donde se hace el pico la señal triangular se hace un cambio de ciclo en la señal modulada.

Para observar con mayor detalle la salida del modulador y los valores $V(t)$ de la señal modulada, se grafica la señal triangular en comparación con la señal modulada en la función XY del osciloscopio dando como resultado la Figura 5.6.

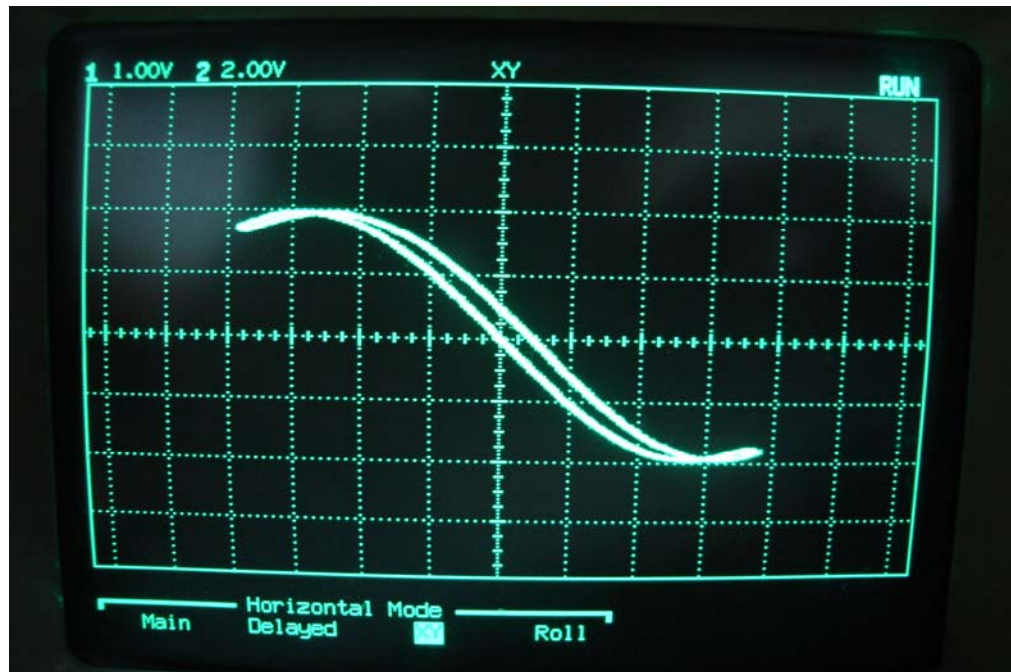


Figura 5.6 Comparación entre señal triangular y modulada en la forma XY para obtención de V_{π} .

De la Figura 5.6 se puede medir en la escala horizontal el valor del rango de voltaje que es aproximadamente 6 Volts (6 cuadros), por lo tanto el valor de V_{π} es aproximadamente de 6 Volts, el cual es el mismo valor que marca el fabricante.

Las anteriores mediciones sirvieron para graficar el comportamiento del modulador ante una señal modulante, escogiéndose la señal triangular para que en su parte lineal se pudiera hacer el análisis de la respuesta del modulador y observar la respuesta cuando se trabaja fuera de rango. El valor que da el fabricante se mide en la figura 5.6, no obstante la señal del modulador tiene mejor respuesta cuando trabaja por debajo del rango de operación y centrada en $V_{\pi}/2$.

5.2.2 Medición de Respuesta optoelectrónica del Modulador Electro- Óptico.

La medición de la respuesta optoelectrónica se realizó en el laboratorio, el arreglo experimental se muestra en la Figura 5.7. Con este arreglo se inyecta al modulador una señal eléctrica con barrido de 0 a 4 Ghz y amplitud constante. Una vez realizado el barrido en frecuencia en el modulador electro-óptico. Se recuperó la señal óptica modulada con el fotodetector y esta señal se desplegó en el analizador de espectros.

Debido a que en el laboratorio solo se cuenta con los componentes que acepten hasta 4 Ghz, no se midió hasta el máximo rango de frecuencias que soporta el modulador el cual es de 20 Ghz,

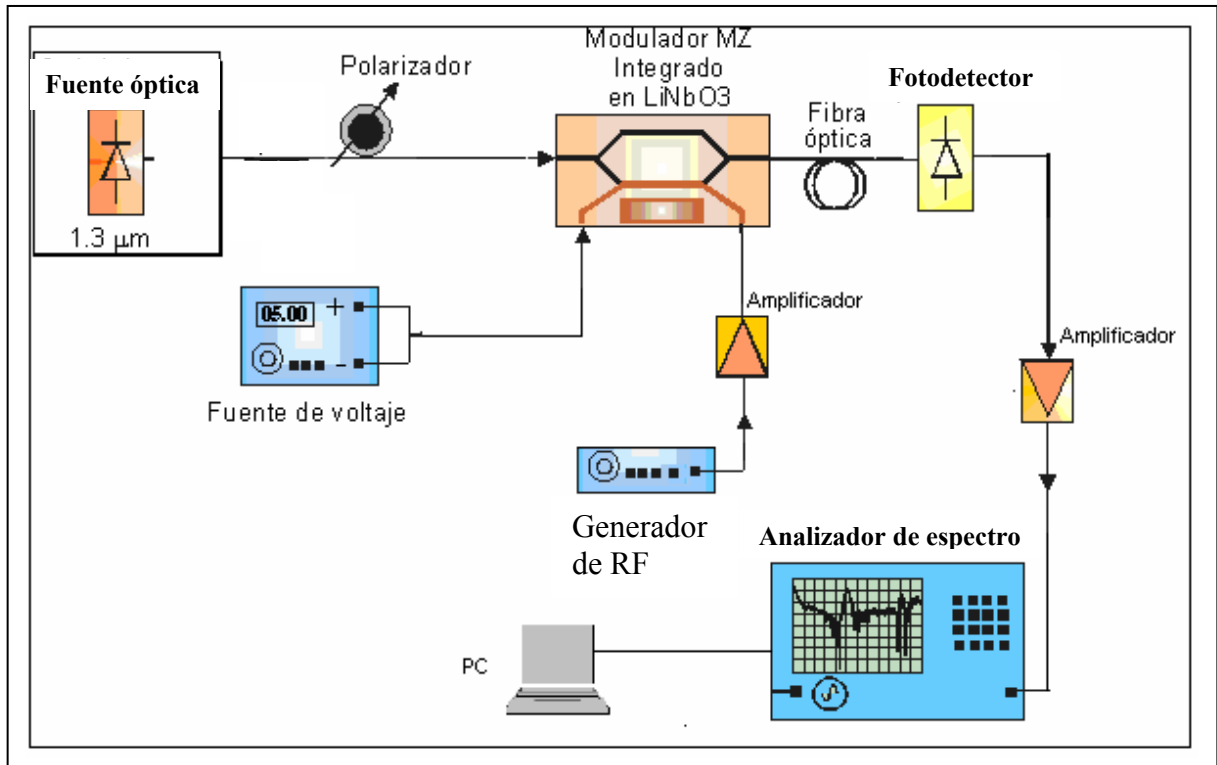


Figura 5.7 Arreglo experimental montado en el laboratorio para la obtención de la respuesta del modulador.

Los resultados que se obtuvieron en el analizador de espectros al realizar el arreglo mostrado en la Figura 5.7, se muestran la Figura 5.8.

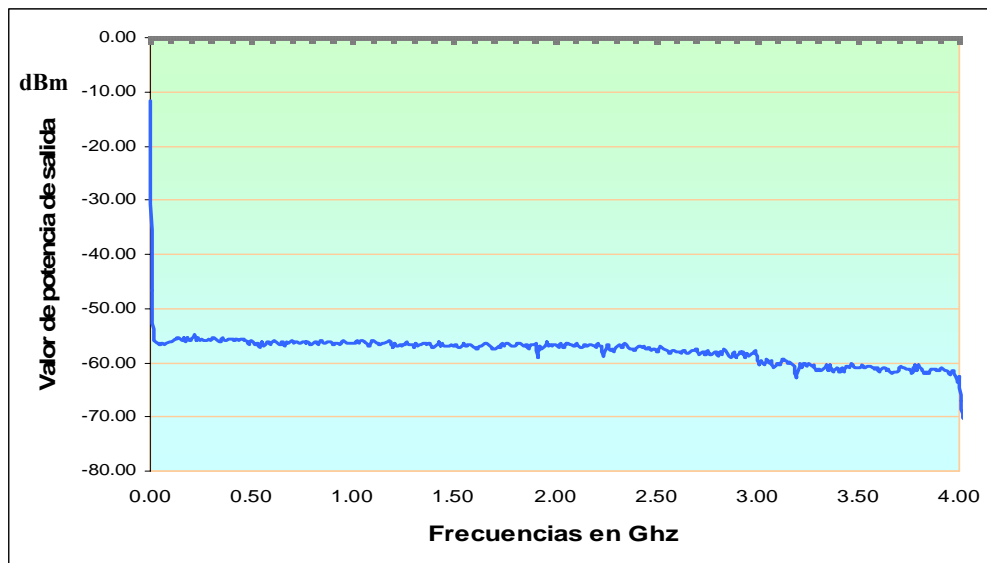


Figura 5.8 Gráfica de la respuesta optoelectrónica del modulador electro-óptico.

Esta gráfica muestra la respuesta optoelectrónica para el barrido de frecuencias que se le inyecta al modulador, no obstante se requiere medir en todo el rango de frecuencias que soporta el modulador. Para obtener la respuesta en frecuencia de todo el rango que soporta el modulador, se solicitó al personal del laboratorio de microondas del INAOE la caracterización de la respuesta optoelectrónica para el rango de frecuencia de 0 a 20 Ghz para lo cual se llevó el modulador y con el equipo del INAOE se realizó la caracterización.

La Figura 5.9 muestra el arreglo realizado para inyectar una señal eléctrica al modulador en un barrido de frecuencias de 0 hasta 20 Ghz. Este arreglo manda una señal al modulador y se retroalimenta.

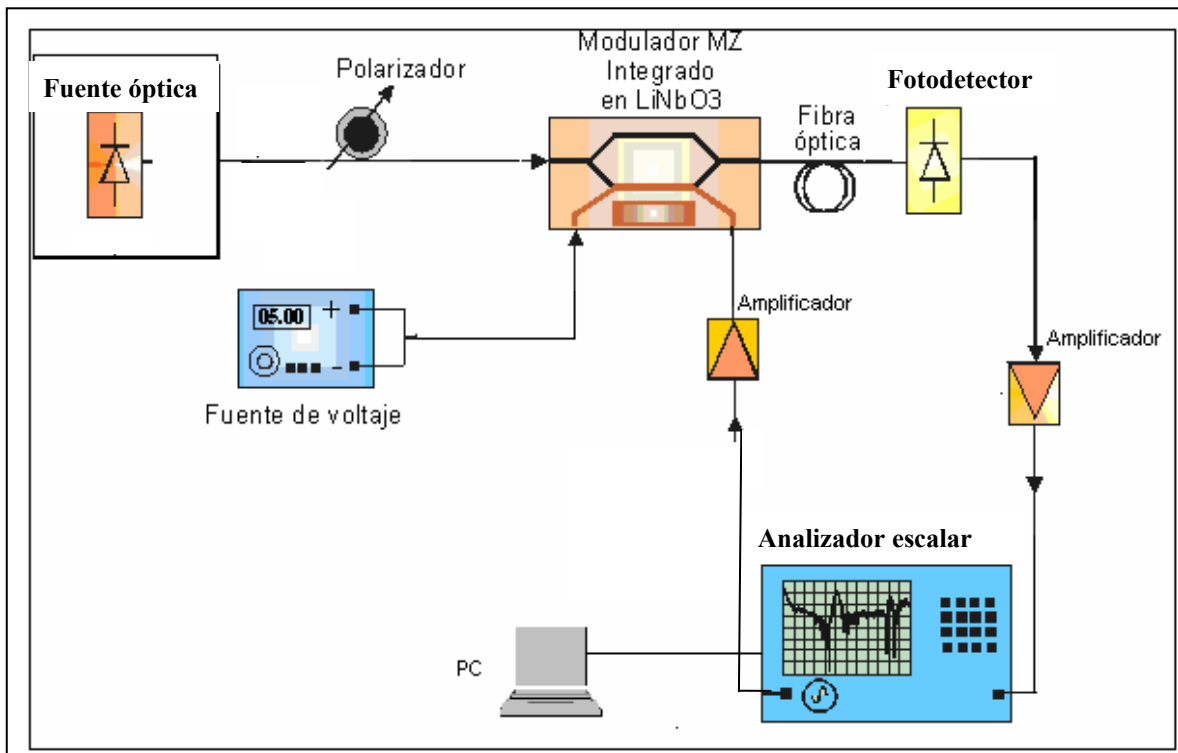


Figura 5.9 Arreglo para medir la respuesta optoelectrónica del modulador.

De la Figura 5.9 se puede mencionar que el analizador escalar inyecta al modulador electro-óptico de intensidad una señal de amplitud constante de 5 Volts y barrido en

frecuencia de 0 a 20 Ghz. Esta señal sirve de referencia para ser comparada con la señal eléctrica que se recupera a la salida del sistema óptico, es decir; se transmite por el enlace óptico y se retroalimenta al equipo en forma de señal eléctrica nuevamente. La Figura 5.10 muestra la respuesta en frecuencia del dispositivo electro-óptico y la Figura 5.11 muestra la respuestas en frecuencia que se tienen en las hojas de especificación del modulador.

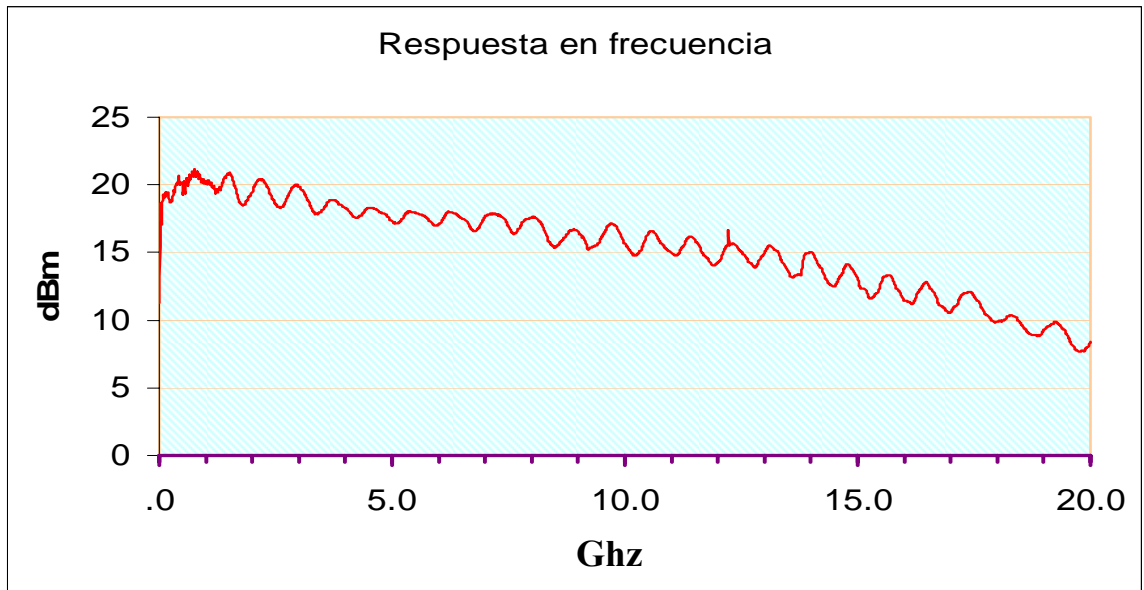


Figura 5.10 Respuesta electro-óptica del modulador de 0 a 20 Ghz.

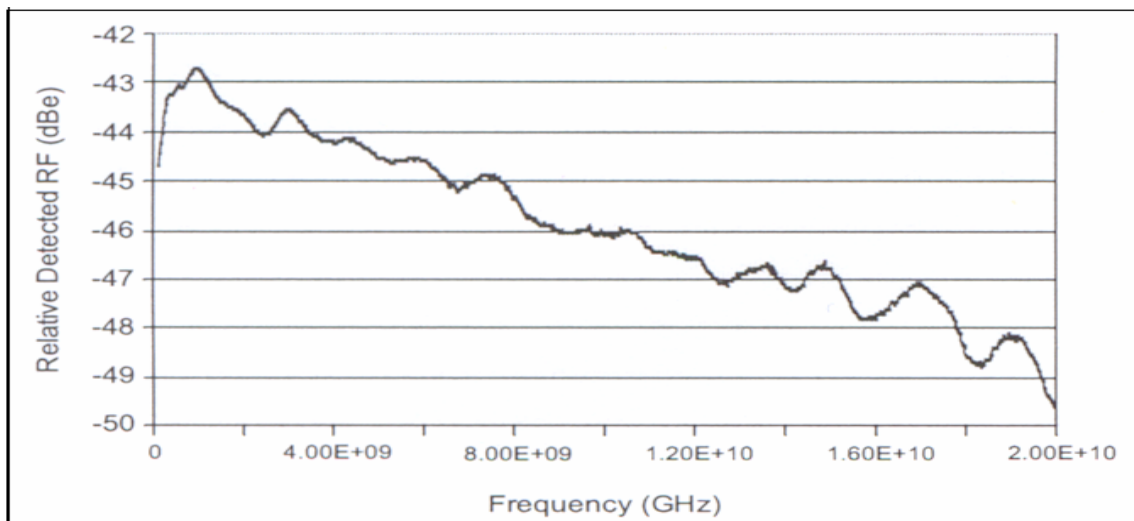


Figura 5.11 Respuesta en frecuencia de las hojas de especificaciones

Los resultados mostrados de la respuesta en frecuencia de la Figura 5.10 son semejantes a los que presenta el fabricante en la hoja de especificación y son mostrados en la figura 5.11. La semejanza es en la forma de la respuesta del modulador al barrido en frecuencia. La diferencia de escalas para medir la atenuación entre dBe que da el fabricante y dBm que se obtiene de la medición no existe, ambas mediciones son decibeles con una referencia de 1mW y la escala dBm es por que se aplica esta referencia mientras que la escala dBe no lo menciona pero para equipos electro-ópticos se usa este tipo de escala aunque sea la misma potencia de 1mW, esto se hace con el fin de diferenciar que la medición realizada fue electro-óptica y es la escala que usan los equipos electro-ópticos tal como lo es el modulador caracterizado. La atenuación es relativa y los valores dependen de la potencia que se logra en etapas de amplificación, pero en la figura 5.11 se puede ver que la variación de atenuación que tiene el modulador en el rango de frecuencia según el fabricante es de aproximadamente 8 dBe y la que se mide es de aproximadamente 11 dBm con lo cual la respuesta de atenuación también es semejante^[50, 51].

$$\text{Decibel} = \text{dB} = 10 \log (P1 / P2) \quad (5.1)$$

Donde P1 es el nivel de potencia medido y P2 es el nivel de potencia de referencia,

$$\text{dBm} = 10 \log (P1 / 1\text{mW}) \quad (5.2)$$

$$\text{Mientras que } \text{dBe} = 10 \log (P1 / P2) \quad (5.3)$$

Haciendo a P2 de la ecuación (5.3) igual a 1mW entonces dBm y dBe son la misma escala de decibeles con la misma referencia.

Del mismo archivo con el que se generaron los datos de la Figura 5.10 se toman los valores hasta 4 Ghz, dando como resultado la gráfica de la Figura 5.12. Esta gráfica sirve para comparar con la medición realizada en el laboratorio de la UDLAp.

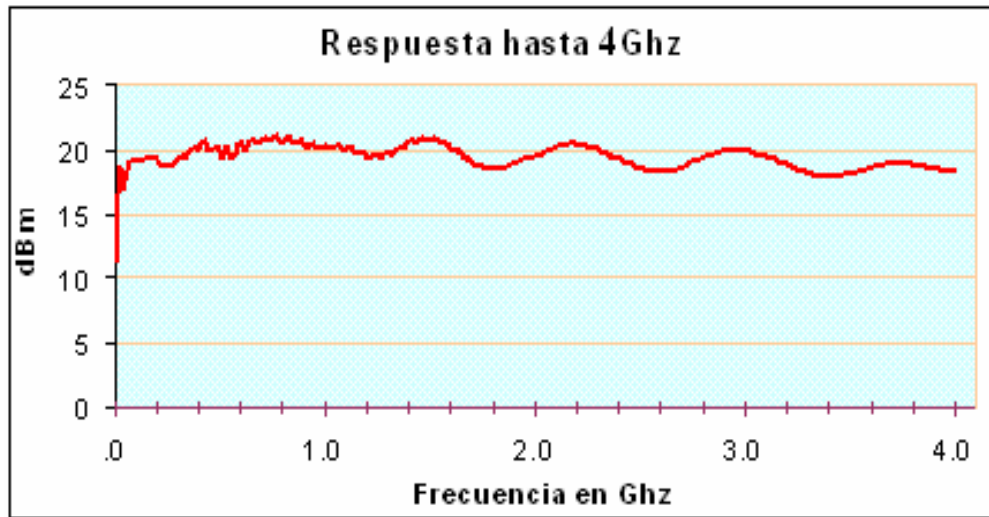


Figura 5.12 Respuesta en frecuencia hasta 4 Ghz.

Tanto en la Figura 5.7 y la 5.10 se muestra que la respuesta en frecuencia es constante, existiendo poca variación en la amplitud, es decir; en este rango de frecuencias, la respuesta eléctrica del dispositivo no es muy variable o tiene pocas pérdidas.

5.3 Arreglo experimental propuesto para la transmisión de video compuesto.

Antes de explicar el arreglo experimental se da una introducción a la señal de video compuesto:

Se denomina señal de video a la codificación de la secuencia de imágenes produciendo una señal eléctrica. La imagen es capturada por medio de cámaras que, en

promedio, toman treinta imágenes fijas cada segundo y éstas se convierten en líneas y puntos; posteriormente, a cada uno de ellos se le asigna un color y una intensidad, así como parámetros de sincronía vertical y horizontal con la finalidad de que el equipo receptor muestre las imágenes en un cinescopio. A ese conjunto de líneas y sincronías se le denomina Video Compuesto, y para transmitirse a través del aire se requiere de un modulador de radio frecuencia, además de una antena que dispersa la señal en forma de ondas. Las bandas más comunes son UHF (Ultra Alta Frecuencia) y VHF (Muy Alta Frecuencia), usando una portadora para la señal de color de 3.6Mhz, cuyos canales van del 14 al 83 y del 2 al 13, respectivamente. De esta manera, el video compuesto se emite como una onda de amplitud modulada (AM), y el audio como una onda de frecuencia modulada (FM). La selección de un canal u otro (ya sea en las antiguas televisiones de perilla o las modernas de control remoto) consiste en brincar de un segmento de 6 Mhz a otro. Así, por ejemplo, el canal 2 en la banda de VHF emite su señal en los 54 Mhz; hasta el canal 6 se llega a los 88 Mhz; mientras que los canales 7 al 13 ocupan el espectro comprendido entre 174 y 216 Mhz, en tanto, la banda de UHF oscila entre los 470 y 890 Mhz^[44].

La introducción sobre el video compuesto muestra las características de la señal a transmitir a través del arreglo experimental, lo cual permitirá poner a prueba las características de respuesta del modulador electro-óptico.

La Figura 5.13 muestra el arreglo experimental propuesto, el cual es un arreglo homodino ya que la señal utilizada como sub-portadora eléctrica es la misma que se usa para recuperar la señal de video compuesto.

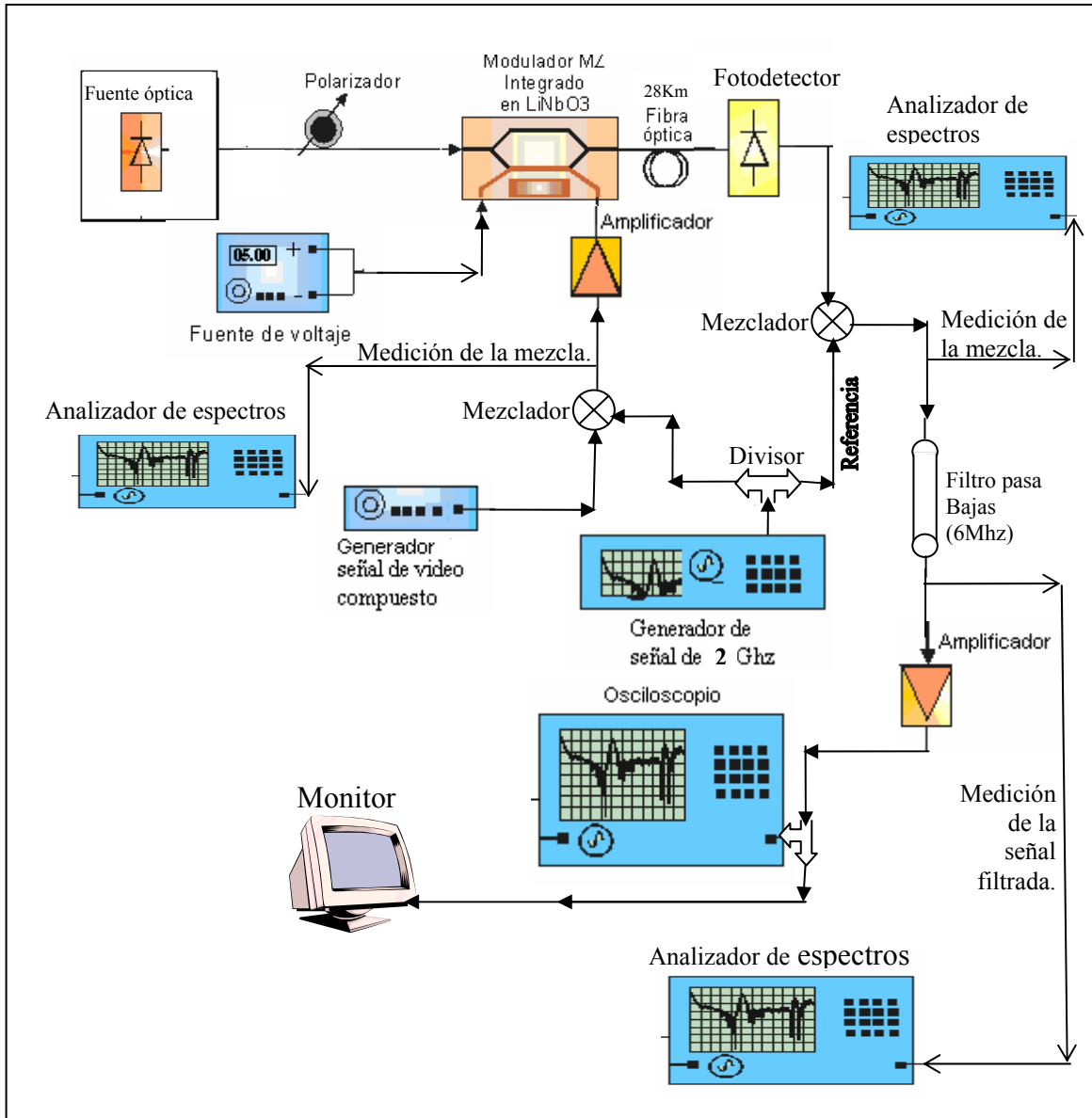


Figura 5.13 Arreglo homodino propuesto, para transmisión de señal de video por F.O. con sub-portadora eléctrica de alta frecuencia.

La Figura 5.14 muestra la foto del arreglo experimental montado en el laboratorio para las pruebas de la transmisión de video compuesto.



Figura 5.14 Foto de arreglo de transmisión y recuperación de señal de video.

De acuerdo al arreglo de la Figura 5.13, se tiene lo siguiente:

La señal de alta frecuencia de 2 Ghz utilizada como sub-portadora eléctrica, es dividida en potencia para ser mezclada con la señal de video compuesto y para servir de señal de referencia para bajar a la salida la señal modulada a banda base y se pueda captar en el receptor.

En la Figura 5.15 se muestra la medición que se obtuvo en el analizador de espectros, de la mezcla de la señal de video compuesto con la señal de alta frecuencia.

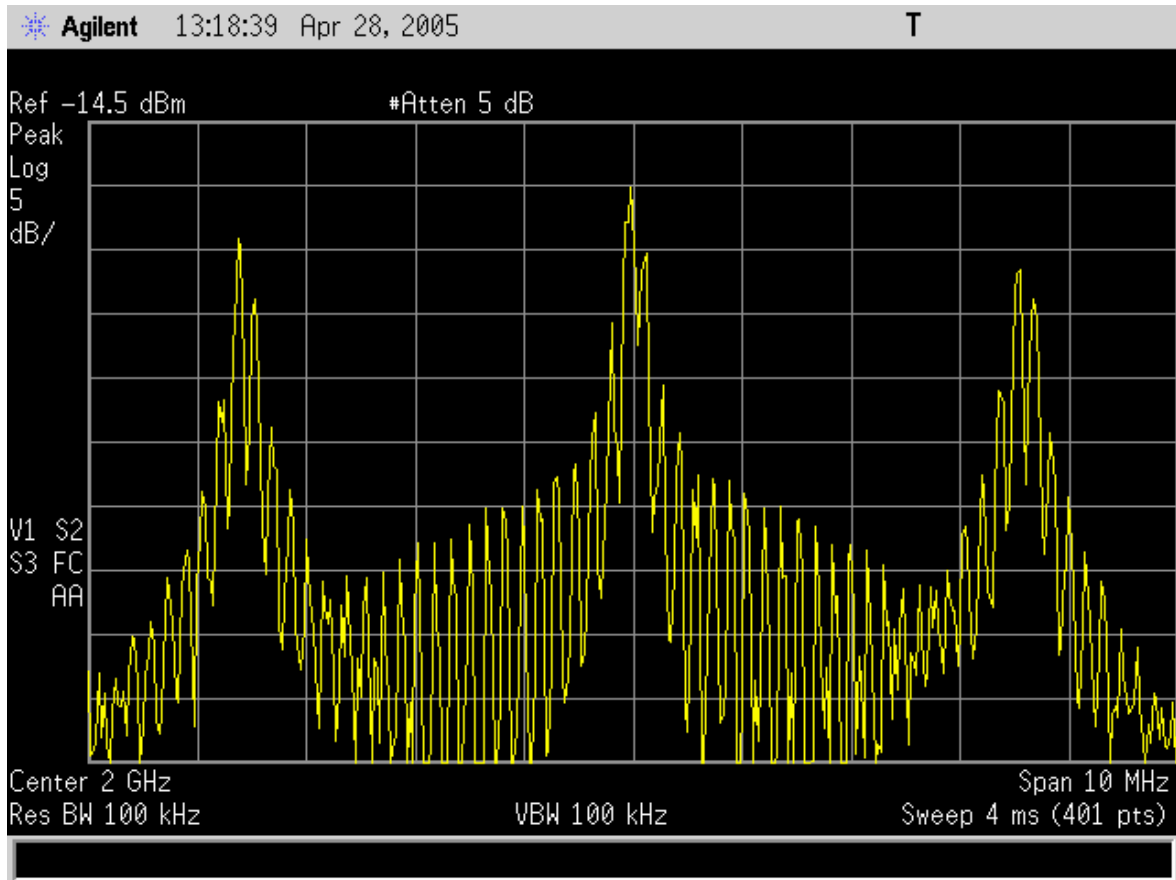


Figura 5.15 Espectro de la señal de video y sub-portadora eléctrica a la salida del mezclador.

La Figura 5.15 muestra a la sub-portadora eléctrica en la frecuencia de 2 Ghz y en las bandas laterales la portadora de color de la señal de video compuesto de 3.6 Mhz.

La señal mezclada se amplifica para que llegue a los valores de rango de operación del modulador electro-óptico y se inyecta al mismo. Por otro lado el modulador electro-óptico es alimentado por una fuente laser, la cual emite una potencia constante. Esta potencia se controla mediante un circuito, el cual inyecta al diodo una corriente de 18 mA. A la salida del laser, la luz se hace pasar por un polarizador de fibra óptica, el cual se encarga de preferenciar la orientación de la señal luminosa, para que se tenga la mejor

interacción electro-óptica en el interior del modulador. El modulador además de recibir la señal amplificada del mezclador, también recibe un nivel de voltaje DC, para poder mover la señal modulante al rango lineal de la respuesta del modulador.

A la salida del modulador la señal óptica modulada es transmitida por 28 Kms de fibra óptica la cual tiene las siguientes características: Fabricada por ALCATEL en Alemania el 17 de septiembre del 2003, monomodo, color natural y atenuación para longitud de onda de 1150nm de 0.193 dB/km . En el extremo receptor de la fibra, la luz es convertida a señal eléctrica por un fotodetector. La Figura 5.16 muestra la señal eléctrica recuperada después de transmitirse por el enlace óptico.

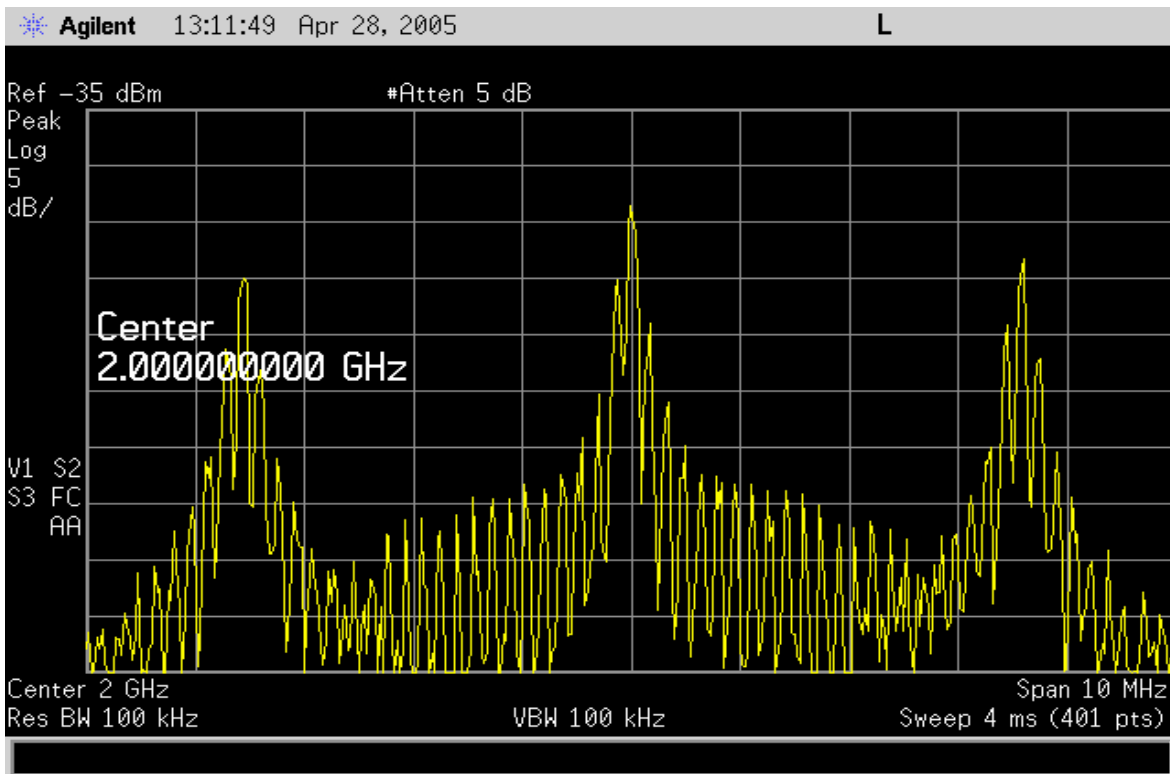


Figura 5.16 Espectro de la señal eléctrica a la salida del sistema óptico.

La Figura 5.15 muestra a la señal eléctrica modulante que se inyecta al modulador, mientras que la Figura 5.16 muestra la señal eléctrica recuperada a la salida de 28 Kms. de F.O. acoplados al modulador. Ambas figuras son muy parecidas pero para saberlo, hay que

medir la distorsión la señal modulada comparada con la señal eléctrica recuperada a la salida del sistema. A ambas señales se les mide su factor de distorsión “THD” (*Total Harmonic Distortion*), el cual da una idea de la distorsión que presenta la señal al transmitirse. Para entender mejor lo que es el THD se desglosa su significado de la manera siguiente: *Distorsión. Distortion.* Adición de nuevas frecuencias a una señal. *Distorsión armónica. Harmonic distortion.* Adición de nuevas frecuencias a una señal las cuales son múltiplos de la señal de entrada. Por ejemplo, 2000 y 3000 hz son armónicos de una señal de entrada de 1000hz. *Distorsión armónica total. Total Harmonic Distortion, THD.* Medida de distorsión que suma los diferentes armónicos de distorsión de una señal. Dicho de otro modo THD es la razón del valor medio cuadrático del contenido de armónicas (excluyendo la fundamental) al valor medio cuadrático de la cantidad fundamental, expresada como un porcentaje. Tal como lo indica la ecuación (5.1) Un valor de THD menor al 10% indica que la señal tiene una baja distorsión o distorsión aceptable (de acuerdo a esta referencia) [45].

$$\text{Distorsión Armónica Total (THD)} = \sqrt{\frac{\text{Suma de cuadrados de las amplitudes de las armónicas}}{\text{Valor Medio al cuadrado de la Fundamental}}} \times 100 \quad (5.1)^{[45]}$$

La comparación del THD de la señal modulante y la señal recuperada permitirá saber que tanta distorsión armónica sufrió la señal modulante por todo el arreglo hasta llegar a su recuperación en señal eléctrica.

La Figura 5.17 muestra la medición de THD de la señal eléctrica que se inyecta al modulador, mientras que la Figura 5.18 muestra la medición del THD de la señal eléctrica recuperada a la salida de 28 Kms. de F.O. acoplados al modulador.

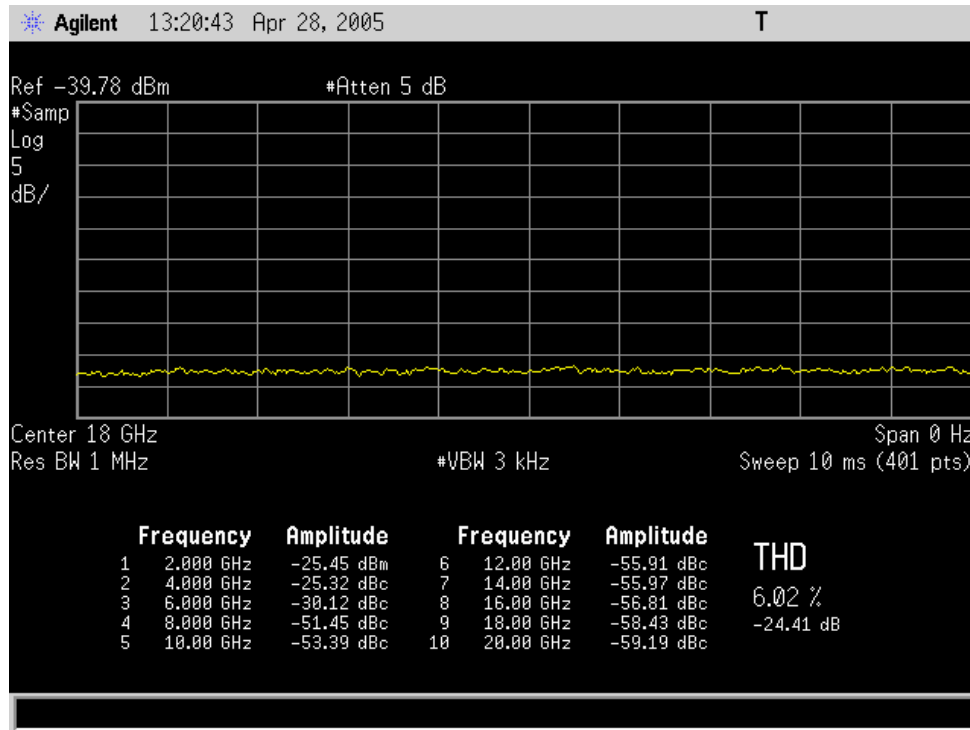


Figura 5.17 Medición del THD de la señal eléctrica inyectada al modulador.

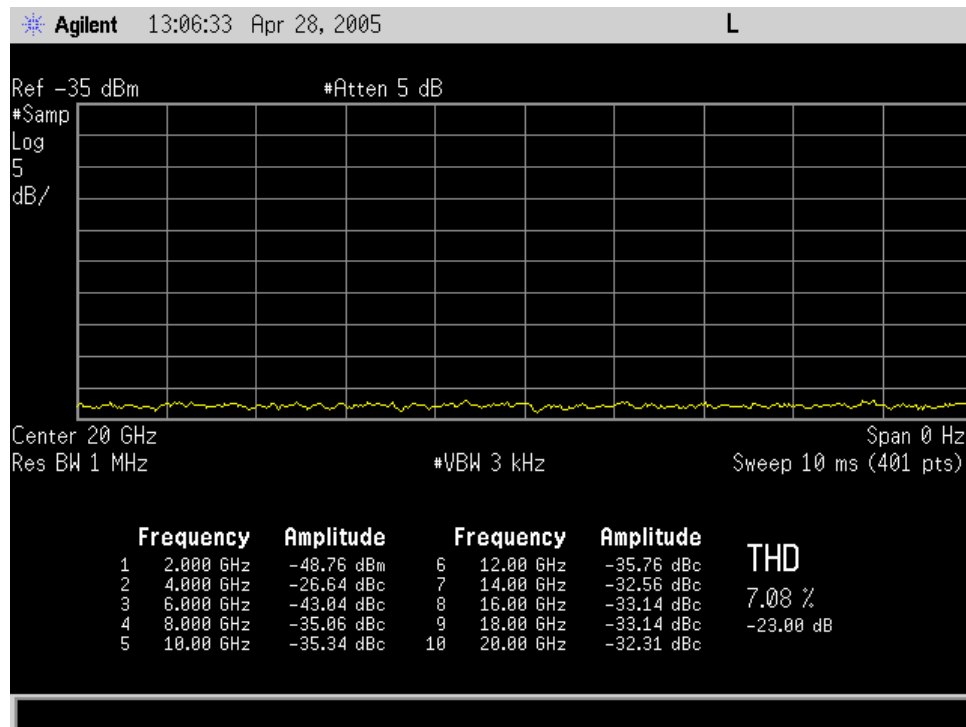


Figura 5.18 Medición de THD de señal eléctrica recuperada a la salida del 28 Kms. de F.O.

acoplados al modulador.

La Figura 5.17 muestra un valor THD de 6.02%, este valor es pequeño y no representa una distorsión lo suficiente grande para afectar los valores de la señal portadora. La distorsión medida se obtiene principalmente en el momento de realizar la mezcla de la señal de video compuesto con la sub-portadora eléctrica de 2 Ghz.

EL valor de THD al inicio de enlace óptico es 6.02 % y a la salida es de 7.08 %, tal como lo muestran las Figuras 5.17 y 5.18 respectivamente. La comparación de estos valores permiten afirmar que la señal eléctrica recuperada es casi igual a la señal eléctrica que se inyectó al modulador pues, apenas sufrió una incremento de 1.06% en el valor del THD, con lo cual se puede concluir que la sistema, permite la transmisión de señales de alta frecuencia, principalmente gracias a la modulación externa de intensidad con tecnología en óptica integrada y la baja atenuación de la fibra que es de apenas .193 db/km, pero también a la respuesta del fotodetector que es el encargado de convertir la señal óptica a eléctrica en el momento que emite un pulso eléctrico cuando es impactado por la luz. una respuesta lenta o una mala conversión provocaría valores más altos del 10% de THD considerándose ya una señal distorsionada ^[17,45]

Por último, para recuperar la señal de video compuesto montada en la sub-portadora eléctrica de 2 Ghz, se utiliza un segundo mezclador. La señal de mezcla es la que se toma del generador de RF a la salida del divisor utilizado. Este arreglo permitirá recuperar la señal de video, ya que generará información en 4 Ghz y en banda base. La señal a la salida del mezclador se pasa por un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 6 Mhz. La Figura 5.19 muestra los resultados obtenidos en el analizador de espectros.

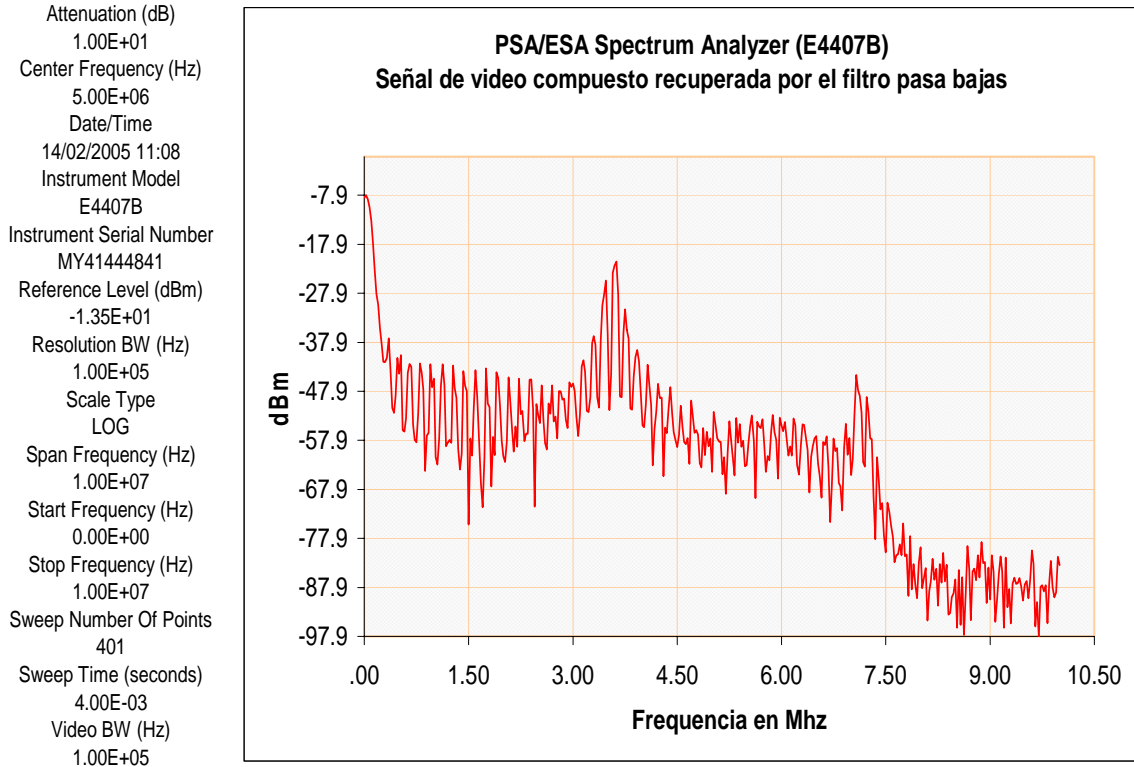


Figura 5.19 Resultado del filtrado de la señal ya recuperada.

De la figura 5.19 se observa la portadora de la señal de color (3.6 Mhz) en banda base. También se muestra un armónico de la misma señal (7.2 Mhz), no obstante el resto de las demás señales se eliminaron por el filtro pasa bajas.

La señal filtrada es la señal de video compuesto en banda base. Esta señal se amplifica para que llegue a los valores adecuados para desplegarse en el monitor y ser vista al mismo tiempo en el osciloscopio. Los resultados de esta recuperación de la señal de video se muestran en la Figura 5.20.

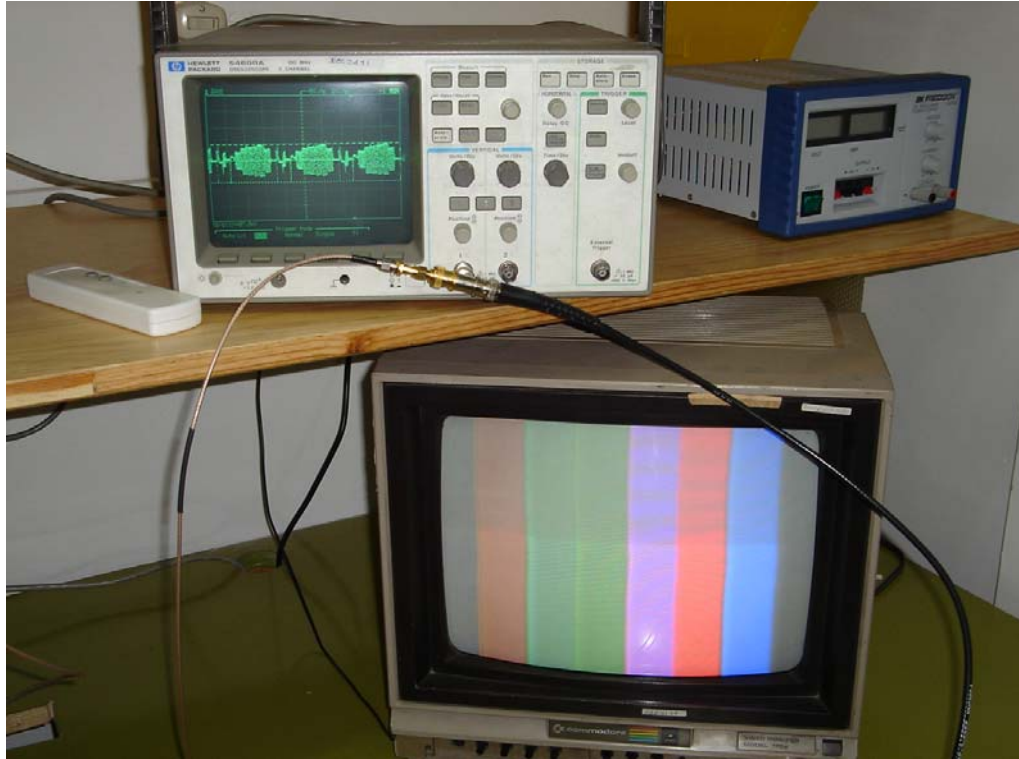


Figura 5.20 Señal de Video recuperada, y mostrada en el monitor y el osciloscopio.

La Figura 5.20 muestra la recuperación del video compuesto, la cual se despliega en el monitor, donde se muestran las bandas de color características de la señal de video. Además en el osciloscopio se muestra la señal del video compuesto, en el tiempo.

5.4 Conclusión

Los resultados de la caracterización del modulador indican que los valores que el fabricante da del mismo, son correctos, además se midió el comportamiento del modulador y se entendió su forma de respuesta tanto en voltaje aplicado a la entrada como al rango de frecuencias que soporta.

En cuanto a la transmisión de video, los resultados demuestran que una transmisión analógica, con las características de la señal de video compuesto a distancias de 28 Kms.,

es posible gracias a la modulación de intensidad tipo externa. La implementación de este arreglo es un ejemplo de que la tecnología en óptica integrada puede resolver las limitaciones de ancho de banda y velocidades de transmisión existentes en la mayoría de los sistemas de comunicación actuales, aprovechando los tendidos de F.O. existentes o tendiendo nuevos, pues para este caso se transmitió con una sub-portadora eléctrica de 2 Ghz, pero el modulador electro-óptico puede trabajar hasta con señales de 20Ghz.